



HAL
open science

Numérisation du réel, un regard sur le flux informationnel en architecture

Philippe Marin

► **To cite this version:**

Philippe Marin. Numérisation du réel, un regard sur le flux informationnel en architecture. Architecture, aménagement de l'espace. Université de Lille, 2020. tel-03153388

HAL Id: tel-03153388

<https://hal.science/tel-03153388v1>

Submitted on 3 Mar 2021

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

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



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

Université de Lille
Ecole Doctorale Sciences de l'Homme et de la société

Volume 1, mémoire inédit

Philippe Marin

Numérisation du réel, un regard sur le flux informationnel en architecture

En vue de l'obtention d'une
Habilitation à Diriger des Recherches
Section 18 Architecture (ses théories et ses pratiques)

Date de la soutenance : le 23 juin 2020

MEMBRES DU JURY :

François GUENA

Professeur, ENSA de Paris La Villette, Hesam Université (Rapporteur)

Livio DE LUCA

Directeur de recherche au CNRS (Examineur)

Antonella MASTRORILLI

Professeure, ENSAP de Lille, Université de Lille (Tutrice)

Elizabeth MORTAMAS

Maîtresse de Conférences émérite, ENSA de Paris Val de Seine, Université Paris Diderot
(Rapporteur)

Antoine PICON

Directeur de recherche ENPC, Professeur, Harvard University Graduate School of Design
(Rapporteur)

Alessandra PONTE

Professeure, Faculté d'Architecture de l'Université de Montréal (Examinatrice)

Ce mémoire constitue le volume inédit de notre habilitation à diriger des recherches. Nous portons un regard sur la place du *flux informationnel* dans les processus de conception numérique de l'architecture. Nous nous intéressons aux outils et méthodes de la conception et ainsi nous cherchons à organiser une connaissance associée aux modalités d'instrumentation ainsi qu'à la théorie de la conception numérique de l'architecture.

Notre document est structuré en trois volets, ils nous permettent de caractériser ce *flux informationnel* qui s'inscrit dans une forme de continuum.

Le volet 1, intitulé *modéliser*, traite de l'instrumentation numérique de la conception et spécifiquement de la modélisation paramétrique, générative et de l'intelligence artificielle. Nous verrons un basculement des procédés, qui passent d'une logique d'interopérabilité entre les outils, à des démarches qui reposent sur la définition et la mise en œuvre de flux informationnels.

Le volet 2 porte le titre *visualiser*. Ce sont les modalités de représentation et de visualisation de l'information qui sont considérées. Ces *néo-cartographies* se constituent dans le contexte des méga-données et des villes intelligentes, elles participent à une *datafication* du monde, porteur de risques et d'espairs. Elles s'accompagnent de la généralisation des objets cyber-physiques et nous permettent d'envisager la naissance d'une *écologie de l'artificiel*.

Le troisième volet du mémoire est nommé *fabriquer*. Nous examinons ici les questions de fabrication numérique et robotisée, en révélant les étroites relations entre culture matérielle et culture numérique. Celles-ci donnent lieu à une robotique créative que nous caractérisons à l'aide du triptyque *machine, matière, modèle*.

This volume is our unpublished dissertation for obtaining our research supervisor authorization. We tackle the *information flow* in the digital design process of architecture. We are interested in the tools and methods of design and thus we seek to organize knowledge associated with the instrumentation modalities as well as the theory of architectural digital design.

Our document is structured in three parts, they allow us to characterize this *information flow* which we consider as a continuum.

Part 1, entitled *Modeling*, deals with the numerical instrumentation of the design and specifically with parametric, generative and artificial intelligence modeling. We will see a shift in processes from a logic of interoperability between tools to approaches based on the definition and implementation of information workflows.

Part 2 has the title *Visualize*. It is the modalities of representation and visualization of the information that are considered. These neo-cartographies are constituted in the context of big-data and smart-cities; they participate in a datafication of the world, carrying risks and hopes. They go hand in hand with the generalization of cyber-physical objects and allow us to consider the birth of an ecology of the artificial.

The third part of the document is called *Fabricate*. Here we examine the issues of digital and robotic manufacturing, revealing the close relationship between material and digital cultures. These give rise to *creative robotics*, which we characterize using the tripod *machine, material, model*.

REMERCIEMENTS

Je remercie vivement les membres du jury, tout d'abord les rapporteurs pour avoir accepté d'évaluer ce travail, François Guéna, Elizabeth Mortamais et Antoine Picon, ainsi que les examinateurs pour leurs regards et participations, Livio De Luca et Alessandra Ponte, mes remerciements vont également à Antonella Mastrorilli pour son parrainage.

Je remercie les membres du laboratoire MAP et particulièrement les équipes du CRAI et d'ARIA dont les collaborations ont rendu possible la réalisation de nombreux projets, Hervé Lequay, Renato Saleri, Xavier Marsault, Gilles Halin, Jean-Claude Bignon.

Je tiens également à remercier Catherine Maumi qui a su créer les conditions d'accueil et de travail au sein du laboratoire MHAevt.

Enfin ce travail a été rendu possible par le soutien quotidien et permanent de Yann et de mes deux filles Rose et Violette, ainsi que par la participation d'Yvonne.

Ce travail a été soutenu par la Caisse des Dépôts et Consignations avec l'attribution d'une bourse de Recherche en Architecture et en Paysage.

1	INTRODUCTION	12
1.1	METHODOLOGIE DE RECHERCHE : UNE RECHERCHE FINALISEE	12
1.1.1.	ENTRE DYNAMIQUE DE CONNAISSANCE ET QUESTIONS DE SOCIETE	12
1.2	ORGANISATION DU MEMOIRE	14
1.2.1.	MODELISER, VISUALISER, FABRIQUER	14
1.2.2.	LE FLUX INFORMATIONNEL : UN PARCOURS DES ECHELLES	15
2	MODELISER	16
1.1	NAISSANCE DES CULTURES NUMERIQUES	17
2.1.1.	NAISSANCE DE L'AUTOMATISME DU CALCUL	17
2.1.2.	LA THEORIE DE L'INFORMATION	19
2.1.3.	LA CYBERNETIQUE	21
2.1.4.	LE WHOLE EARTH CATALOG : DE LA CONTRE-CULTURE A LA CYBERCULTURE	22
1.2	BREVE HISTOIRE DE LA CONCEPTION NUMERIQUE DE L'ARCHITECTURE	24
2.2.1.	LA PENSEE PROTO-PARAMETRIQUE	24
2.2.2.	ARCHITETTURA PARAMETRICA	26
2.2.3.	NAISSANCE DE L'INTERACTIVITE	27
2.2.4.	L'ARCHITECTURE NUMERIQUE DE LA FIN DU XX ^e SIECLE	28
1.3	LA MODELISATION PARAMETRIQUE	33
2.3.1.	LA NOTION DE MODELE	34
2.3.2.	LA MODELISATION PARAMETRIQUE	35
2.3.3.	LE MODELE ASSOCIATIF	37
2.3.4.	LA MATHEMATISATION DU PROJET	38
2.3.5.	LA MODELISATION PARAMETRIQUE URBAINE	42
2.3.6.	MAQUETTE NUMERIQUE DE L'ARCHITECTURE ET DE LA VILLE	44
1.4	PERFORMANCES ET SIMULATIONS	45
2.4.1.	LA NOTION DE SIMULATION	46
2.4.2.	D'UNE PERFORMANCE EVALUATIVE A UNE PERFORMANCE CREATIVE	48
2.4.3.	DE L'INTEROPERABILITE AU CONTINUUM INFORMATIONNEL	49
2.4.4.	OBJECTIVATION DU PROCESSUS DE CONCEPTION	50
1.5	MODELISATION GENERATIVE ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE	51
2.5.1.	NAISSANCE DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE	51
2.5.2.	ÉMERGENCE ET AUTO-ORGANISATION	52

2.5.3.	DES ALGORITHMES AU RAISONNEMENT INDUCTIF	54
2.6	PREMINENCE DU FLUX INFORMATIONNEL.....	61
2.6.1.	LA MODELISATION PARAMETRIQUE ADAPTATIVE	61
2.6.2.	CONTINUITÉ ET DISCONTINUITÉ NUMÉRIQUES	64
2.6.3.	LOGIQUE PROCESSUELLE ET META-CONCEPTION	67
2.7	CONCLUSION	71
3	<u>VISUALISER</u>	<u>72</u>
3.1	ÉMERGENCE D'UNE NEO-CARTOGRAPHIE.....	72
3.1.1.	LA CARTOGRAPHIE.....	72
3.1.2.	SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET GEOMATIQUE.....	74
3.1.3.	LA GRAPHIQUE.....	76
3.1.4.	PENSÉE DIAGRAMMATIQUE ET PROCESSUS VIRTUELS	77
3.1.5.	NEO-CARTOGRAPHIE ET METABOLISME URBAIN	78
3.2	UNE GEOGRAPHIE DIRIGÉE PAR LES DONNÉES.....	83
3.2.1.	LA PRODUCTION DE MEGADONNÉES.....	83
3.2.2.	UNE PRODUCTION MASSIVE ADOSÉE À LA VILLE INTELLIGENTE	87
3.2.3.	TRAITEMENT ET EXPLOITATION DES MEGADONNÉES.....	87
3.3	LA VILLE, UN ENVIRONNEMENT INFORMÉ ET INFORMANT.....	88
3.3.1.	DES PRATIQUES ET DES USAGES ÉMERGENTS	89
3.3.2.	UNE INTELLIGENCE COLLECTIVE.....	90
3.3.3.	UNE COMPRÉHENSION MULTI-ÉCHELLE	91
3.3.4.	UNE SUPERVISION OPTIMISÉE	92
3.3.5.	DATAFICATION DU REEL	94
3.4	VISUALISATION DE L'INFORMATION.....	99
3.4.1.	DE LA DATA VISUALISATION À LA DATA PHYSICALISATION.....	99
3.4.2.	LES PRÉCURSEURS.....	108
3.4.3.	LES PRINCIPES DE LA CARTOGRAPHIE TRADITIONNELLE	119
3.4.4.	TYPLOGIES DES REPRÉSENTATIONS VISUELLES.....	125
3.4.5.	TECHNIQUES DE CARTOGRAPHIE NUMÉRIQUE	135
3.5	CONCLUSION	142
4	<u>FABRIQUER</u>	<u>143</u>
4.1	CULTURE MATÉRIELLE ET CULTURE NUMÉRIQUE.....	144
4.1.1.	SCIENCE CONCRÈTE ET ARTISANAT NUMÉRIQUE	144
4.1.2.	MATIÈRE ET COMPUTATION.....	147
4.2	LA FABRICATION NUMÉRIQUE.....	152

4.2.1.	BREVE HISTOIRE DES TECHNIQUES DE FABRICATION NUMERIQUE	153
4.2.2.	STRATEGIES ET TECHNIQUES DE FABRICATION NUMERIQUE.....	159
4.2.3.	LA PLACE DE LA ROBOTIQUE EN ARCHITECTURE	164
4.2.4.	CONSTRUCTION CYBER-PHYSIQUE.....	167
4.3	ENJEUX ET OPPORTUNITES DE LA ROBOTIQUE CREATIVE.....	169
4.3.1.	LA ROBOTIQUE CREATIVE.....	169
4.3.2.	ENJEUX TECHNIQUES ET SCIENTIFIQUES	174
4.3.3.	ENJEUX DE FORMATION	176
4.3.4.	PROCESSUS D'INNOVATION TECHNOLOGIQUE	177
4.4	CONCLUSION	181
5	<u>CONCLUSION</u>	<u>182</u>
6	<u>REFERENCES</u>	<u>184</u>

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1. COUVERTURE DU PREMIER NUMERO DU WHOLE EARTH CATALOG, 1968, PREMIERE PUBLICATION DE LA VUE DE LA PLANETE TERRE DEPUIS L'ESPACE.	23
FIGURE 2. MACHINE A TRANSCRIRE LES RELEVES, SELON LES INDICATIONS D'ALBERTI, REALISE PAR PATRICK THEPOT, LABORATOIRE MHA EVT, 2000	25
FIGURE 3. EXEMPLE DE MODELE PARAMETRIQUE	36
FIGURE 4. EXEMPLE DE DEFINITION PARAMETRIQUE D'UN POINT SUR UNE SURFACE	39
FIGURE 5. EXEMPLE DE STRUCTURE DES DONNEES DANS L'ENVIRONNEMENT DE MODELISATION PARAMETRIQUE GRASSHOPPER.....	40
FIGURE 6. REPRESENTATION D'UNE CERCE, OUTIL UTILISE POUR DESSINER DES COURBES A PLUSIEURS CENTRES, ARCHIVES OF PEARSON SCOTT FORESMAN, DONATED TO THE WIKIMEDIA FOUNDATION	41
FIGURE 7. EXEMPLE D'OPTIMISATION TOPOLOGIQUE. TRAVAUX DE SEMINAIRE DE L'AUTEUR, ENSAG, 2017	45
FIGURE 8. EXEMPLE D'ETUDE SOLAIRE. TRAVAUX DE SEMINAIRE DE L'AUTEUR, ENSAG, 2017.....	47
FIGURE 9. EXEMPLE DE L-SYSTEM, REALISE AVEC GRASSHOPPER, EXTENSION RABBIT DE MORPHOCODE.....	54
FIGURE 10. PRINCIPE DE PARAMETRISATION DU VERRE POUR LA GENERATION ET L'OPTIMISATION A L'AIDE D'UN ALGORITHME GENETIQUE. A) ELEMENTS CONSTITUTIFS DU VERRE, TERMINOLOGIE DU VERRE ET DIMENSIONNEMENTS DU MODELE INAO. B) TRANSCRIPTION PARAMETRIQUE DU PROFIL DU VERRE, TRAVAUX DE L'AUTEUR, 2018.....	56
FIGURE 11. GENERATION D'UNE POPULATION DE VERRES A L'AIDE D'UN ALGORITHME GENETIQUE. TRAVAUX DE L'AUTEUR, 2018	57
FIGURE 12. INTERFACE DE L'OUTIL DE CONCEPTION EVOLUTIONNAIRE ÉCO-CONCEPTION GENERATIVE, PROJET ANR, EQUIPE DU LABORATOIRE MAP CNRS-MCC.....	58
FIGURE 13. MODELE PERCEPTRON, ACTIVATION DE LA SYNAPSE EN FONCTION DU RESULTAT DE LA SOMME PONDEREE DES VALEURS D'ENTREE.....	60
FIGURE 14. RESEAU DE NEURONES, PERCEPTRON MULTICOUCHES, ILLUSTRATION DE L'AUTEUR.....	61
FIGURE 15. ILLUSTRATION DU PROJET LAYEREXPLORER, INTERFACE DE PRESENTATION DE LA STRUCTURE DES CALQUES D'UN FICHIER RHINOCEROS (POINET ET AL. 2018).....	64
FIGURE 16. MISE EN PARALLELE DE 2 CARTOGRAPHIQUES DYNAMIQUES, OFFRANT UNE COMPREHENSION DES FLUX MATERIELS ET IMMATERIELS. IMAGE DU HAUT : CARTE DES VENTS, DONNEES METEOROLOGIQUES LIBRES, CAPTURE D'ECRAN DE LA PLATEFORME EARTH HTTPS://EARTH.NULLSCHOOL.NET . IMAGE DU BAS : CARTE DE LA POSITION EN TEMPS REEL DES AVIONS, DONNEES OUVERTES, CAPTURE D'ECRAN DE LA PLATEFORME PLANEFINDER HTTPS://PLANEFINDER.NET	80

FIGURE 17. PROJET VILLE VIVANTE, MONTRANT LE FLUX QUOTIDIEN DES DEPLACEMENTS AU COURT DE LA SEMAINE A L'AIDE DU RELEVÉ DES ACTIVITÉS CELLULAIRE, POUR LA VILLE DE GENEVE, RÉALISÉ PAR NEAR FUTURE LAB, LIFT ET INTERACTIVE THINGS, HTTPS://WWW.VILLEVIVANTE.CH/#POSTERS	82
FIGURE 18. GRAPHIQUE DE CORRELATION ENTRE LA CONSOMMATION DE MOZZARELLA PAR HABITANT AVEC LE NOMBRE DE DOCTORATS EN GENIE CIVIL, TIRÉ DE HTTPS://WWW.TYLERVIGEN.COM/SPURIOUS-CORRELATIONS , CONSULTÉ LE 26 FEVRIER 2020.	84
FIGURE 19. GEOLOCALISATION DES ACTIVITÉS TWITTER, TRAVAUX DE L'AUTEUR, ENSAG, 2015	85
FIGURE 20. PERFORMANCE GOOGLE MAPS HACKS, SIMON WECKERT, 2020, "99 SECOND HAND SMARTPHONES ARE TRANSPORTED IN A HANDCART TO GENERATE VIRTUAL TRAFFIC JAM IN GOOGLE MAPS. THROUGH THIS ACTIVITY, IT IS POSSIBLE TO TURN A GREEN STREET RED WHICH HAS AN IMPACT IN THE PHYSICAL WORLD BY NAVIGATING CARS ON ANOTHER ROUTE TO AVOID BEING STUCK IN TRAFFIC"	92
FIGURE 21. IDENTIFICATION DES ACTIVITÉS QUOTIDIENNES SUSCEPTIBLES DE PRODUIRE DES TRACES NUMÉRIQUES DANS NOS HABITATIONS, AU TRAVAIL, DANS LES COMMERCEs, DANS LES TRANSPORTS EN COMMUN, DANS L'ESPACE PUBLIC. ILLUSTRATION TIRÉE DE ANONYMISE YOURSELF, ELECTRONIC SELF-DEFENCE HANDBOOK.....	94
FIGURE 22. PROJET SMART CONCRET, INTÉGRATION D'UNE COUCHE D'ELECTRONIQUE DANS UNE DALLE DE BETON, DES CAPTEURS CAPACITIFS ACTIVENT UN SCENARIO LUMIERE AVEC L'IDENTIFICATION DE LA PRESENCE HUMAINE, TRAVAUX DE L'AUTEUR, PROJET RÉALISÉ EN COLLABORATION AVEC LE CEA, L'ÉCOLE D'ARCHITECTURE DE LYON, DE GRENOBLE, 2012.	95
FIGURE 23. ARBOR SCIENTIAE, RAYMOND LULLE, VERS 1295, SOURCE DE L'IMAGE DRUCK VON 1505 IN TOMKOWIAK: POPULÄRE ENZYKLOPÄDIEN	102
FIGURE 24. ILLUSTRATION D'UNE DATA VISUALISATION, SOUS FORME DE DIAGRAMME. REPRESENTATION DE LA RÉPARTITION DES ENSEIGNANTS DE L'ENSAG AU SEIN DES DIFFÉRENTES UNITÉS D'ENSEIGNEMENT EN FONCTION DE LEUR CHAMP DISCIPLINAIRE, ILLUSTRATION DE L'AUTEUR, 2017	103
FIGURE 25. VISUALISATION DE LA STRUCTURE D'UN FICHIER RHINOCEROS DANS LE CADRE D'UNE MODÉLISATION D'UN PAVILLON. LES BRANCHES DU GRAPHE REPRESENTENT DES CALQUES ET DES GROUPES DE CALQUE. (POINET ET AL. 2018).....	104
FIGURE 26. DATA PHYSICALISATION, REPRESENTANT LES NIVEAUX DE POLLUTION DU GRAND PARIS, AUTEURS JONAS AYZOZ ET SARAH SAULNIER DE PRAINGY, RÉALISÉ DANS LE CADRE D'UN ATELIER ORGANISÉ ET ANIMÉ PAR L'AUTEUR, L'ENSCI-LES ATELIERS, 2018.....	106
FIGURE 27. VARIANTE DE LA CARTE DU DR JOHN SNOW LOCALISANT LES CAS DE CHOLÉRA A LONDRES LORS DE L'ÉPIDÉMIE DE 1854.....	110
FIGURE 28. COMPOSITION DE TYPE <i>SMALL MULTIPLE</i> , ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES SUR LE TERRITOIRE ALLEMAND ENTRE LES ANNÉES 1881 ET 2019, IMAGE PRODUITE PAR LE JOURNAL ZEIT, HTTPS://WWW.ZEIT.DE/WISSEN/UMWELT/2019-12/KLIMAWANDEL-GLOBALE-ERWAERMUNG-WARMING-STRIPES-WOHNORT , CONSULTÉ EN MARS 2020	114

FIGURE 29. COMPOSITION DE TYPE <i>SMALL MULTIPLE</i> , INVENTAIRE DES TYPES D'ENTREE DANS LE CADRE D'UNE ETUDE SUR LES QUALITES ARCHITECTURALES DU QUARTIER DE LABITZKE, ZURICH. REALISATION AGENCE D'ARCHITECTURE HAHN+ZIMMERMANN, HTTP://HAHN-ZIMMERMANN.CH/PROJEKTE/VISUELLE-ANALYSE-LABITZKE-AREAL-ALTSTETTEN , CONSULTE EN MARS 2020	115
FIGURE 30. TRACES GPS, CARTE DU CAMPUS DE GRENOBLE. © JEREMY WOOD, 2017, AVEC LA PARTICIPATION DES ETUDIANTS DE L'ENSAG ET DE L'AUTEUR. REPRODUIT AVEC PERMISSION.....	118
FIGURE 31. VARIABLES VISUELLES DE LA GRAPHIQUE	122
FIGURE 32. PRINCIPES DE COMPOSITION DES NUANCIERS DE COULEURS EN FONCTION DES TYPES DE VALEUR ...	125
FIGURE 33. CARTOGRAMME DE LA POPULATION FRANÇAISE PAR REGION (GENERE AVEC TILESGRAMS), TRAVAUX DE L'AUTEUR, 2019.....	126
FIGURE 34. EXEMPLE DE CARTOGRAMME DE DORLING, POPULATION MONDIALE, REALISATION NICOLAS LAMBER, 2019, CONSULTE 19 FEVRIER 2020, HTTPS://NEOCARTO.HYPOTHESES.ORG/6201	127
FIGURE 35. CARTE DES COMMUNICATIONS RAPIDES ENTRE PARIS ET LE RESTE DE LA FRANCE. DRESSEE PAR E MARTIN ; E. CHEVAILLIER, DEL, 1882. SOURCE ; UNIVERSITY OF CHICAGO MAP COLLECTION.....	128
FIGURE 36. CARTE INTERACTIVE DU PATRIMOINE DE LA VILLE DE BARCELONE, REALISATION 300000KMS, CONSULTE LE 19 FEVRIER 2020, HTTP://BIGTIMEBCN.300000KMS.NET	129
FIGURE 37. CARTE DE GEOLOCALISATION LES PHOTOS DEPOSEES SUR FLIKR ET PICASA. © ERIC FISHER, 2010. BASE MAP © OPENSTREETMAP, CC-BY-SA.....	130
FIGURE 38. CARTE MONTRANT LE NOMBRE D'HOMMES AU SEIN DE L'ARMEE DE NAPOLEON LORS DE LA CAMPAGNE DE RUSSIE DE 1812, LEURS MOUVEMENTS, AINSI QUE LES TEMPERATURES RENCONTREES LORS DU RETOUR. LITHOGRAPHIE, 62 × 30 CM © CHARLES MINARD, 1869.	131
FIGURE 39. CARTE FIGURATIVE DES TONNAGES DE MARCHANDISES QUI ONT CIRCULE EN 1861 PAR VOIE D'EAU ET VOIE DE CHEMIN DE FER. © CHARLES-JOSEPH MINARD, 1861. REPRODUIT AVEC PERMISSION	133
FIGURE 40. CARTE DE TRAJETS A BARCELONE. REALISEE A PARTIR LA CONSTRUCTION ALEATOIRE DE 30 000 PARCOURS RELIANT 10 000 TWEET GEOLOCALISES ET CHOISIS ALEATOIREMENT. © ERIC FISHER, 2011. DATA FROM THE TWITTER STREAMING API. BASE MAP © OPENSTREETMAP, CC-BY-SA	134
FIGURE 41. CAPTURE ECRAN APPLICATION MAPBOX, APPLICATION DEVELOPEE PAR RYAN MCCULLOUGH, HTTP://RYANTM.IO/BUILDINGS/ , CONSULTE EN MARS 2020.....	136
FIGURE 42. EXEMPLE DE TRAITEMENT DE DONNEES URBAINES ISSUES D'OPENSTREETMAP ET IMPORTEES DANS GRASSHOPPER, ENSAG, SEMINAIRE DE MASTER, TRAVAUX DE L'AUTEUR, 2015.....	138
FIGURE 43. INVENTAIRE DES FORMATS DE DONNEES URBAINES	140
FIGURE 44. INVENTAIRE DES EXTENSIONS GRASSHOPPER POUR LE TRAITEMENT DES DONNEES URBAINES	141
FIGURE 45. EXTRAIT DU BREVET DE RON RESCH, "SELF-SUPPORTED STRUCTURAL UNIT HAVING A 3-DIMENSIONAL SURFACE", US PATENT, 197, ILLUSTRATION D'UN MOTIF DE PAVAGE DE SURFACE	148

FIGURE 46. EXTRAIT DU BREVET DE RON RESCH, "SELF-SUPPORTED STRUCTURAL UNIT HAVING A 3-DIMENSIONAL SURFACE", US PATENT, 1977, ILLUSTRATION DU PAVAGE D'UNE SURFACE EN FORME D'ŒUF	149
FIGURE 47. BREVET DE FRANÇOIS WILLEME SUR LE PROCEDE DE PHOTOSCULPTURE, US PATENT 43 822, 9 AOUT 1864	154
FIGURE 48. BREVET DE J.E. BLANTHER, SUR LE PROCEDE DE REALISATION DE CARTES EN 3 DIMENSIONS, US PATENT 473 901, 3 MAI 1892.....	155
FIGURE 49. BREVET DE O.J. MUNZ, PREMIER PROCEDE DE MATERIALIATION PHOTOSENSIBLE PAR COUCHE, US PATENT 2 775 768, 25 MAI 1951	156
FIGURE 50. ILLUSTRATION DU DISPOSITIF POUR REALISER UN MODELE DE PIECE INDUSTRIELLE, BREVET DEPOSE A L'INPI PAR ANDRE, LE MEHAUTTE ET DE WITTE.....	157
FIGURE 51. EXTRAIT D'UN FICHIER GCODE	159
FIGURE 52. DECOUPE AU FIL CHAUD D'UN VOUSOIR DANS UN BLOC DE MOUSSE, LES GRANDS ATELIERS, ENSAG, TRAVAUX DE L'AUTEUR, OCTOBRE 2019.....	161
FIGURE 53. PROCEDE DE FABRICATION ADDITIVE BATIPRINT, NANTES, SEPTEMBRE 2017	166
FIGURE 54. REALISATION DE STRUCTURES PAR STEREOTOMIE, DECOUPE ROBOTISEE DE VOUSOIRS, LES GRANDS ATELIERS, ENSAG ET ENSAL, TRAVAUX DE L'AUTEUR, JANVIER 2018	167
FIGURE 55. CYCLE MACHINE-MATIERE-MODELE	170
FIGURE 56. ARCHE FUNICULAIRE, CONSTRUCTION PAR STEREOTOMIE, LES GRANDS ATELIERS, ENSAG, TRAVAUX DE L'AUTEUR, OCTOBRE 2019.....	173
FIGURE 57. VUE D'UN RELEVÉ 3D DES BERGES DE SEINE, ENSAPVS, STUDIO YANN BLANCHI, AVRIL 2017 (IMAGE REPRODUITE AVEC LA PERMISSION DE L'AUTEUR)	176

1 INTRODUCTION

Nos travaux portent une réflexion sur les outils et méthodes de la conception numérique de l'architecture. Nous nous intéressons d'une part aux modalités d'instrumentation et d'autre part à la théorie de la conception numérique de l'architecture.

L'originalité de notre proposition repose sur la place que nous accordons au *continuum informationnel*. Celui-ci inscrit un flux continu d'informations allant des phases de conception aux phases de fabrication et en passant par une instrumentation des matériaux et de la ville. Nous proposons de caractériser ce *flux informationnel* et nous le considérons comme une spécificité des modalités contemporaines de la conception numérique.

Si les premiers travaux de recherche du candidat ont abouti à la caractérisation d'un *continuum conception-fabrication*, nous proposons de prolonger ce regard par l'identification d'un *continuum informationnel* plus large. Celui-ci englobe les précédentes problématiques de *modélisation intégrée* allant jusqu'à la fabrication du dispositif architectural, et propose d'élargir le questionnement en considérant des formes nouvelles de visualisation que nous appelons *néo-cartographies*. Ces recherches prennent place dans un contexte de généralisation des technologies numériques, de production de méga-données et d'instrumentations de l'espace et des matériaux.

Cette mise en perspective nous permet d'identifier des problématiques scientifiques qui viennent constituer le programme de recherche du candidat.

1.1 METHODOLOGIE DE RECHERCHE : UNE RECHERCHE FINALISEE

1.1.1. *Entre dynamique de connaissance et questions de société*

Une recherche finalisée

Le type de recherche que nous proposons de conduire est habituellement qualifié de *recherche finalisée* (Conseil stratégique de la recherche 2015), elle prend corps avec des questions de société. Elle se constitue à partir de connaissances à la fois théoriques et pratiques, en ce sens elle est exploratoire, tout en envisageant ses applications et ses

usages par les acteurs de la société. Ainsi nos travaux contribuent à caractériser et à concevoir des outils et des méthodes adaptées, ils visent à favoriser l'appropriations créatives des techniques.

Nos productions pourront être d'ordre varié en allant de la constitution de connaissances nouvelles, à la réalisation de solutions techniques et en passant par l'expertise en appui aux politiques publiques ou aux politiques de formation.

Méthodologie : D'une contextualisation historique et théorique à un savoir-faire pratique : une approche expérimentale

La méthodologie de recherche que nous proposons de développer se construit autour d'expérimentations. Celles-ci passent par une contextualisation historique et une délimitation théorique. Nous précisons que cette perspective historique n'est pas un travail d'historien mais vise plutôt la constitution d'un socle culturel. La connaissance ainsi organisée et le paysage théorique construit peuvent alors donner lieu à des expérimentations dont les évaluations alimentent en retour les hypothèses et questionnements initiaux. Ces expérimentations prennent la forme de développements informatiques. Ils sont des outils de modélisation, ou de représentation, ils peuvent également être utilisés pour fabriquer et piloter des robots. Ces outils peuvent conduire à la réalisation d'objets intermédiaires de médiation ou être utilisés pour réaliser des dispositifs. Nous regardons comment ces outils se construisent et se réalisent, comment ils sont utilisés.

Caractérisation des postures de conception

Les instrumentations numériques des processus de conception créative ont progressivement modifié les mécanismes cognitifs. Les récentes approches paramétriques et génératives s'adossent à des descriptions explicites des processus de prise de forme. Ces morphogènes sont procédurales, elles passent par la définition d'un processus génératif. Elles sont univoques, car elles s'appuient sur une description complète et précise des conditions. Elles caractérisent des démarches dans lesquelles le concepteur ne travaille pas à la définition d'une solution unique, mais plutôt à la constitution d'une famille de solutions. Le regard est systémique, il offre un nouveau niveau de lecture à travers une exploration d'un espace élargi de solutions. Ces

outillages de la conception ont renforcé à une posture que nous avons qualifiée de *méta-conception* (Marin et Bignon 2013).

Nos outils de conception nous appaillent le monde, la caractérisation de leurs usages et la spécification des méthodes qui leurs sont associées, nous semblent être nécessaires pour contribuer à la mise au point de nouvelles techniques et de nouveaux outils. Cette explicitation et cette identification des postures de conception, nous paraît être un prérequis indispensable à la bonne appropriation des techniques numériques.

1.2 ORGANISATION DU MEMOIRE

1.2.1. *Modéliser, visualiser, fabriquer*

Pour porter un regard sur le *flux informationnel* en conception architecturale et pour délimiter la géographie de nos travaux, nous proposons de structurer notre exposé autour de 3 volets. Pour chacun d'eux nous présentons des éléments de contexte, qui nous servent d'appuis théoriques, et nous organisons une connaissance de manière originale pour identifier des questions ou constituer une matière de recherche.

Le volet 1, intitulé *modéliser*, porte sur l'instrumentation numérique de la conception et spécifiquement sur la modélisation géométrique et les opérations de simulation. Il cherche tout d'abord à donner une épaisseur historique et culturelle à ces approches, puis il propose une définition des méthodes paramétriques et génératives. Nous verrons alors un basculement des procédés, qui passent d'une logique d'interopérabilité entre les outils, à des démarches qui reposent sur la définition et la mise en œuvre de flux informationnels. Les limites des outils paramétriques actuels sont identifiées.

Le volet 2 porte le titre *visualiser*. Ce sont les modalités de représentation et de visualisation de l'information qui sont considérées. Dans cette perspective nous regardons les *néo-cartographies* qui prennent formes à l'aide des techniques numériques et qui contribuent à façonner une compréhension de la ville en tant que métabolisme. Ces démarches prennent place dans le contexte des méga-données et des villes intelligentes, celles-ci portent en elles des espoirs et des risques. Un dernier chapitre identifie les principes et techniques de la visualisation d'information en partant de la description de quelques projets remarquables.

Le troisième volet du mémoire est nommé *fabriquer*. Nous examinons ici les questions de fabrication numérique. Nous révélons tout d'abord la manière avec laquelle les

cultures numériques et matérielles s'imbriquent pour favoriser un rapport sensible à la technique et une meilleure appropriation des outils. Nous portons un regard sur l'histoire récente de ces techniques pour finalement identifier un renouveau de la robotique en architecture, celui-ci donne naissance à des procédés de *fabrication adaptative* et de *construction cyber-physique*. Les enjeux et les opportunités de la robotique créative peuvent ainsi être considérés à travers l'analyse du triptyque *machine, matière, modèle*.

Ces trois volets présentent une forme d'autonomie, ils peuvent être considérés de manière indépendante. Cependant leur assemblage contribue à spécifier la notion de *continuum informationnel* qui se déclinent à différentes échelles.

1.2.2. Le flux informationnel : un parcours des échelles

La généralisation des technologies numériques dans tous les champs de la connaissance participe à une forme de digitalisation du réel. C'est principalement cette généralisation à toutes les échelles qui conduit à l'émergence de ce que nous appelons un *continuum informationnel*. Notre regard n'est pas limité à une échelle d'application (l'objet, l'édifice ou la ville), mais s'intéresse bien davantage au flux d'informations qui peut se constituer à toutes ces échelles et qui peut adresser des domaines variés d'application : des processus de conception de l'édifice ou de la ville, à la fabrication robotisée, jusqu'à la mise au point des dispositifs cyber-physiques. Le lecteur comprendra ainsi que ce qui caractérise notre approche repose principalement sur le fait de considérer ce continuum à toutes les échelles et pour différents domaines d'application. C'est le flux de données et la place de l'information dans les processus de conception et de fabrication qui sont au centre de notre attention.

Ce premier chapitre porte un regard sur l'instrumentation numérique de la conception architecturale et urbaine, en s'intéressant plus particulièrement à l'activité de modélisation. Nous souhaitons donner à ces pratiques une épaisseur culturelle et dans un premier temps nous repositionnons la naissance des cultures numériques dans une histoire longue des sciences et des techniques. Nous envisageons trois thèmes fondateurs. L'un établit des relations entre les premières formes d'automatisation et les modes de symbolisation des connaissances. L'autre considère le moment cybernétique et la théorie de l'information. Le dernier replace l'informatique dans un système sociotechnique qui se constitue avec la contre-culture nord-américaine et la cyberculture. Ce système engendrera la société de l'information avec la généralisation des technologies numériques que nous connaissons aujourd'hui.

Dans un second chapitre, nous examinons l'histoire de la conception numérique de l'architecture, en rappelant que la pensée numérique de l'architecture n'est pas récente et que les approches proto-paramétriques émergent dès l'antiquité. Nous nous intéressons aux premières expérimentations qui revendiquent des relations avec les modes d'instrumentation computationnelle et les premiers ordinateurs. Puis nous nous arrêtons sur la période charnière de la fin du XX^e siècle. Les travaux de l'avant-garde de cette époque annoncent et fondent les pratiques contemporaines.

Dans le troisième chapitre, nous approfondissons la notion de modélisation paramétrique, en délimitant la terme *modèle* ainsi que les principes *paramétriques* et *associatifs*. Nous verrons que ces modalités d'instrumentation s'appliquent à l'échelle urbaine et qu'elles sont associées à une description mathématisée. Nous évoquons la place et les caractéristiques des méthodologies BIM¹ dans ce processus.

Dans un quatrième chapitre, nous complétons notre regard avec la prise en compte des enjeux de performance et l'intégration des méthodes de *simulation*. Nous envisageons ces démarches dans une perspective de conception créative et nous identifions le basculement d'une logique d'interopérabilité vers une approche reposant sur la définition d'un *flux informationnel continu*.

Dans notre dernier chapitre, nous traitons des approches *génératives* et de l'usage de

¹ Building Information Model ou Building Information Modeling, habituellement traduit par l'expression maquette numérique du bâtiment.

l'intelligence artificielle (IA) au sein des processus de conception. Nous revenons sur la naissance de l'IA, sur les premières expérimentations dans le domaine de l'architecture, et sur le caractère inductif de ces algorithmes. Finalement nous renforçons notre étude du flux informationnel à travers l'identification des limites et prolongements des outils paramétriques, l'appréhension de la notion de *continuité* et *discontinuité numériques* et l'importance d'une posture de *méta-conception*.

1.1 NAISSANCE DES CULTURES NUMERIQUES

2.1.1. *Naissance de l'automatisme du calcul*

De la clepsydre à la carte perforée

Dans son séminaire doctoral sur la *Naissance de la technologie* (1970), Gilbert Simondon (1924-1989) développe l'idée que la technologie est déjà présente dans l'invention d'une *machine simple*. Celle-ci peut prendre la forme d'un outil, d'une roue, ou d'un faisceau de cordes. Ces éléments constituent des médiums entre l'opérateur et la matière naturelle, ils agissent les uns sur les autres dans une chaîne d'opérations. Dans une machine plus complexe, cet enchaînement des actions est rendu possible par l'alternance du rôle des éléments, passant successivement d'outil à opérateur, et constituant ainsi une séquence. Ce chainage renvoie à une forme d'automatisme (Simondon 2014). Ainsi les questions d'automatisation, de mécanisation ou de régulation jalonnent l'histoire de l'humanité. Philippe Breton le montre dans son histoire de l'informatique (Breton 1990). De la clepsydre ou des horloges à eau, premiers instruments à mesurer le temps, aux métiers à tisser de Jacquard, première forme d'automatisation de la production, en passant par les automates à figure humaine ou animale, avec le *flûteur automate* ou le *canard digérateur* de Jacques de Vaucanson (1709-1792) par exemple, l'histoire des techniques d'automatisation implique une maîtrise du temps et une maîtrise du mouvement. Un principe de régulation du mouvement peut être rendu possible par la pression hydraulique, le mouvement d'un pendule ou la pression d'un ressort. Une autre lignée de machines ordonne le mouvement à l'aide d'un « arbre à cames » dont l'agencement des différentes pièces permet de contrôler le mouvement de l'ensemble du système. Une illustration connue de ce dispositif se retrouve dans la boîte à musique constituée d'un « cylindre à

comes », celui-ci est hérissé de picots qui permettent la vibration de lames métalliques et ainsi la production de notes de musique. Le changement du cylindre à comes reconfigure la machine et permet de jouer une autre mélodie. Le dispositif à comes, plus tard remplacé par les « cartons perforés », renvoie à un principe de programmation et d'automatisme de la machine. Cette programmation se constitue avec un encodage binaire des mouvements (Breton 1990). Les réalisations les plus récentes prennent leurs racines dans ces travaux.

L'encodage du raisonnement

Parallèlement à cette culture matérielle, les techniques cognitives se constituent avec l'apparition des mathématiques, de l'alphabet et des écritures. Au VIII^e siècle le mot *algorithme* apparaît. Il correspond au patronyme latinisé d'Al-Khwarizmi, mathématicien, géographe, astrologue et astronome, né en Perse dans les années 780. Un autre personnage remarquable est Raymond Lulle (1235-1315). Il est philosophe, logicien et théologien, né en Catalogne, il est considéré comme un pionnier de la philosophie du numérique (Weibel 2018). Il illustre une tentative d'algèbrisation du langage et de la pensée en utilisant les méthodes logiques et la symbolique linguistique pour formaliser les raisonnements. Il consacra une partie de son œuvre à la réalisation d'une « machine logique », instrument dénommé « Ars magna », qui rassemblait un ensemble de prédicats, organisés à l'aide de diagrammes et de figures géométriques, et installés sur des cadrans mobiles. La méthode était une tentative d'utilisation des moyens logiques pour conduire des raisonnements et démontrer la véracité des postulats. L'écossais John Napier (1550-1617), théologien, physicien, astronome et mathématicien, met au point un abaque, facilitant les opérations de multiplication et de division, appelé « bâton de Napier ». La première machine à calculer est inventée par l'allemand Wilhelm Schickard (1592-1635), elle porte le nom « d'horloge calculante ». Blaise Pascal (1623-1662) conçoit la « Pascaline » pour faciliter les fastidieux calculs de son père collecteur des impôts. Le philosophe et mathématicien allemand, Gottfried von Leibniz (1646-1716), construit une machine plus perfectionnée qui effectuait les quatre opérations. Plus tard, Charles Babbage (1791-1871), mathématicien et inventeur britannique, travaille également à la mise au point de machines composées de plusieurs manivelles, de pignons, de roues d'engrenages, dénommées « machine à différence » et « machine analytique ». Lady Lovelace (1815-

1852), née Ada Byron, jeune fille douée en mathématique, compagne intellectuelle et disciple de Charles Babbage, travaille à la documentation et à l'amélioration de ces machines. Elle aurait largement contribué à l'écriture d'un algorithme destiné à la machine de Babbage, et dont le formalisme se rapproche d'un véritable programme informatique (Gleick 2015). Ces personnages illustrent les tentatives pour établir des relations entre le monde matériel et le monde de l'abstraction pure.

Cette ligné d'inventions peut se prolonger jusqu'à l'époque moderne. Avec les mathématiques et le télégraphe, l'idée de transfert de sens d'un niveau symbolique à un autre se propage, le principe de codage devient familier. Au XX^e siècle l'idée que le langage du raisonnement pouvait être encodé se concrétise.

Parallèlement, la naissance des états modernes est associée à des besoins d'inventaires, de recensements ou de productions de statistiques. Les périodes des deux guerres mondiales et de la guerre froide sont associées à des efforts en matière de recherche militaro-scientifique, avec la mise au point de grands calculateurs capables de tracer à la fois, des tableaux de tirs de l'artillerie, des tables de positions de la lune, ou de traiter statistiquement de grandes masses de nombres (Llach 2015). L'automatisme, le calcul et l'information se trouvent mêlés pour donner naissance à une nouvelle lignée de machines basée sur une maîtrise du temps, du mouvement et des mécanismes de raisonnement. Les principes de régulation et de programmation se rencontrent pour façonner l'automatisation. le terme *informatique* est créé² par la réunion des termes *information* et *automatique* (Breton 1990).

2.1.2. La théorie de l'information

La théorie de l'information prend place dans le contexte du développement des communications à distance, avec le télégraphe aérien³, le cryptage des messages ou le télégraphe électrique⁴. Les signaux électriques deviennent le support du message. En 1948, Claude Shannon (1916-2001) publie un article intitulé *A Mathematical Theory of Communication*. Cette théorie ne s'intéresse pas au sens ni à la finalité de la communication, mais porte sur le transfert physique d'une information entre un émetteur et un récepteur. Elle fournit « une mesure de la quantité d'information

² Le terme informatique est proposé par Philippe Dreyfus en 1962

³ Installé en 1794 par Claude Chappe (1763-1805)

⁴ Inventé en 1832 par Samuel F.B. Morse (1791-1872), amélioré par Thomas Edison (1847-1931), puis par Emile Baudot (1845-1903)

contenue dans le choix élémentaire de deux possibilités » et elle intègre une notion d'incertitude. L'encodage est réalisé de façon binaire, à l'aide de 0 et de 1. Ce formalisme révèle toutes les capacités de la logique booléenne⁵. L'information est à la fois une mesure et un symbole, l'informatique, en tant que traitement automatique, s'intéresse principalement au second sens (symbole numérique binaire). L'information fait référence aux modalités d'encodage et de traitement des communications et des raisonnements, elle permet aux machines d'automatiser les calculs.

C'est notamment John von Neumann (1903-1957) qui établira les bases de la structure des grands calculateurs, elle est organisée de quatre parties : L'unité arithmétique et logique, qui effectue les opérations ; l'unité de contrôle, qui opère le séquençage des opérations ; la mémoire, qui contient les données et le programme ; les dispositifs d'entrée et de sortie. Ce modèle donnera à partir des années 1960 naissance à l'informatique commerciale, aux premières utilisations de l'ordinateur à grande échelle, puis aux ordinateurs personnels et à la mise en réseau que nous connaissons aujourd'hui. John von Neumann, en tant que mathématicien et logicien, établira par ailleurs une « théorie des jeux », appliquée à différentes disciplines et proposant un formalisme mathématique à différents problèmes de stratégie. Alan Turing (1912-1954) est célèbre pour avoir démontré conceptuellement la possibilité d'une « machine universelle », capable de reproduire l'exécution de toutes autres machines. La machine n'est pas dédiée mais programmable, et le programme n'est pas stocké sur une carte perforée prédéterminée, mais il est enregistré en mémoire, la machine a la possibilité de lire et d'écrire cette table d'actions. Par ailleurs, Alan Turing est fasciné par les possibilités de reproduction de l'intelligence au sein d'une machine, et en 1950 il publie un article intitulé *Computing machinery and intelligence* (Turing 1950). Il propose un jeu, au cours duquel l'objectif est de déterminer si l'interlocuteur est une machine ou un être humain. Il questionne la notion d'intelligence, il montre le potentiel de l'algèbre comme support des raisonnements. La manipulation formelle des concepts est remplacée par des opérations de nombres, les opérations conceptuelles sont ainsi traduites en opérations numériques. Avec ses travaux Alan Turing initie le domaine de l'intelligence artificielle.

⁵ George Bool (1815-1864), logicien et mathématicien, fondateur de la logique moderne.

2.1.3. *La cybernétique*

Logique, algèbre, récursivité, itération, géométrie des réseaux, topologie d'un côté, régulation, rétroaction, comportement, contrôle, cognition, machines et animaux artificiels de l'autre, forment autant de thématiques qui animent des communautés scientifiques et qui vont constituer le vaste domaine des sciences et techniques de l'information et de la communication. C'est dans ce contexte fertile et transdisciplinaire que le terme cybernétique voit le jour. Il est proposé par Norbert Wiener (1894-1964) à l'occasion de la parution en 1948 de son ouvrage *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine* (Wiener 2014). La méthode s'intéresse à la compréhension des phénomènes, à la fois naturels et artificiels, et passe par l'étude des processus de communication et de contrôle chez les êtres vivants et les machines. Pour Wiener, le mécanisme de rétroaction⁶ représente le fondement de tout comportement organisé et intelligent. Il sert à décrire, dans un environnement en transformation, un dispositif informationnel qui assure à un phénomène un état d'équilibre ou le maintien de son action vers un but. La boucle de rétroaction, ou d'autorégulation, représente l'agent de stabilité d'un système. Des parallèles sont construits entre l'homme, l'animal, les phénomènes et la machine. Le traitement de l'information s'inscrit dans un cycle perception-décision-action.

Les interrelations, le réseau et l'échange d'informations deviennent les éléments constitutifs des systèmes en équilibre. L'approche cybernétique et la théorie de l'information donnent au concept d'information une dimension matérielle en le considérant comme un mécanisme propre à organiser la matière et à compenser les phénomènes d'entropie. L'information intervient dans la genèse des formes, « elle est la variabilité des formes » (Simondon 2012). Ces définitions ont contribué à considérer les mécanismes de transmission et d'encodage en tant que support des interactions au sein des systèmes vivants et artificiels (Triclot, 2008).

Ainsi, après les machines constituées de roues, poulies et arbres à cames pour engendrer du mouvement et de l'énergie, apparaissent des machines électroniques, faites de transistors et de circuits intégrés, dans lesquelles le mouvement s'opère à l'échelle de la matière et entre les électrons. Ces machines sont programmées et reprogrammables jusqu'à présenter des formes d'autonomie et d'indétermination à travers les boucles et

⁶ traduction du terme anglais *feed-back*

mécanismes récursifs sur lesquelles elles s'appuient. Un néo-mécanisme apparaît avec cette lignée de machines, avec la combinaison de la cybernétique et de l'informatique. La compréhension du vivant et la distinction entre les systèmes naturels et artificiels, sont renouvelées (Chazal 2013). Nous prolongerons cette question dans les paragraphes suivant lorsque nous considérons la constitution d'une *écologie de l'artificiel*.

2.1.4. *Le Whole Earth Catalog : de la contre-culture à la cyberculture*

Parallèlement à ces développements scientifiques, un mouvement contribue à forger les cultures numériques, il est constitué par les communautés contre-culturelles américaines (Turner 2013). Durant les années 1960-1970, de Sausalito à Drop City, elles seront nombreuses à s'installer dans l'ouest américain pour forger dans un esprit libertaire, des espaces d'expérimentation remettant en question les modes de vie, les systèmes productifs, proposant de nouvelles relations à la nature, explorant de nouveaux modes constructifs, remettant en question les systèmes hiérarchiques et l'organisation du pouvoir. Steve Baer (1938-) et son *Dome Cookbook* ou Ant Farm avec *l'Inflatocookbook* constituent une littérature de choix pour ces groupes de marginaux vivant en autonomie et convertis au *Do-It-Yourself* (Zardini et al. 2007; Maniaque Benton 2014).

Au cœur de cet activisme, une autre publication se révèle un vecteur essentiel des cultures numériques. Il s'agit du *Whole Earth Catalog* (Figure 1), publié par Stewart Brand durant cette même période (Figure 1). La publication prend la forme d'une encyclopédie de matériaux, un inventaire d'outils, une revue de littérature, un catalogue de vente par correspondance, un recueil de messages et de conseils. La revue est organisée en 9 chapitres dont les titres sont révélateurs des préoccupations : « Understanding Whole Systems », « Land Use », « Shelter », « Industry », « Craft », « Community », « Nomadics », « Communications », « Learning ». Au fil des numéros, et pour n'en citer que quelques-uns, Richard Buckminster Fuller (1895-1983), Herbert Simon (1916-2001), Frei Otto (1925-2015), Victor Papanek (1923-1998), Norbert Wiener (1894-1964) ou encore Nicholas Negroponte (1943-), prennent une place centrale. Les théories issues de la cybernétique croisent les propositions de Buckminster Fuller sur les systèmes dynamiques, la géométrie des cristaux et les formes fluides et organiques des systèmes naturels. Ils se combinent avec les diagrammes et les arborescences de la théorie de l'information et de la cybernétique

(Maniaque-Benton 2016). La publication est propice à stimuler les collaborations entre les représentants de plusieurs disciplines. Le partage d'information et l'esprit collaboratif font des techniques de communication un moyen de la construction communautaire.

Quatre groupes sociaux se croisent : les scientifiques et les technophiles, les scènes artistiques de New York et San Francisco, les communautés psychédéliques et les communautés intentionnelles ou alternatives. Ainsi, au fil du temps, les partisans des technologies de pointe et ceux porteurs d'une philosophie orientale ou d'une théorie sociale communaliste, finissent par réunir les conditions culturelles pour faire de l'ordinateur et des réseaux informatiques des outils de libération. A travers ce dispositif sociotechnique, la perspective d'une société décentralisée, égalitaire, harmonieuse et libre, recueille tous les espoirs et toutes les attentions. C'est sur ce terreau que le développement de l'informatique personnel trouve ses racines.

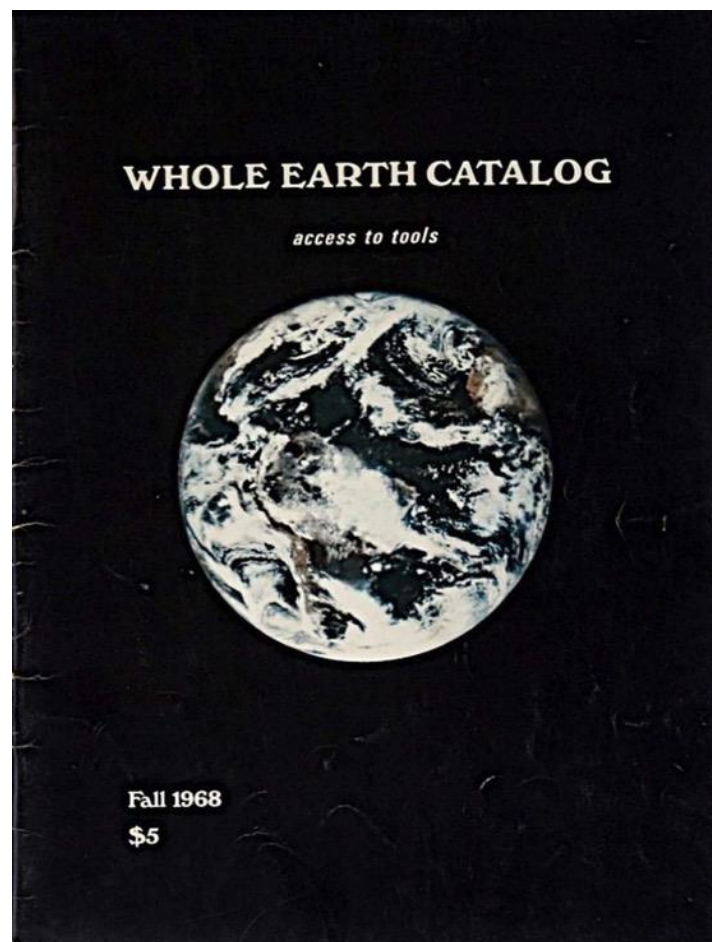


Figure 1. Couverture du premier numéro du Whole Earth Catalog, 1968, première publication de la vue de la planète terre depuis l'espace.

2.2 BREVE HISTOIRE DE LA CONCEPTION NUMERIQUE DE L'ARCHITECTURE

Les acteurs de l'architecture ne sont pas exclus de ce mouvement d'engouement pour les technologies de l'information. Ici nous considérons l'ordinateur comme outil de la conception et nous regardons comment ce mode d'instrumentation numérique impacte le discours et les préoccupations des architectes. Nous portons un regard historique sur ces travaux, mais nous précisons que ces paragraphes n'ont pas pour objectif une identification exhaustive, mais qu'ils visent plutôt à identifier quelques moments remarquables.

2.2.1. *La pensée proto-paramétrique*

L'usage de l'encodage numérique, du nombre et de la mesure, pour décrire des artefacts construits, trouvent des origines lointaines. Dans l'histoire de l'art et des techniques, les compositions géométriques gouvernées par le nombre d'or rendent compte d'une forme de pensée proto-paramétrique. Hersey (Hersey et Freedman 1992) et Park (Park 2008), ont montré comment mathématiser les villas de Palladio ou comment les entablements ioniques se décrivent à l'aide d'une succession d'instructions récursives. La description et la construction d'une colonne classique s'appuient sur une séquence récursive d'opérations de divisions dont les valeurs sont fonctions d'un paramètre unique défini par le diamètre de la colonne (Carpo 2013b). Ces approches s'appuient sur des logiques de séquençage.

Carpo explique ces pratiques par les contraintes de reproduction que les géographes et les architectes de l'antiquité ou de la renaissance rencontraient (Carpo 2011). Il apparaît plus facile de transmettre une suite de coordonnées, accompagnée d'une séquence d'opérations, pour exécuter le dessin du plan ou de la carte, que de réaliser des travaux de reproductions des dessins qui conserveraient difficilement les mesures originales. C'est ce que Claude Ptolémée (100-168) réalisera avec son traité de géographie, intitulé *Manuel pour dessiner une carte du monde*, paru vers 150, et considéré comme l'un des premiers atlas de la « totalité du monde connu ». Il prend la forme de tables de coordonnées accompagnées d'une méthode pour dessiner le monde habité « à la demande ». C'est également ce que Alberti (1404-1472) réalise avec sa publication *Descriptio urbis Romae*, parue dans les années 1440. Alberti décrit un système de coordonnées polaires et explique comment dessiner le plan à partir de la liste des coordonnées rassemblées dans l'ouvrage (Queysanne 2002). Cette machine à transcrire

les relevés a été reconstituée par Patrick Thépot et la Figure 2 en donne une illustration en montrant le redessin du plan de Rome à partir des indications d'Alberti. Une transposition contemporaine de cette machine a récemment été réalisée. Celle-ci est constituée par la mise en algorithme des séquences d'opérations énoncées par Alberti et par la lecture d'un fichier reprenant la table du *codex chigi* publié à l'époque.

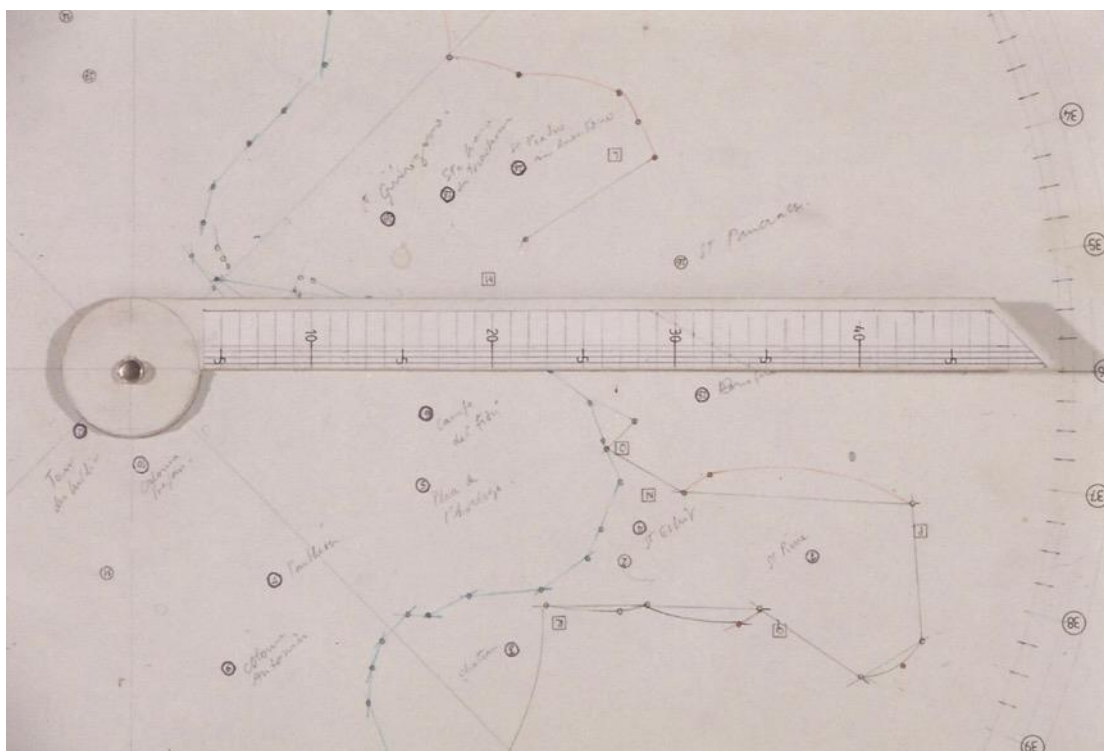


Figure 2. Machine à transcrire les relevés, selon les indications d'Alberti, réalisé par Patrick Thépot, laboratoire MHAevt, 2000

Carpo suggère la parenté entre ces techniques de cartographie « à la demande » et les « affichages dynamiques » et personnalisés des néo-cartographies consultables aujourd'hui à l'aide de nos périphériques électroniques. Ces architectures de la renaissance révèlent des pensées et des processus proto-paramétriques de conception et de fabrication. Leurs modes de description et de notation sont étroitement associés aux conditions de construction de l'époque qui les a vu naître, ils facilitent des mises en œuvre sur chantier, impliquant les outils du tailleur de pierre. Mais ils permettent également d'envisager ces archétypes comme des instances constituant des familles d'objets déclinables et que Carpo rapproche de la notion d'*objectile* formulée par Deleuze à la fin des années 90 (Deleuze 1988). Avec le principe d'*objectile*, les objets conçus et construits, s'inscrivent dans une forme de continuum, ils se constituent par la

variation continue de leurs paramètres, et ils préfigurent les logiques de personnalisation de masse et « d'architecture non standard⁷ » qui émergent à la fin des années 90 avec les travaux de Bernard Cache (Cache 1997) ou de Greg Lynn (Lynn 1999; 2004) pour n'en citer que deux. Ce continuum numérique conception-fabrication, constitue un principe de conception intégrée, rapprochant la modélisation et la fabrication en les intégrant dans un flux informationnel. Les modélisations intègrent les contraintes de fabrication, puis permettent la génération des programmes de commande des machines. Ces recherches deviendront progressivement capitales et constituent aujourd'hui des domaines de pointe. Elles questionnent les processus de fabrication, elles explorent des solutions constructives, elles redéfinissent les jeux d'acteurs, elles renouvellent les processus créatifs en rapprochant culture matérielle et culture numérique. Nous reviendrons sur ces relations à la fabrication dans le chapitre intitulé *Fabriquer*.

2.2.2. *Architettura parametrica*

Dans les années 1942, Luigi Moretti (1907-1973), accompagné du mathématicien Bruno de Finetti (1906-1985), explorent l'usage des fonctions paramétriques pour la conception de formes construites. En 1960 une exposition de leurs travaux, présentée à l'occasion de la 12^{ème} Triennale de Milan, marque l'apparition du terme *Architettura Parametrica*⁸ (Wit 2017). Moretti définit l'architecture paramétrique comme l'étude d'un système architectural déterminé par les relations entre les dimensions en fonctions de paramètres. Il considère l'architecture comme une instance particulière dans un espace de solutions définies par l'ensemble des paramètres mobilisés. Il fait un usage nouveau des techniques informatiques, mathématiques et statistiques en intégrant des logiques de variations. Il applique notamment cette approche à la conception de stades sportifs pour optimiser la vue des spectateurs. Avec cette volonté de renforcer une nouvelle méthode de conception, Moretti construit des collaborations qui donnent naissance, en 1957, à *l'Istituto per la Ricerca Matematica e operativa in Urbanistica* (IRMOU) (Bottazzi 2018). Cette exploration des techniques computationnelles est appliquée à la distribution des chambres dans un complexe hôtelier, à la construction des cartes scolaires, à l'optimisation de la circulation routière ou encore à la

⁷ Nous définirons plus précisément cette notion d'architecture non standard au paragraphe 2.6.2

⁸ Traduction d'architecture paramétrique

planification urbaine. Moretti voit dans l'usage des techniques informatiques et mathématiques un moyen d'objectivation et de formalisation d'intentions.

2.2.3. Naissance de l'interactivité

Simultanément dans les laboratoires nord-américains, les premières recherches relatives à la mise au point de machines destinées à assister la conception se mettent en place. Le premier ordinateur équipé d'une interface de visualisation, nommé *Whirlwind*, voit le jour en 1951. Le projet CAD, acronyme de *Computer-Aided Design*, se développe de 1959 à 1970. Ces recherches sont conduites au sein de laboratoires d'ingénierie mécanique ou d'électronique, elles sont rendues possibles par des programmes de financement proposés par l'armée, et trouvent des applications dans des domaines militaires ou dans les industries automobiles et aéronautiques (Correia et Guerreiro 2019; Llach 2015). En France Pierre Bézier et Paul de Casteljaou, respectivement ingénieur chez Renault et Citroën, proposent des solutions de notation paramétrique des formes libres et continues (Townsend 2014). En 1963, Ivan Sutherland soutient sa thèse en présentant le projet *Sketchpad*, première interface de dessin en temps réel et qui préfigure nos environnements actuels de modélisation et de visualisation en ayant défini certains des concepts fondateurs de l'informatique, avec par exemple le fenestrage, les fonctionnalités de zoom ou la programmation par contraintes (Correia et Guerreiro 2019).

En 1968, Nicholas Negroponte et Leon Groisser fondent *l'Architecture Machine Group* (AMG) au *Massachusetts Institute of Technology* de Boston (MIT). Ce groupe de recherche applique ces nouveaux modes d'instrumentation à la conception architecturale. Ils envisagent le potentiel des outils informatiques, d'une part pour assister les processus de conception, en intégrant les progrès réalisés en sciences de la conception, avec l'émergence de l'intelligence artificielle, ou en envisageant des processus participatifs impliquant les usagers, et d'autre part en considérant l'ordinateur comme un moyen de reconfiguration de l'espace physique construit. Capacités de calcul et de simulation, concepts issus de la cybernétique, interfaces homme-machine, dispositifs d'interaction entre l'homme et les systèmes électroniques, ou modalités de transformation de l'espace bâti, sont au centre de ces recherches (Negroponte 1975; Halpern 2017). Les premières propositions en matière d'intelligence artificielle sont expérimentées avec la mise en œuvre de réseaux de

neurones pour reconfigurer l'espace bâti. L'environnement urbain est envisagé comme un organisme en évolution capable de réagir aux comportements de l'habitant. Le projet *Aspen Movie Map*, propose un dispositif immersif de navigation dans un environnement urbain, *URBAN 2* et *5* illustrent l'application des systèmes de visualisation et d'interaction avec des modélisations en trois dimensions de la ville. Yona Friedman (1923-2020) travaille sur le *Flatwriter*, système de configuration par les habitants de l'habitat (Friedman 1971).

Ces travaux résonnent au sein d'une communauté d'architectes et de chercheurs, établie en Amérique du nord ou en Europe, elle envisage l'usage de l'ordinateur et des techniques de communication appliqués à la conception architecturale et urbaine. William Mitchell (1944-2010) en est une figure de proue et son ouvrage *Computer-Aided Architectural Design*, paru en 1977, constitue, à l'époque, un ouvrage de référence sur l'utilisation des outils de conception assistée par ordinateur (W. J. Mitchell 1977). Nous laissons ici les années soixante-dix pour nous rapprocher du tournant de la fin du XX^e siècle.

2.2.4. L'architecture numérique de la fin du XX^e siècle

Greg Lynn a conduit, autour des années 2013, au Centre Canadien d'Architecture (CCA), un travail qui cherchait à comprendre « quand la technologie (numérique) a-t-elle commencé à transformer le processus de création et le travail de design conceptuel des architectes » (Lynn 2017). Il a identifié 25 projets, réalisés sur la période comprise entre 1980 et 2000, et il les a présentés à l'occasion de 3 expositions intitulées respectivement « archéologie du numérique », « environnements virtuels, objets interactifs », « complexité et convention ». La caractérisation des postures des architectes exposés à l'occasion de ces rencontres est regroupée en 4 catégories que nous reprenons dans les paragraphes suivants et que nous illustrons par quelques-uns des projets identifiés : 1) Optimiser et configurer des structures à partir des forces naturelles, 2) exécuter des opérations formelles à partir de procédures, 3) maîtriser la construction de formes et d'espaces complexes, 4) animer les bâtiments par la robotique.

Optimiser et configurer des structures à partir des forces naturelles

Shohei Yoh, architecte né au Japon, conçoit en 1991, le complexe sportif municipal d'Odawara au Japon. Il met au point un système de couverture de terrains de sport, constitué d'une résille tridimensionnelle portée par des poteaux. La position de ces derniers est contrainte par l'alignement des terrains de jeu, la forme du toit est optimisée pour résister au poids de la neige, en intégrant les contraintes des vents dominants, en portant une attention à la distribution de la lumière naturelle et en assurant les hauteurs nécessaires à la pratique des activités sportives (Yoh 2015). Ici les techniques numériques sont utilisées comme outil de création et de calcul, elles participent à l'élaboration et à l'optimisation des formes pour mettre au point une structure légère et économique. Les architectes utilisent l'ordinateur pour intégrer les forces physiques et naturelles de l'environnement dans lequel l'édifice s'installe.

Karl Chu (Chu 2006), s'inspire de l'usage des techniques numériques issues des mathématiques, de la physique et de la biologie, pour simuler des phénomènes de croissance ou pour décrire des comportements non-linéaires. Chu s'intéresse aux travaux des mathématiciens René Thom (1923-2002) et Erick Christopher Zeeman (1925-2016) qui portent sur le domaine de la topologie, et qui formulent la « théorie des catastrophes⁹ ». Ces études mathématiques traitent de fonctions présentant des variations soudaines, appelées des singularités, celles-ci représentent ce que les mathématiciens dénomment des « catastrophes ». C'est à partir de modèles dynamiques continus et simples, que peuvent émerger des morphologies présentant un brusque changement de formes. Avec « The Catastrophe Machine », Chu explore ces modèles et il reconstruit avec ces étudiants la machine de Zeeman pour générer ces paraboles présentant soudainement des points d'inflexions. Parallèlement, avec le projet X Phylum, Chu met en œuvre les modèles de Lindenmayer, appelé L-systems¹⁰ (Figure 9), qui permettent de générer des géométries arborescentes à partir d'une grammaire simple et d'une séquence récursive de transformations. Les extrémités des branches générées par le L-système deviennent les poids d'édition de « Splines¹¹ », qui sont ensuite reliées pour construire des surfaces complexes (Chu 2015). Si d'un côté Chu

⁹ Un des résultats démontre qu'il n'existe que 7 formes de « catastrophes » pour une fonction à n paramètres et où n est inférieur à 4. Elles ont reçu le nom de pli, fronce, queue d'aronde, vague, poil, papillon et champignon.

¹⁰ Nous donnerons plus avant dans ce document une définition de ce formalisme

¹¹ Les splines sont des fonctions définies par des morceaux de polynômes, elles sont utilisées dans les outils contemporains de CAO pour dessiner des courbes.

utilise des outils mathématiques et informatiques avancés, il articule sa démarche avec des expérimentations qui prennent la forme de machines à dessiner et qui ne sont pas sans relation avec les pratiques et instruments du dessin traditionnel qui utilisaient pantographes, cerces, compas et perroquets pour ajuster les courbes.

Exécuter des opérations formelles à partir de procédures

Peter Eisenman (1932-), architecte, utilise l'ordinateur pour exécuter des séquences logiques de transformations géométriques. L'exécution de ces procédures encodées génère une série de dessins en 2 dimensions. Eisenman cherche à transposer dans un environnement numérique des procédures linguistique et construit une « grammaire générative », inspirée de la « grammaire formelle » de Chomsky, ou de la « grammaire de forme » expérimentée par Stiny et Gips (George Stiny 2006). Il met au point un encodage facilitant l'abstraction et la génération de formes spatiales (Meier 2019). Il s'inspire de l'univers des fractals et de leurs modes de génération, pour envisager et exprimer la complexité d'un projet d'architecture.

Construction de formes et d'espaces complexes

Frank Gehry (1929-), au sein de son agence d'architecture, explore le potentiel créatif des outils numériques à travers la mise en place d'un processus, qui passe par un premier travail analogique de mise en forme, puis par une série de numérisations et de résolutions constructives des projets. Ces démarches ont donné lieu à la mise au point du logiciel de *Computer-Aided Three-dimensional Interactive Application* (CATIA), basé sur les technologies de Dassault Systèmes, qui deviendra par la suite le logiciel *Digital Project*. La démarche a donné naissance, en 2002, à une société indépendante de logiciels et de services dénommée *Gehry Technologies*. Celle-ci a été rachetée en 2014 par la société *Trimble*. Au-delà de ces aventures économiques, les démarches de l'agence Gehry montrent un usage du numérique qui permet le développement et la réalisation d'un vocabulaire formel expressif et complexe.

Bernard Cache et Patrick Beaucé fondent en 1996 l'agence *Objectile*, celle-ci propose d'intégrer les activités de conception, de fabrication et de distribution de composants de l'architecture. L'agence est pionnière dans cette direction, avec cette tentative de générer les commandes d'usinage au plus proche de l'environnement de modélisation

et de conception. Elle propose d'intégrer dans un flux informationnel continu, la recherche conceptuelle, l'encodage algorithmique des formes et des motifs, et le langage de production. En utilisant le logiciel *Topsolid*, Bernard Cache et ses associés, modélisent des panneaux décoratifs qui sont usinés à partir d'un code numérique de type G-code. Le scénario de distribution de ces composants s'appuie sur un réseau de machines à commande numérique, réparti autour de la planète. Les machines sont capables de fabriquer le modèle numérique transmis par voie électronique. Ces travaux illustrent les premières tentatives de mise en œuvre des principes de personnalisation de masse énoncés notamment par Gilles Deleuze en 1988 dans son ouvrage *Le Pli* (Deleuze 1988).

En 2000, avec le projet de *Villa Nurbs*, Enric Ruiz-Geli et l'agence *Cloud 9*, explorent l'usage des techniques de modélisation avancées, tout en initiant leurs réflexions avec des expérimentations et des manipulations physiques qui passent par la réalisation de plusieurs maquettes analogiques. Les logiciels *3DSMax*, *Maya*, *Rhinoceros3D*, sont utilisés pour modéliser les géométries nurbs¹², pour représenter le projet, pour simuler le comportement des particules, produire des représentations en deux dimensions, générer des fichiers de commande des machines numériques ou imprimer des maquettes en 3D (Ruiz-Geli 2015). A ce moment du temps les standards d'interopérabilité entre les logiciels de conception et les logiciels de fabrication sont naissants. Ainsi l'interprétation des différents formalismes géométriques imposent l'écriture de routines traduisant un modèle géométrique en tableau de coordonnées.

Animer les édifices par la robotique

Chuck Hoberman (1956-), avec l'agence *Hoberman Associates*, développe des structures dynamiques, dont la taille et la forme peuvent changer par un mouvement mécanique coordonné et ainsi se développer dans l'espace. Le système de la sphère déployable a été décliné à plusieurs échelles, du jouet à la couverture de bâtiment. La simulation et le calcul de cette cinétique complexe ont été rendus initialement possibles par la mise au point de scripts écrits dans le langage *Autolisp*¹³. Hoberman s'intéresse particulièrement aux dispositifs adaptatifs pour l'architecture, ils représentent pour lui

¹² Pour Non-Uniform Rational Basis Splines ou B-splines rationnelles non uniformes en français. Ces techniques sont utilisées pour représenter mathématiquement des objets géométriques.

¹³ Langage de programmation intégré à Autocad®

les moyens de répondre aux enjeux des transformations climatiques (Hoberman et Schwitter 2011).

En 2003, Kass Oosterhuis (1951-), avec l'agence ONL, développe le projet *NSA Muscle*, à l'occasion de l'exposition *Architectures non standard*¹⁴ (Migayrou 2003) présentée au Centre Georges Pompidou. Il montre une structure gonflable dont la forme et le comportement évoluent en fonction de l'activité des visiteurs. Le dispositif est composé d'un coussin gonflable de grande dimension, serti d'un réseau de tubes gonflables dont la pression est contrôlée et modifiée pour transformer la morphologie du coussin. Oosterhuis s'intéresse au mouvement et à la dynamique des surfaces et des volumes, en explorant les relations et les interactions, constituées en temps réel entre l'objet construit et les visiteurs. Il questionne un nouveau registre perceptif, celui de *l'architecture adaptative* (Oosterhuis 2015). Les outils numériques sont utilisés pour concevoir et animer des espaces interactifs. Les composants de l'architecture sont dynamiques et se mettent en mouvement à l'aide d'actionneurs. Le comportement du dispositif et l'ambiance sonore, sont déterminés par l'activité des visiteurs, dont la présence est mesurée par des capteurs. La robotique, la mécatronique, la sonorisation et l'interactivité, font l'objet de conceptions spécifiques, et regroupent des compétences et des techniques numériques variées. Par ailleurs le projet interroge les formes de relations que nous pouvons entretenir avec des artefacts interactifs et adaptatifs, artefacts qui seront, quelques années plus tard, qualifiés « d'intelligents ». Nous reviendrons dans les chapitres suivants sur cette nouvelle classe d'objets hybrides.

En 2000, à l'occasion de la 7^o exposition internationale d'architecture de la Biennale de Venise, Mark Goulthorpe, avec l'agence dECOi Architects, met au point l'installation *Hyposurface*, constituée d'un ensemble de facettes métalliques actionnées par un réseau de pistons et dont l'orientation forme et déforme un motif, produisant une surface animée par le mouvement successif des facettes. Cette installation compose un mur de 10 mètres de long par 3 mètres de haut. La proximité des visiteurs vient modifier le comportement du mur et perturber l'animation. Plusieurs prototypes de mise au point sont réalisés intégrant des techniques de mécatronique, des systèmes de captation de présence, de projection d'image ou de compositions sonores et lumineuses (Goulthorpe 2015).

Certains architectes prolongent leurs travaux dans la conception d'environnements

¹⁴ Nous proposerons dans le paragraphe 2.2.6 une définition plus précise de la notion d'architecture non standard.

virtuels, c'est le cas de l'agence Asymptote Architecture qui conçoit le *New York Stock Exchange Virtual Trading Floor*. Celui-ci est un espace en trois dimensions, navigable en réalité virtuelle, et exploitant les technologies du web, avec les langages VRML (Virtual Reality Modelling Language) et Macromédia Flash®.

Nous arrêtons ici notre inventaire partiel des pratiques de la conception numérique de l'architecture qui prenait place au tournant du XXI^e siècle. Une identification plus complète des acteurs et des expérimentations de cette époque est accessible avec la consultation des catalogues des expositions du Frac Centre réalisées dans le cadre des manifestations *Archilab* ou encore avec la lecture du recueil édité par Mario Carpo, *The Digital Turn in Architecture 1992-2000* (Carpo 2013a).

Ces projets partagent des approches et des outils communs. Ils passent par la construction de maquettes 3D, ils construisent des relations avec les logiciels de fabrication et de pilotage des machines à commandes numériques, ils utilisent l'impression 3D pour la réalisation de maquettes, ils explorent les techniques de visualisations des données, ils utilisent des algorithmes de simulation et d'optimisation, ils écrivent des scripts de modélisation procédurale ou de générations de formes, ils mobilisent des outils et techniques utilisés par d'autres disciplines et rassemblent des compétences variées. Nous verrons que durant ces vingt dernières années les démarches de ces précurseurs se sont renforcées et généralisées avec l'usage d'outils et de techniques de plus en plus accessibles. Nous souhaitons dans le paragraphe suivant nous intéresser plus particulièrement à l'approche dite *paramétrique*.

2.3 LA MODELISATION PARAMETRIQUE

Pour caractériser les modalités d'instrumentation dites *paramétriques*, nous envisageons dans un premier temps de préciser la notion de *modèle*, puis de revenir sur le terme de *paramétrique*, avant d'analyser son utilisation au sein des modeleurs offrant des fonctionnalités de *programmation associative* et de regarder comment elle implique une mathématisation du projet. Nous rappellerons ensuite son usage aux échelles urbaines dans le cadre des maquettes numériques de l'architecture (BIM¹⁵) et de la ville (CIM¹⁶).

¹⁵ Building Information Modeling

¹⁶ City Information Modeling

2.3.1. La notion de modèle

Franck Varenne et Mark Silberstein proposent de spécifier la notion de *modèle*, celui-ci traverse l'ensemble des disciplines scientifiques et ils en donnent une première définition de synthèse :

« ...dans l'acte d'utiliser un modèle ou une simulation scientifique, il s'agit toujours de manipuler, de modifier ou de construire un objet, vivant ou non, matériel ou informel, en vue de répondre à un certain nombre de questions relevant d'une enquête de connaissance. » (Varenne et Silberstein 2013)

Si les auteurs font par la suite la distinction entre les notions de *modèle* et de *simulation*, ils commencent par identifier les fonctions d'un modèle scientifique et principalement sa fonction de médiation conduisant à « faciliter » une opération cognitive dans le cadre d'un questionnement. Les fonctions « facilitantes » sont commentées et nous en reprenons ici quelques caractéristiques plus adaptées au domaine de la conception architecturale.

Le modèle permet de *faciliter l'expérience*, il donne accès à ce qui peut être représenté de manière sensible, imaginable, mesurable ou détectable. Les *Maquettes* et *prototypes* sont envisagés pour accompagner la compréhension des propriétés du système cible. Des *systèmes visuels* peuvent également faciliter la mémorisation et une *présentation condensée de l'information* accompagne l'accès aux données.

Le modèle permet de *faciliter une formulation intelligible*, il permet la reproduction par des moyens de calcul de certains phénomènes pouvant conduire à une explicitation intelligible d'un mécanisme, ou pouvant anticiper un comportement. La construction de représentations conceptuelles, à travers un principe abrégatif ou synthétique, facilite également la compréhension du phénomène.

Le modèle permet de *faciliter la communication et la co-construction de savoirs*. Il sert la communication entre acteurs, il facilite la délibération et la concertation entre des individus d'une même discipline ou partageant un même objectif.

Ainsi l'activité de modélisation se réalise dans un travail de conception et elle assure ainsi trois fonctions principales, elle facilite l'expérience et la compréhension du

phénomène dans une représentation condensée, elle constitue une formulation intelligible, elle est support de médiation et de co-construction de savoirs.

2.3.2. La modélisation paramétrique

Paramètre : intervalle de valeurs d'une propriété de l'objet

Le Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales ¹⁷ (CNRTL) donne à paramètre, dans le champ de l'informatique, la définition suivante :

« Variable de type connu mais dont la valeur, l'adresse ou le nom ne sont précisés qu'au moment de l'exécution. Un programme admet des paramètres lorsqu'il est rédigé en fonction de plusieurs cas d'emploi, chaque cas d'emploi conduisant à fixer la valeur des paramètres » (CNRTL).

La modélisation paramétrique est considérée comme un processus au cours duquel une série de paramètres contrôle tout ou partie de la forme d'un objet, d'un édifice ou d'un système urbain. Le type du paramètre est appelé *propriété* ou *attribut* de l'objet et les instanciations du paramètre sont appelées *valeur*. Les valeurs des paramètres peuvent être stockées dans une base de données, modifiées par le concepteur ou spécifiées par un flux de données. Cette description explicite de l'objet le rend éditable, modifiable et autorise des variations à l'intérieur du système établi (Figure 3). L'approche paramétrique est associée à une logique d'exploration de l'espace des solutions, rendue possible par l'actualisation de la valeur du paramètre. Une description des outils de modélisation paramétrique dans le champ de l'architecture a été proposée par de Boissieu (de Boissieu 2013) en mettant en exergue la manière dont les concepteurs peuvent construire eux-mêmes les réseaux de dépendance des variables et les contraintes qui constituent les modèles paramétriques.

¹⁷ <https://www.cnrtl.fr> consulté en mars 2020

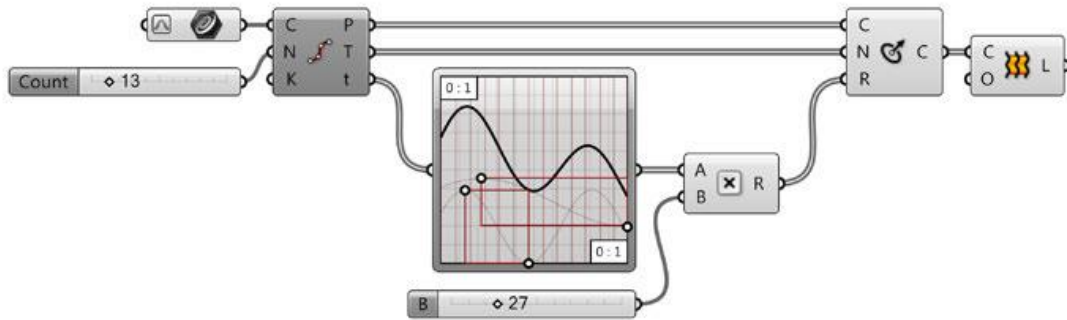


Figure 3. Exemple de modèle paramétrique

Description continue

Le progrès des techniques informatiques est passé par l'intégration de formalismes et de théories mathématiques, analyse non standard, théorie de l'émergence, et géométrie algorithmique. Ces méthodes ont permis de s'éloigner des descriptions discrétisées de l'espace pour se rapprocher de descriptions continues et paramétriques. Adossé à l'usage des machines à commande numérique, ces modalités ont contribué au développement d'une *architecture non standard*¹⁸, dont les principales caractéristiques relèvent d'une pensée de la morphogénèse comme étant inscrite dans un flux temporel de variations continues, ainsi que sur un renouvellement de la notion de norme et de standard. Les modélisations numériques rendent possibles l'intégration des singularités des matériaux, et ainsi la standardisation industrielle, caractéristique de la production de masse, perd de sa pertinence¹⁹. Ce renouvellement des procédés et des protocoles de production rend possible la matérialisation de géométries complexes, basées sur des surfaces courbes, mobilisant des concepts de courbure ou de fluidité et permettant la formulation de scénarios légitimant la personnalisation de masse.

Paramétrisme

Le terme *paramétrisme* a été proposé par Patrick Schumacher (Schumacher 2009) pour instituer ces approches en style architectural. Schumacher envisage la redéfinition des

¹⁸ Nous reviendrons sur la notion d'architecture non standard plus avant dans ce document.

¹⁹ Nous renvoyons au chapitre fabrication de ce document qui propose quelques exemples d'intégration des singularités des matériaux.

pratiques de l'architecture à l'aune de leurs instrumentations numériques, qui passent par l'emploi de l'animation, de la simulation, du *scripting* ou de la modélisation paramétrique. Il va au-delà de considérations techniques et il proclame que ces approches accompagnent un mouvement collectif portant radicalement de nouvelles valeurs et de nouvelles ambitions. Ces démarches rendent possible la prise en compte de la complexité, de l'incertitude, de l'indétermination et de l'hétérogénéité de nos sociétés. Nous n'irons pas au-delà sur cette question, et nous restons sur la caractérisation des outils et des méthodes.

2.3.3. *Le modèle associatif*

La conception paramétrique s'intéresse à la définition d'un ensemble de paramètres qui influence la forme. La forme finale n'est pas au centre de la recherche, elle est induite. La modification de la valeur des paramètres engendre non pas un objet mais un ensemble de variations. Le processus n'est pas simplement fondé sur des valeurs métriques mais plutôt sur l'ensemble des relations entre les objets qui composent la forme. Cette possibilité d'inscrire le modèle géométrique dans une série de variations repose sur le concept numérique *d'associativité*. La conception paramétrique correspond à un modèle mathématique topologique basé sur une modélisation associative. Elle se constitue à l'aide d'une représentation sous forme graphes mettant en relations les éléments constitutifs du modèle. Elle permet de moduler la différenciation des formes à travers la mise en variation des paramètres.

La liste des paramètres mobilisables reste ouverte aux intentions des concepteurs. Nous pouvons cependant en identifier quelques familles : paramètres mathématiques (calcul et nombre), paramètres géométriques (point, ligne, surface...), paramètres topologiques (relation et continuité), paramètres de la matière (comportement physique, dimensions), paramètres de fabrication (taille des machines, poids), paramètres environnementaux (irradiation solaire, niveau sonore, niveau de pollution...), ou paramètres humains (usage, perception...). Ces logiques morphogénétiques intègrent les caractéristiques des matériaux, les modalités de mise en œuvre, des aspects culturels. Les relations entre forme, structure et matériau sont informées et interagissent au sein du système.

2.3.4. *La mathématisation du projet*

Géométrie numérique

Ces modalités d'instrumentation de la conception mobilisent des connaissances du domaine de la géométrie. Nous connaissons la géométrie euclidienne qui permet de manipuler des points, des lignes, des primitives géométriques (...), ainsi que leurs opérateurs de transformation isomorphes (translation et rotation), et non-isomorphes, pour les transformations affines et projectives (mise à l'échelle, inclinaison...). Nous connaissons les opérations de transformation de la perspective qui permettent par projection de recomposer des vues et des notations en deux dimensions. Aujourd'hui ces géométries prennent place dans un environnement numérique, mathématique et infographique. L'architecte doit alors intégrer les concepts qui sous-tendent les traductions informatiques de la géométrie pour ainsi accéder aux outils d'analyse, de simulation ou de visualisation des formes. Les environnements de conception par ordinateur permettent de manipuler des maillages (volume ou surface définis par des sommets, des arêtes et des régions), des polysurfaces (composée de surfaces *NURBS*²⁰ qui construisent des *Représentations Frontières*²¹) ou encore des modélisations volumiques (qui relèvent de la construction de solides²²). La construction paramétrique d'un point sur une surface nécessite de spécifier ses coordonnées paramétriques en U et en V, les découpages le long des courbes iso-paramétriques d'une surface permettent d'isoler des sous-surfaces particulières. Ces exemples illustrent quelques-uns des concepts mathématiques que les architectes manipulent (Figure 4).

²⁰ Acronyme de Non-Uniform Rational Basis Spline

²¹ Représentation frontière ou représentation par les bords sont nommés en anglais Brep pour Boundary Representation.

²² Appelé Constructive Solide Geometrie en anglais.

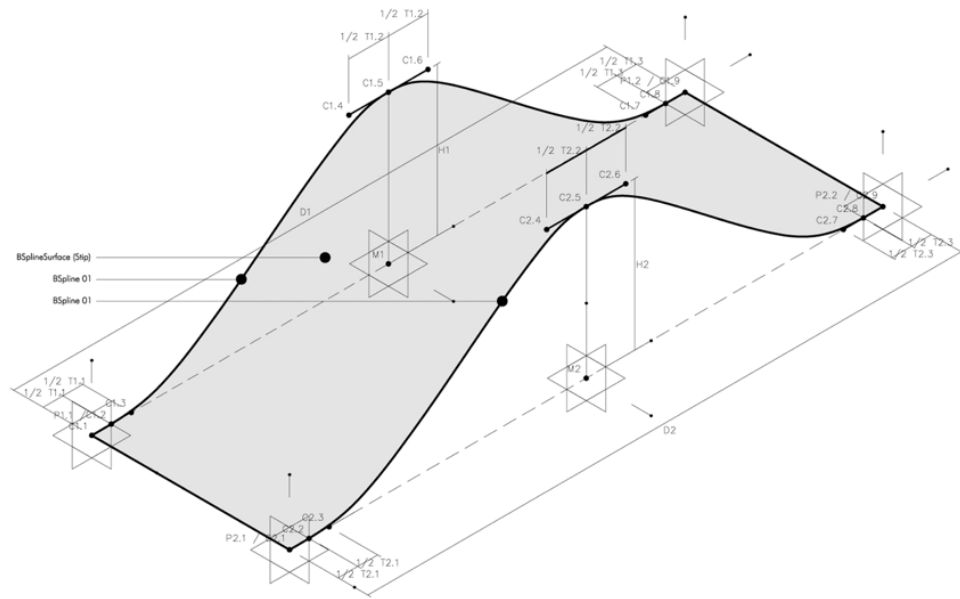


Figure 4. Exemple de définition paramétrique d'un point sur une surface

Des séquences algorithmiques sont également mobilisées pour réaliser des constructions géométriques et des encodages sont alors nécessaires pour représenter les formes ou traiter les données qui peuvent informer un projet en conception. Il apparaît alors important de bien noter l'importance de la structuration des données et c'est la compréhension de l'organisation numérique de l'information qui permet de manipuler un modèle géométrique, d'encoder ou de paramétrer les différentes instances qui le composent (Figure 5).

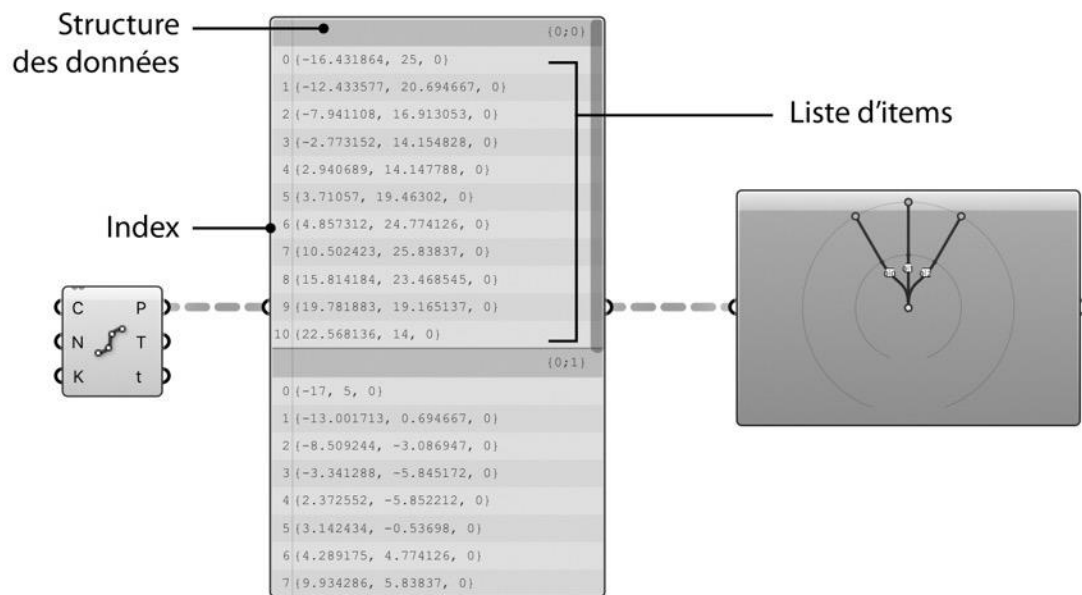


Figure 5. Exemple de structure des données dans l'environnement de modélisation paramétrique Grasshopper

NURBS et relation à la fabrication

Un regard historique sur l'évolution des techniques numériques de modélisation nous permet de mieux situer les enjeux. L'usage et la mise en œuvre d'éléments surfaciques courbes sont présents depuis longtemps dans l'architecture navale, la construction en pierre, la menuiserie, la charpente et plus récemment dans la construction automobile et aérospatiale. Historiquement des outils, le curvigrapher ou encore la cerce (Figure 6), sont utilisés pour dessiner ou construire des éléments courbes et continus, tels que les voûtes ou les coques de bateau. Le terme anglais *spline* correspond à la traduction du terme technique français *cerce* et c'est dans la première moitié du XX^e siècle qu'une définition mathématique des courbes utilisera par analogie cette terminologie désormais répandue dans les logiciels de modélisation. Dans les années 1950 et 1960 Pierre Bézier et Paul de Casteljaou, respectivement ingénieur chez Renault et Citroën, proposent deux solutions de notation paramétrique d'une forme libre et continue. Les *courbes de Bézier* et l'*algorithme de Casteljaou*, rendent possible la production de ces surfaces courbes, ces deux formalismes mathématiques resteront dans les laboratoires des industriels avant leurs publications académiques. Parallèlement, en 1960, General Motor avec le mathématicien Carl de Boor travaillent sur une méthode récursive de

construction des Basis-Splines²³, similaire aux travaux des deux ingénieurs français, et dans laquelle la courbe est contrôlée par un ensemble de points de contrôle positionnés sur un polygone extérieur à la courbe. Cette approche sera par la suite généralisée à travers un formalisme appelé *NURBS*. Initié par l'industrie automobile, ces outils sont alors utilisés par l'industrie aéronautique avec Boeing, puis par Dassault dans son logiciel CATIA et ensuite appliqué à l'industrie de la construction. Une dernière variante, appelé T-Spline, fait depuis 2007 l'objet d'un brevet détenu par l'éditeur logiciel Autodesk (Townsend 2014).

L'ensemble de ces techniques numériques offre des avantages en termes de précision, il permet d'approximer des formes complexes tout en conservant une simplicité de construction et d'implémentation. Nous notons les étroites relations que ces méthodes entretiennent avec les problématiques de fabrication et de construction. Leur émergence prend place au moment où l'industrie est confrontée à des besoins importants de production d'éléments courbes et aérodynamiques et pour lesquels elles développent à la fois des solutions d'automatisation de la fabrication avec des machines à outils contrôlées numériquement, de type *CNC*²⁴, et des solutions logicielles.

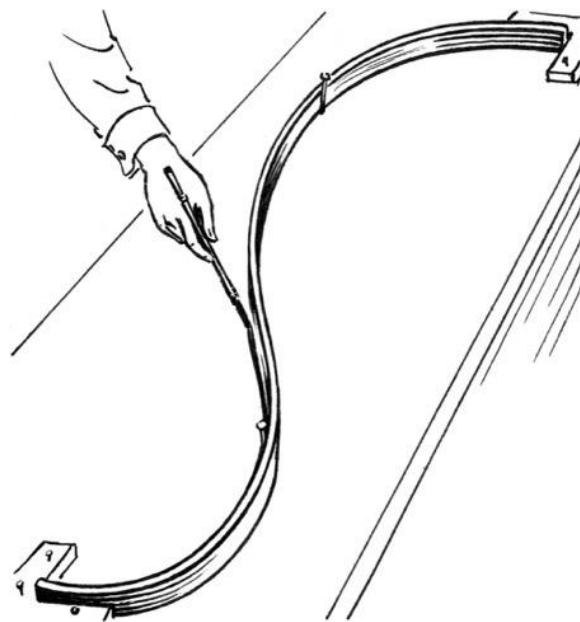


Figure 6. Représentation d'une cerce, outil utilisé pour dessiner des courbes à plusieurs centres, Archives of Pearson Scott Foresman, donated to the Wikimedia Foundation

²³ B-Spline

²⁴ *Computer Numerical Control*

2.3.5. *La modélisation paramétrique urbaine*

La modélisation paramétrique peut se décliner à différentes échelles et porter sur des questions constructives, urbaines ou programmatiques. L'application des approches paramétriques aux échelles urbaines a été depuis plusieurs années explorée. Nous citons les travaux de Patrick Schumacher, qui à travers les études de l'Agence Zaha Hadid Architectes, met en applications ces méthodes et outils pour la conception urbaine (Schumacher, 2009). Ils se caractérisent par le développement de formes courbes, fluides et continues, et s'articulent avec une idée de flux ou de champs de force plus que de considérations spatiales. Ming Tang (Tang et Anderson 2011) propose d'enrichir la notion d'urbanisme paramétrique en intégrant aux modèles paramétriques des données géolocalisées caractérisant des attributs démographiques, culturels et humains, il propose de relier les données issues des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) aux modèles paramétriques de conception urbaine. Le projet *Citymaker* constitue un outil de prise de connaissance de l'impact de scénarios d'aménagement à travers la constitution d'indicateurs urbains (Beirão 2012). Initialement implémenté à l'aide des techniques de génération à partir d'une *grammaire de forme*, l'outil intègre par la suite une description paramétrique des aménagements. Une multitude de scénarios peut être explorée et une évaluation de leurs impacts est rendu possible par la prise de connaissance d'indicateurs.

Depuis ces expérimentations naissantes en matière d'urbanisme paramétrique, plusieurs recherches ont été conduites. Les travaux récents du *Future Cities Laboratory* (FLC) réalisées en 2018 dans le cadre d'un enseignement de Master associé au programme *Singapore-ETH Zurich* propose d'explorer une approche paramétrique de la conception urbaine en s'appuyant sur la notion de *patterns urbains* (Fun et al. 2018). L'objectif vise à montrer qu'une approche paramétrique peut faciliter la modélisation, la visualisation et la quantification de scénarios d'aménagement urbain, en permettant d'explorer un ensemble de solutions plutôt que de se concentrer sur une unique optimisation. L'expérimentation repose sur la constitution d'un ensemble *d'éléments urbains paramétriques*. Ces *éléments urbains, ou patterns*, représentent des archétypes d'aménagement issus de la littérature, notamment à travers la relecture des travaux de Christopher Alexander (Alexander 1978), ou sont identifiés dans les compositions urbaines vernaculaires. Les conceptualisations et les descriptions paramétriques de chacun d'eux sont une première étape d'un travail qui se prolonge avec leurs

assemblages et recompositions. Cinquante-cinq modèles, associées à une fiche descriptive, sont produits et catégorisés en six grands thèmes : 1) la forme urbaine, 2) typologie et densité, 3) fonction et usage, 4) écosystème et services, 5) mobilité, 6) énergie et développement durable. Au-delà de la description des modalités et séquences pédagogiques mises en place, le projet démontre l'intérêt d'un apprentissage des méthodes de conception urbaine exploitant les logiques paramétriques et imposant la structuration d'une connaissance sous forme de règles. La nécessaire explicitation du modèle paramétrique rend transparent le processus de conception, elle permet d'identifier les paramètres impactant, facilite la communicabilité des concepts et du projet. Par ailleurs plusieurs limites sont identifiées. Elles reposent notamment sur la dimension linéaire du processus de modélisation paramétrique, celui-ci ne permet pas l'émergence de solutions qui pourraient être le résultat d'interactions entre les composantes d'un système complexe. La dimension générative du modèle paramétrique n'est pas intégrée à ce stade du projet. D'autre part, la paramétrisation impose des simplifications qui ne rendent pas toujours compte de la réalité des systèmes, les choix initiaux de modélisation peuvent orienter les hypothèses de projet et rendre difficile les modifications ou les retours en arrière.

L'intégration des techniques de modélisation paramétrique, de simulation et de visualisation, a été appliquée à l'échelle urbaine en prenant comme étude de cas le master plan de la ville de Vienne (Koenig et al. 2017; Fink et Koenig 2019). Ce projet présente un flux informationnel intégré et implémenté au sein des environnements de modélisation *Rhinoceros3D* et *Grasshopper*. Celui-ci se constitue par des données urbaines géo-référencées, la réalisation d'analyses urbaines²⁵, la modélisation géométrique du plan masse sur la base de typologies urbaines, l'exécution de simulations²⁶. La dimension paramétrique du système facilite l'exploration de l'espace des solutions et permet de générer plusieurs scénarios d'aménagement. Ces derniers sont interactivement associés à leurs représentations géométriques, à leurs simulations, à des données quantifiées d'évaluation. La prise de connaissance de ces hypothèses est facilitée par une interface de navigation et de tri des solutions. Des techniques de réalité augmentée sont également implémentées. Ce projet illustre la constitution d'un flux

²⁵ Génération d'une carte d'attractivité en fonction de la proximité aux points d'intérêt, ou analyse du réseau urbain en s'appuyant sur les méthodes de *syntaxe spatiale*. *La syntaxe urbaine (Space Syntax) fait référence à un ensemble de techniques et de méthodes d'analyse urbaine développé par notamment par Bill Hillier entre les années 1970 et 1980 au sein du College of London* (Hillier et Hanson 2005; Nes et Yamu 2018)

²⁶ Mesure de l'intégration urbaine et des impacts visuels, mesures de performances environnementales, évaluation du confort urbain

informationnel intégré, riche et paramétrique permettant la constitution et l'évaluation de scénario à l'échelle urbaine.

2.3.6. Maquette numérique de l'architecture et de la ville

L'acronyme BIM, pour *Building Information Modeling*²⁷, correspond en français à l'expression *Maquette Numérique d'Architecture*, le BIM constitue un processus de travail et de collaboration entre les acteurs du secteur de la construction, ce processus intégré se déploie aussi bien durant les phases de conception, de construction ou de gestion des édifices (Celnik, Lebègue, et Nagy 2015). Une maquette numérique se caractérise par la constitution d'un ensemble de descriptions de l'édifice, structurées sous forme de base de données partageables entre les acteurs, et dont la représentation est fonction du point de vue de l'intéressé. Elle a pour objectif de centraliser et de permettre l'édition de l'ensemble de la documentation d'un projet. La structure et la constitution des bases de données sont étroitement associées à l'usage et au type d'opération qui sont à l'œuvre. Le processus BIM peut être constitué de plusieurs modèles synchronisés par les acteurs des différents corps d'état à l'aide d'une plateforme collaborative d'échange de données, ou centralisée au sein d'une unique base de données interrogée par les acteurs à l'aide d'un système de gestion des priorités et des privilèges. Le modèle BIM repose sur un format de donnée interopérable, intitulé *Industry Foundation Classes*, format ouvert et normalisé depuis la fin des années 90, celui-ci liste l'ensemble des objets architecturaux (mur, dalle, toiture, équipement...) et permet leurs descriptions standardisées. Ce processus implique par ailleurs l'établissement d'une charte, destinée à spécifier les étapes, rôles et processus de validation et d'échanges des modèles. Les *Niveaux de Détail* (LOD²⁸) des modélisations font l'objet d'une catégorisation qui renvoie à la phase du projet. Il existe 5 classes de spécification qui se déclinent de la représentation géométrique symbolique à sa description détaillée « telle que construite ». La mise en place de ces méthodologies a fait depuis quelques années l'objet d'une réglementation qui impose son déploiement dans les chantiers publics. Cependant la généralisation de ce protocole a rencontré, chez les acteurs de la construction, des freins à la fois d'ordre culturel, technique et

²⁷ Les expressions *Building Information Model* ou *Building Information Management* peuvent également être utilisées si elles portent sur le fichier (model), sur le processus de gestion du projet, et des informations entre les acteurs (management) ou sur le processus de travail et la constitution des bases de données (Modeling).

²⁸ Level of Detail

économique (Marin et Cuba Segura 2014).

Les initiatives en matière de standardisation des descriptions de l'espace bâti d'une part, et d'autre part les précédents en matière de description du territoire à travers le développement des Système d'Information Géographique (SIG), ont donné naissance à la *Maquette Numérique Urbaine* (MNU) ou *City Information Modeling* (CIM). La maquette urbaine se constitue avec l'association des maquettes numériques des édifices et intègre les infrastructures, la description des activités humaines, ou des informations géographiques. Le déploiement de ces techniques trouve une justification dans la centralisation des informations et la facilitation de la planification et de l'administration des services urbains qu'il suppose. Il s'inscrit par ailleurs dans une perspective de développement durable et d'urgence écologique en contribuant à la prise de connaissance de l'impact des activités humaines sur l'environnement et vise leurs réductions (Dantas, Sousa, et Melo 2019).

2.4 PERFORMANCES ET SIMULATIONS

L'intérêt croissant pour les questions de performance prend place dans un contexte de développement durable et d'urgence climatique. La prise en compte des performances de l'édifice représente un enjeu environnemental, économique et social. Ces questions ne sont plus seulement des résolutions a posteriori d'une hypothèse de projet, mais sont prises en compte dès les phases initiales de la conception.

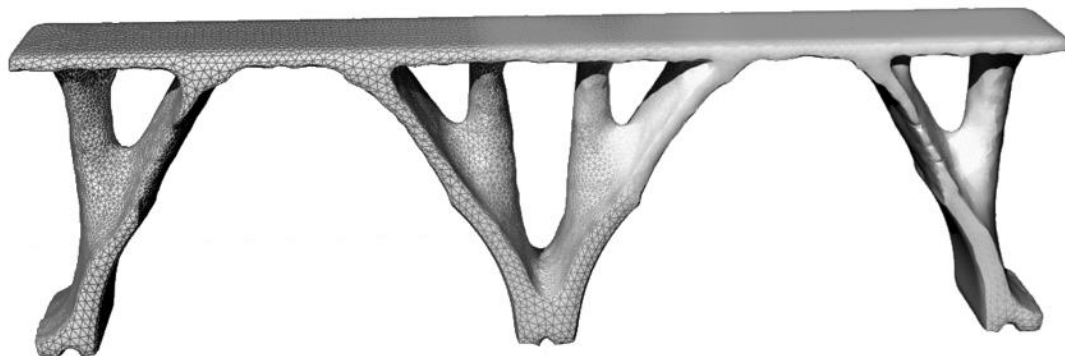


Figure 7. Exemple d'optimisation topologique. Travaux de séminaire de l'auteur, ENSAG, 2017

2.4.1. La notion de simulation

Ces simulations sont variées, elles portent sur des questions volumétriques, structurelles (Figure 7), environnementales (Figure 8), thermiques, lumineuses, économiques, sensibles (...). Pour Franck Varenne (Varenne et Silberstein 2013), une *simulation* peut être considérée comme un type particulier de modèle, elle permet de prédire les performances du système cible, sans forcément reproduire l'ensemble des interactions causales. Dans un contexte d'instrumentation numérique, une simulation consiste au calcul ou à la résolution numérique d'un modèle. Deux étapes clés constituent un processus de simulation, d'une part la phase de computation, et d'autre part une phase d'observation, de visualisation, de détection ou de prise de connaissance des résultats de la phase précédente. Le modèle et la simulation sont alors utilisés pour extraire de manière interactive et continue des informations et des descriptions du projet. Ces descriptions prennent la forme de représentations géométriques (modèles 3D ou dessins 2D), de représentations visuelles (en fausses couleurs ou à travers des diagrammes) et ou de représentations chiffrées (surfaces, quantités ou longueurs, nomenclature...).

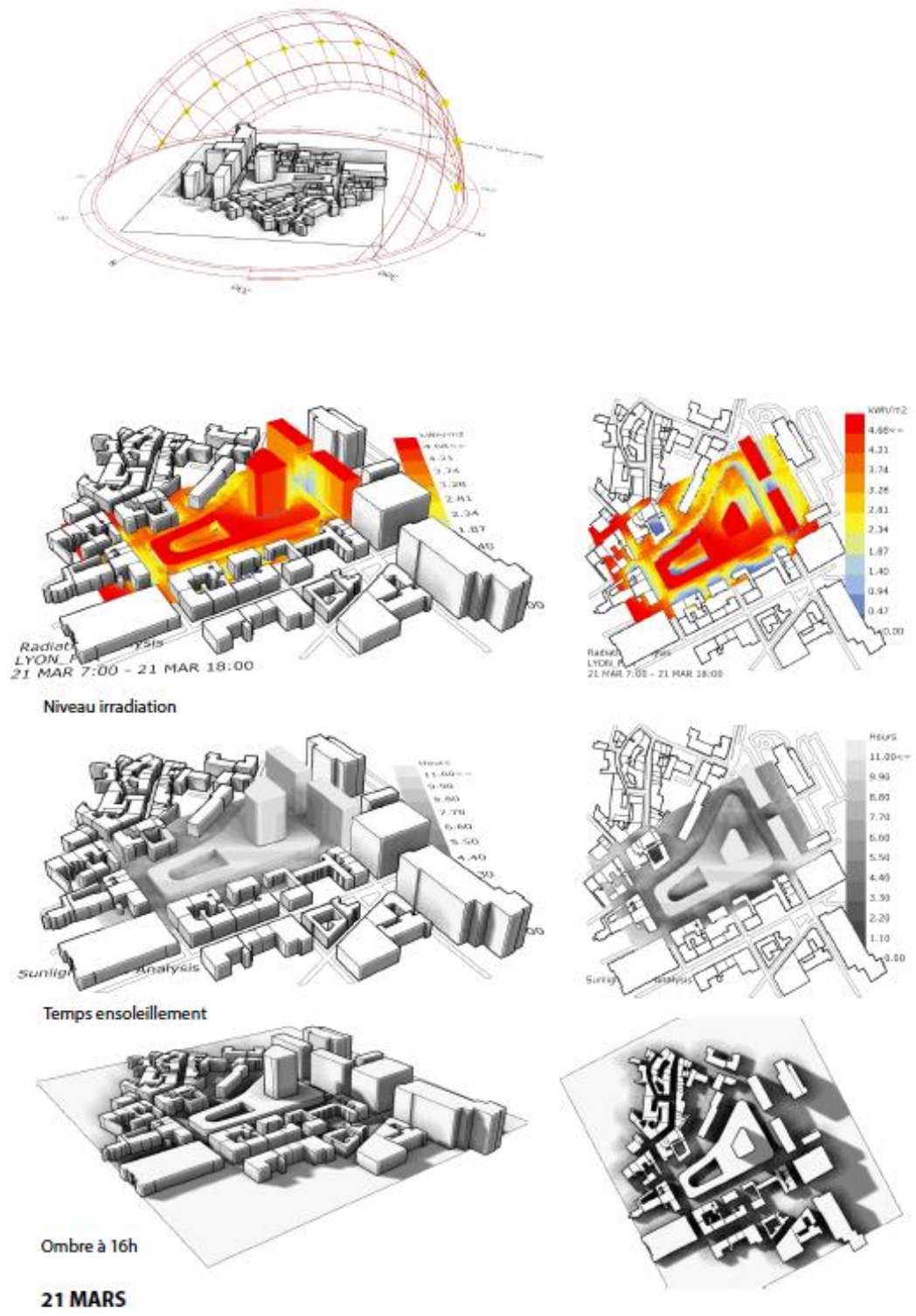


Figure 8. Exemple d'étude solaire. Travaux de séminaire de l'auteur, ENSAG, 2017

2.4.2. *D'une performance évaluative à une performance créative*

Kolarevic (Kolarevic 2014) note que ces approches dépassent un regard néo-fonctionnaliste sur l'architecture et insiste sur les dimensions créatives, stimulantes et génératives. Il qualifie ces démarches de *conception basée sur la performance* (*performance-based design*). La simulation et la performance représentent des vecteurs de projet, elles alimentent des conceptions créatives et innovantes, elles sont mobilisées dans les phases initiales de conception en s'appuyant sur des descriptions conceptuelles.

Ces démarches imposent l'usage de logiciels et la mise en place de méthodologies spécifiques rendues possible par les récents développements logiciels. Nous avons précédemment identifié les limites des outils classiques de CAO (Marin 2010). Ces derniers s'appuient sur un séquençage des activités de conception qui vont de l'abstrait au concret à travers des spécifications progressives et linéaires sans faciliter, par exemple, le retour en arrière²⁹. De plus, les limites contextuelles, cognitives et ergonomiques de ces outils ont été identifiées. Les spécifications sont longues et rébarbatives, elles nécessitent des niveaux élevés d'expertise, une définition précise du modèle, l'usage de plusieurs environnements logiciels dont l'interopérabilité peut engendrer des pertes d'informations ou des remodelisations.

Ces limites ne facilitent pas les démarches de conception assistée par la performance dès les phases initiales de conception, et c'est notamment la généralisation des outils paramétriques et le développement des outils simplifiés de simulation qui peuvent rendre possible ces démarches. Dans ce contexte l'évaluation des performances devient un vecteur de conception créative, elle alimente un travail d'exploration de l'espace des possibles en permettant aux concepteurs, architecte ou designer, d'intégrer les résultats des simulations à son travail de recherche formelle. Les conditions climatiques, les contraintes structurelles, les apports énergétiques, constituent des paramètres d'entrée, ils interagissent avec le modèle géométrique et conduisent à des différenciations

²⁹ Françoise Darses (Darses 1994) rappelle que l'évaluation systématique des outils de CAO dans les processus de conception créative révèle qu'ils introduisent dans l'activité de conception des exigences qui altèrent la part créative du travail de conception : la prise d'information des utilisateurs est canalisée vers des contenus précis et l'exécution du dessin prend le pas sur l'analyse du problème. Imposant généralement de suivre un plan de résolution prédéterminé, les systèmes CAO renforcent la planification hiérarchique de la résolution du problème, ils rendent impossibles l'application de stratégies incertaines et la manipulation d'objets flous, comme les brouillons, les surcharges ou les croquis. Ce modèle en cascade établit un phasage séquentiel sur un axe abstrait-concret. Le principe repose sur la traduction des spécificités fonctionnelles et conceptuelles en spécifications structurelles et géométriques pour aboutir aux spécifications constructives de l'objet. Mais ce « modèle transformationnel » n'est pas adapté aux caractéristiques d'un processus créatif.

morphologiques.

2.4.3. De l'interopérabilité au continuum informationnel

L'instrumentation numérique rend alors possible des approches créatives, des recherches conceptuelles, des mises au point de processus morphogénétiques, dans lesquelles les dimensions performanciennes du projet sont centrales. Ces performances peuvent passer par une recherche d'optimums avec la mise en place d'algorithmes d'optimisation, mais peuvent également rester ouvertes aux interprétations et aux intentions des concepteurs. Les modélisations et les simulations prennent la forme d'un système numérique, le concepteur manipule les paramètres pour explorer l'espace des solutions qu'il a constitué. Il devient « l'éditeur » d'un système morphogénétique lui donnant accès à différentes informations quantifiées ou à différentes représentations ou notations.

Trois caractéristiques principales peuvent être identifiées.

La première porte sur l'étroite articulation entre les savoirs de l'architecte et ceux de l'ingénierie. Même si les modèles de simulation proposent des instanciations simplifiées, en acceptant une définition sommaire de l'objet en étude, les concepts manipulés sont issus des sciences de l'ingénieur et doivent trouver un écho chez l'architecte. Pour Kolarevic (Kolarevic 2008) une étroite relation se constitue entre les disciplines.

La seconde caractéristique repose sur l'importance de définir les flux d'information nécessaires à la constitution des différentes représentations et visualisations du projet. Dans des environnements paramétriques, les hypothèses morphologiques peuvent être manipulées interactivement et les variantes du projet sont soumises automatiquement à évaluation. Le moteur de simulation est fréquemment intégré à l'environnement de modélisation géométrique. Le concepteur architecte doit identifier et extraire de son modèle les informations pertinentes pour permettre la constitution des représentations en fonction du point de vue souhaité. Une représentation géométrique volumétrique nécessite la construction de surfaces et de volumes, une extraction de ces dernières sera nécessaire au calcul d'une simulation d'irradiation solaire par exemple. La compréhension de la structure des données qui parcourent le modèle paramétrique est centrale pour le bon fonctionnement du système (Figure 5). Ainsi le processus ne passe plus par une série d'exportations dans des formats prédéfinis par les éditeurs de

logiciels, mais porte sur la structuration des données dont la pertinence et la hiérarchie sont imposées par le modèle de simulation ou la structuration des échanges entre les outils. D'une logique d'interopérabilité, passage d'un logiciel à un autre à travers des formats prédéfinis, nous basculons vers la définition d'un flux de données ou d'un flux de travail³⁰. Celui-ci constitue un *flux informationnel*. Ainsi les différents logiciels opèrent comme des briques fonctionnelles et celles-ci sont assemblées pour réaliser des modélisations ou des simulations. Elles se réalisent au sein d'un même environnement de conception ou à travers l'usage de différents logiciels, utilisés par différents acteurs de la conception, et dont l'interconnexion doit être déterminée. Un modèle paramétrique peut se concevoir comme un système de relations actualisées par le passage d'une donnée, et dont la valeur de sortie peut devenir une valeur d'entrée pour autre modèle.

Une troisième caractéristique repose sur la mise à disposition « ouverte » d'un ensemble de données nécessaires à la réalisation d'une simulation. Par exemple, dans le cas d'une étude des qualités solaires et environnementales, les descriptions des conditions météorologiques et des niveaux d'irradiation du lieu dans lequel s'installe le projet, sont nécessaires. Ces fichiers sont fréquemment mis à disposition, à partir de serveurs internet, dans des formats standardisés et peuvent alimenter le modèle en conception. Ainsi le système numérique mis en place par le concepteur est constitué d'un ensemble de données, allant de descriptions environnementales fournies par des organismes internationaux, à la constitution de diverses représentations et simulations manipulées interactivement et mise à jour automatiquement pour faciliter la constitution de variantes du projet. Nous reviendrons dans le chapitre *visualiser* du présent document sur l'usage des « données ouvertes », mais cette capacité d'intégration des données extérieures sous forme d'entrant pour le modèle en étude prolonge la caractérisation de notre *flux informationnel continu*.

2.4.4. Objectivation du processus de conception

Nous avons noté dans le paragraphe précédent, intitulé *mathématisation du projet*, comment l'instrumentation numérique impose des descriptions mathématiques et

³⁰ Le terme de *workflow* est communément employé dans la langue anglaise pour désigner ce flux de données ou ce flux de travail. Ce dernier point est rattaché aux questions d'organisation du travail et des méthodes de productions. Le concept apparaît avec la révolution industrielle, et sa définition est largement impactée par l'usage des technologies numériques au tournant des années 1990. Dans le champ de l'architecture les méthodologies BIM sont associées à la modélisation de cette organisation du travail et des échanges (Garber 2017).

géométriques de l'objet en conception. Nous remarquons ici comment le projet prend place dans une forme d'objectivation. Les simulations et leurs résultats quantifiés facilitent une analyse dont l'apparente exactitude pourrait suffire à son autojustification. Nous souhaitons ici insister sur les risques d'une confiance aveugle dans des résultats dont l'apparence scientifique reste relative à la pertinence des modèles et des limites des moteurs. C'est nécessairement la posture réflexive et consciente du concepteur qui garantira l'usage pertinent de ses outils de conception en évitant les risques d'une trop forte technicisation des environnements cognitifs.

2.5 MODELISATION GENERATIVE ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

2.5.1. *Naissance de l'intelligence artificielle*

Nous avons vu que les questions d'automatisation sont étroitement associées à l'histoire de l'humanité. Au XIII^e siècle, les travaux de Raymond Lulle (1235-1315) portent sur la mise au point d'une machine logique capable de reproduire le raisonnement. Au XVIII^e siècle les premiers automates sont mis au point. Jacques de Vaucanson (1709-1792) présente par exemple, le *flûteur automate*, capable de jouer plusieurs morceaux de musique, ou le *canard digérateur*, célèbre pour simuler la digestion et la défécation. Ces démarches tentent de reproduire artificiellement des activités propres aux êtres vivants, mécanismes naturels, activités cognitives ou créatives.

Au XX^e siècle la cybernétique donne naissance aux sciences cognitives en permettant de simuler les opérations du raisonnement et en tissant de nouvelles relations entre les sciences du vivant et les sciences de l'artificiel. La notion d'information et son codage prennent une place centrale au sein de « machines calculantes » et rendent possible la mise au point de systèmes capables de maintenir un état d'homéostasie³¹ grâce à des mécanismes d'autorégulation et de boucles de rétroaction. La deuxième cybernétique s'intéresse aux mécanismes de morphogénèse et à l'émergence de nouvelles propriétés à travers des réorganisations spontanées au sein des systèmes (Triclot 2008).

Dans un troisième temps, la mise au point des systèmes experts cherche à reproduire les raisonnements spécialisés. Les systèmes experts constituent des programmes

³¹ Le Larousse donne à homéostasie la définition suivante : « Processus de régulation par lequel l'organisme maintient les différentes constantes du milieu intérieur (ensemble des liquides de l'organisme) entre les limites des valeurs normales. Caractéristique d'un écosystème qui résiste aux changements (perturbations) et conserve un état d'équilibre ».

destinés à simuler la prise de décision par une machine en s'appuyant sur un formalisme de « haut niveau », c'est-à-dire en mettant en œuvre des langages de programmation utilisant des mots usuels des langues naturelles et des symboles mathématiques familiers. Ces systèmes constituent des outils d'aide à la décision, et ils sont censés reproduire les mécanismes cognitifs d'un expert en s'appuyant sur un ensemble de faits et de règles explicitement décrits. L'objectif est de donner à la machine des capacités abstraites et logiques en envisageant un traitement de symboles capables de décrire les représentations du monde, en transformant les connaissances spécialisées d'un domaine en un ensemble de propositions déclaratives, formulées dans un langage naturel. Initié avec les travaux d'Herbert Simon dans les années 1950, cette approche retrouve une actualité dans les années 1980 avec l'augmentation des capacités de calcul des ordinateurs (Cardon, Cointet, et Mazières 2018). Cette approche *symbolique* et computationnelle de la cybernétique et de *l'intelligence artificielle* s'oppose aux propositions *connexionnistes* qui s'intéressent à des mécanismes probabilistes et distribués pour approcher les processus de raisonnement. Ce sont ces démarches que nous allons maintenant cerner.

2.5.2. *Émergence et auto-organisation*

Les approches génératives se réfèrent aux activités qui mobilisent une grammaire de forme, un programme informatique, une machine ou d'autres mécanismes procéduraux, dans lesquels ceux-ci présentent un degré d'autonomie dans l'élaboration de la forme finale. Ces mécanismes génératifs fondent leurs développements sur les travaux menés dans le domaine de *l'intelligence artificielle*. Les algorithmes utilisés s'adossent à des principes d'émergence et d'auto-organisation des propriétés d'un système et renvoient aux sciences de la complexité. Cette approche se caractérise par sa dimension non linéaire. Les situations atteintes sont initialement imprévisibles. Ces méthodes trouvent leurs origines dans l'étude et la reproduction des phénomènes naturels. Les outils computationnels ont ouvert la voie à un encodage des comportements naturels, ils ont permis de reproduire l'émergence des propriétés d'un système à travers la simulation des interactions au sein d'une population d'agents, de réseaux de neurones ou à travers des évolutions phylogénétiques.

Il existe plusieurs algorithmes qui peuvent être convoqués à des fins génératives. Parmi les plus répandus nous pouvons citer les *L-systems* et de manière générale l'ensemble

des *Système à Fonction Itérative*. Les *Grammaires de forme*, les *Automates Cellulaires*, les *Agents* et *Réseaux de Neurones* ainsi que les *Algorithmes Evolutionnaires* et *Génétiques* complètent cette famille. John von Neumann (1903-1957) et Stanislaw Ulam (1909-1984) mettent au point dans les années 1940 le premier *automate cellulaire*, en 1970 John Conway invente un automate cellulaire à deux dimensions et deux états, qu'il dénomme « jeu de la vie ». L'usage des automates cellulaires est appliqué, par exemple, à la géographie ou à l'urbanisme pour décrire une structure urbaine et envisager son développement (Badariotti, Banos, et Moreno 2007; Batty 2009). Les *L-systems* sont mis au point par Aristid Lindenmayer (1952-1989) pour modéliser la croissance des plantes. Cette approche facilite la génération de formes à partir de la définition d'une condition initiale, d'au minimum une règle de transformation et d'un nombre de transformations. La Figure 9 montre la génération d'une série d'arborescence, pour chacun nous trouvons l'expression de la condition initiale et des règles de transformation. Chaque symbole est associé à une transcription géométrique. L'ordinateur est envisagé comme un générateur de formes qui accompagne le processus créatif. Ce formalisme est appliqué par exemple à l'analyse fractale des structures urbaines (Frankhauser 1990), à la génération de plans d'habitation reprenant des principes de composition de Palladio (G Stiny et Mitchell 1978; Benrós, Duarte, et Hanna 2012) ou accompagne les recherches de Peter Eisenman (Meier 2019).

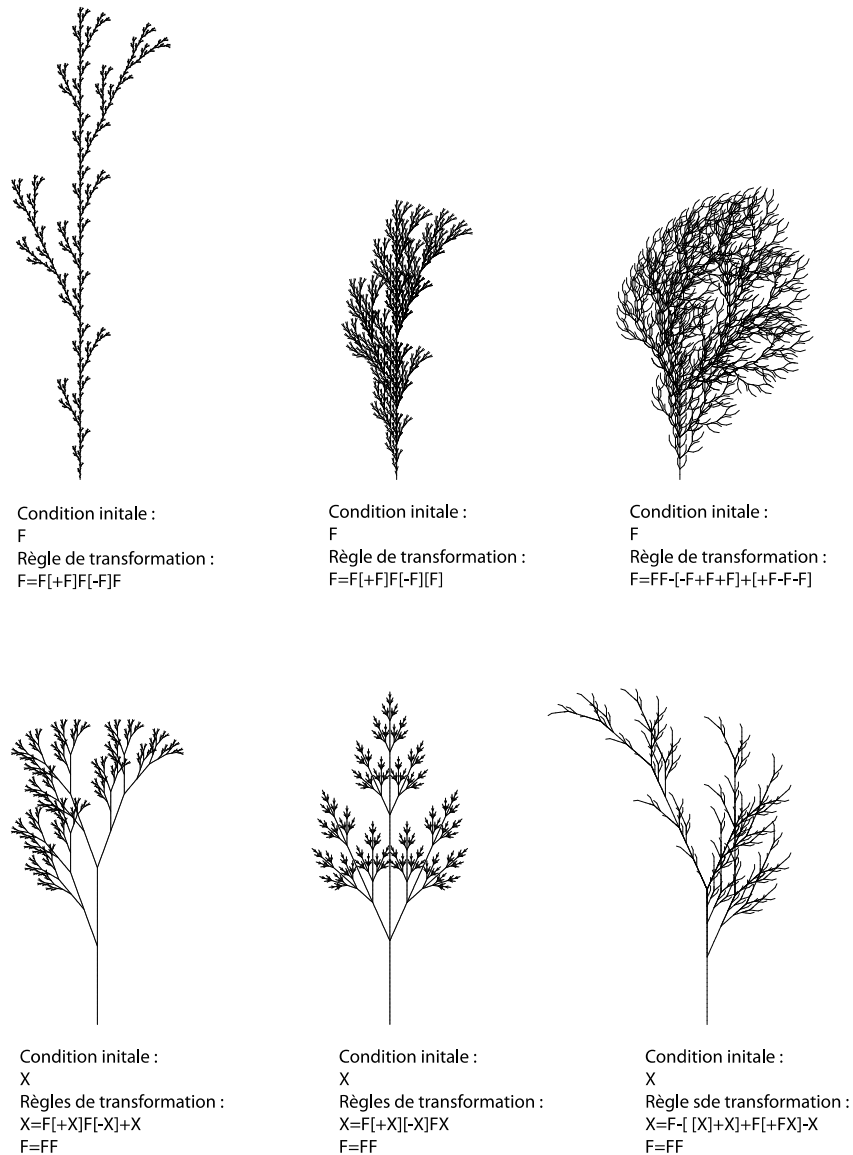


Figure 9. Exemple de L-system, réalisé avec Grasshopper, extension Rabbit de Morphocode

2.5.3. Des algorithmes au raisonnement inductif

Les techniques de l'intelligence artificielle mettent en œuvre et combinent des processus stochastiques ou des raisonnements basés sur des corrélations ou des statistiques, elles permettent de résoudre un problème complexe sans avoir à établir l'ensemble des règles de traitement. Dans le champ de l'architecture ces méthodes ont été principalement utilisées pour la génération ou la reconnaissance de formes, l'exploration de l'espace des solutions, l'optimisation ou la catégorisation des solutions. Aujourd'hui leurs usages s'élargissent aux domaines de la fabrication

robotisée, aux environnements interactifs, ou s'appliquent à des échelles urbaines.

Algorithme évolutionnaire :

Dans les années 1960-70, quatre familles d'algorithmes sont mises au point : Les *stratégies d'évolution*, la *programmation évolutionnaire*, la *programmation génétique* (Kosa et al. 1999; Coates 1996; Coates, Broughton, et Jackson 1999) et les *algorithmes génétiques* (Holland 1992; M. Mitchell 1996). Leurs fonctionnements se calquent sur la théorie de l'évolution naturelle formulée par Darwin, ils constituent des métaheuristiques d'optimisation, basée sur des processus stochastiques itératifs, ils sont utilisés pour résoudre des problèmes d'optimisation difficile. Ces algorithmes passent par une distinction entre le *génotype*, qui constitue la description encodée de l'individu, sur lequel s'opèrent les manipulations de croisement et de mutation, et le *phénotype* qui révèle la traduction du gène. Les objectifs à atteindre sont exprimés à l'aide de fonctions *objectifs*. Les *biomorph* de Richard Dawkins présentent des premières illustrations de génération de formes à travers des croisements et mutations successives (Dawkins 1986), Gero (Gero et Kasakov 1996) et Coates (Coates 2010) l'ont appliqué à la conception urbaine, Caldas (Caldas 2001) et Hensel (Hensel, Menges, et Weinstock 2010) à la génération de formes architecturales, l'auteur a proposé d'intégrer dans les boucles évolutionnaires des contraintes « solaires passives » (Marin, Bignon, et Lequay 2009) .

Une autre expérimentation de mise en œuvre d'un algorithme génétique est illustrée par les Figure 10 et Figure 11. Le travail porte sur la conception générative d'un verre à vin. Les caractéristiques du profil de la forme en révolution sont traduites à l'aide du dessin d'une courbe nurbs. Les positions des points de contrôle de la courbe évoluent à l'intérieur d'un intervalle prédéfini. Cette modification de la courbe génératrice transforme les qualités du récipient. Des fonctions objectives sont définies pour orienter l'exploration de l'espace des solutions et privilégier celles dont la morphologie est compatible avec la fonction du verre à vin : un volume de *calice* souhaité, une surface de contact entre le liquide et l'air, un volume du *nez* favorisant la diffusion des effluves. Une population ordonnée de verres est générée (Figure 11).

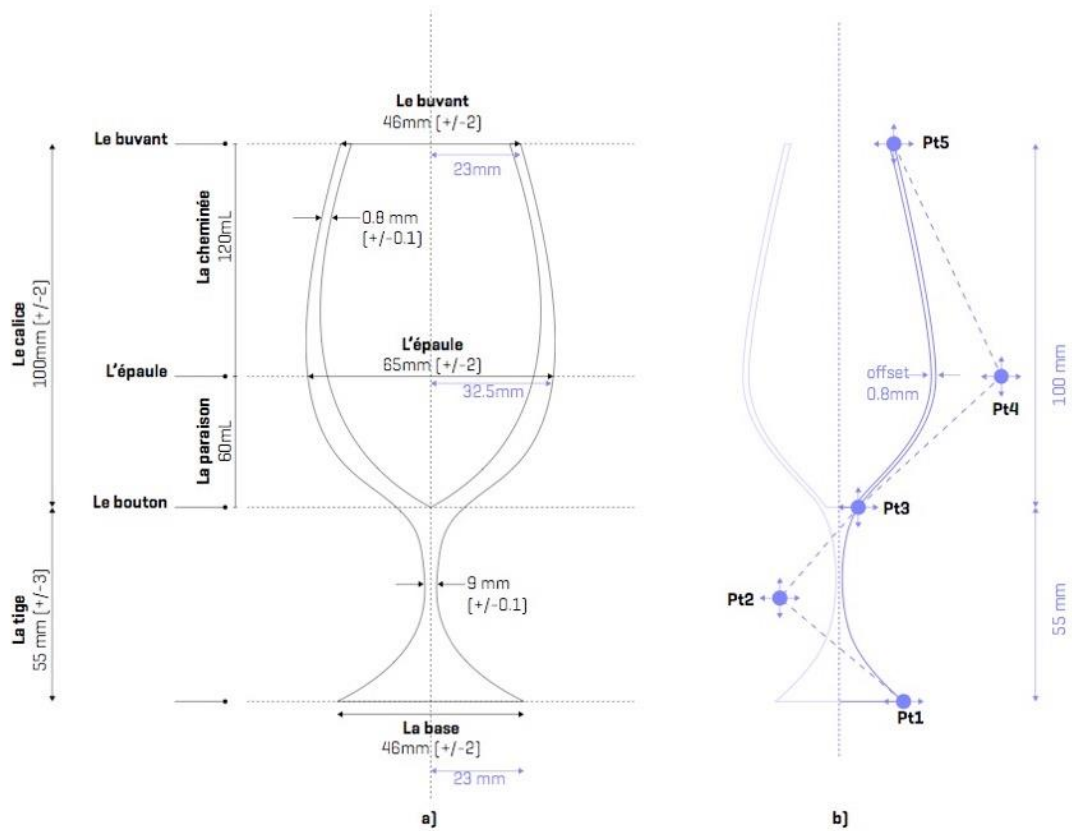


Figure 10. Principe de paramétrisation du verre pour la génération et l'optimisation à l'aide d'un algorithme génétique. a) éléments constitutifs du verre, terminologie du verre et dimensionnements du modèle INAO. b) transcription paramétrique du profil du verre, travaux de l'auteur, 2018

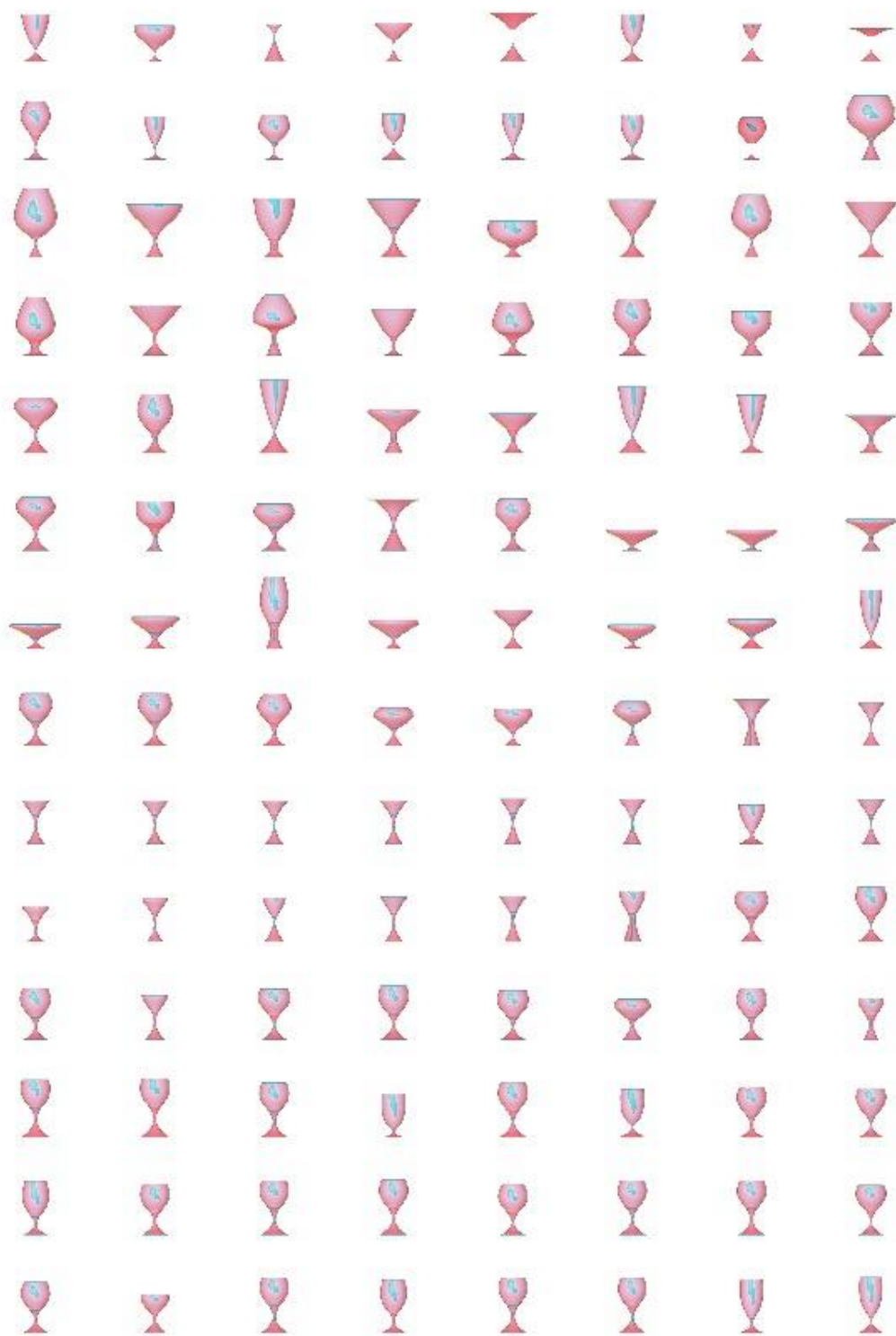


Figure 11. Génération d'une population de verres à l'aide d'un algorithme génétique. Travaux de l'auteur, 2018

Au début des années 2000 les *algorithmes génétiques interactifs* (IGA) font leurs apparitions, ils intègrent dans le processus de sélection une interaction humaine qui

peut ainsi orienter l'évolution des populations dans une direction privilégiée. L'usage de ces outils au sein de processus de conception créatif a été notamment exploré par les équipes du laboratoire MAP³² à l'occasion du programme de recherche Eco-Conception-Générative (Marin et al. 2012) (Figure 12). Ces travaux visent à développer des outils évolutionnaires interactifs pour caractériser les modalités de collaboration entre la machine et le concepteur dans une perspective de conception créative. Un second exemple récent d'IGA est mis en œuvre dans le projet *Biomorpher* (J. Harding et Brandt-Olsen 2018) il propose une solution intégrée à l'environnement de conception paramétrique *Grasshopper*, et permet de définir l'espace paramétrique à explorer, les fonctions d'optimisation à atteindre et offre des fonctionnalités d'interaction homme-machine pour guider et orienter les sélections et mutations des individus au fil du processus évolutionnaire.



Figure 12. Interface de l'outil de conception évolutionnaire Éco-Conception Générative, projet ANR, équipe du laboratoire MAP CNRS-MCC

³² Laboratoire MAP UMR CNRS-MCC 3495

Les réseaux de neurones

Un second groupe d'algorithmes constitue le domaine de l'intelligence artificielle, il rassemble l'ensemble des approches à base d'agents et notamment les réseaux de neurones. Ces algorithmes reposent sur la modélisation mathématique d'un réseau de neurones. Le neurone utilise des valeurs en entrée pour leur appliquer un poids et produire une somme qui à partir d'un certain niveau active le neurone. Ce fonctionnement constitue un modèle formel de *neurone artificiel à seuil binaire*, il est appelé *perceptron*, il définit un état synaptique en fonction de la somme pondérée des valeurs d'entrée (Figure 13 et Figure 14). L'évaluation de l'erreur en sortie devient une nouvelle entrée et constitue un *feedback négatif*, rendant le système adaptatif. Ce sont les poids des pondérations qui sont les paramètres ajustables, le but de l'apprentissage est de trouver les valeurs qui donnent les bonnes réponses dans la phase d'apprentissage, et qui pourraient convenir pendant la phase de test. La machine a la capacité de s'adapter de manière inductive sans avoir une connaissance des concepts et des représentations qu'elle manipule. Il n'y a pas une programmation d'un modèle mais plutôt la constitution d'un réseau d'entités élémentaires dont les pondérations évoluent en fonction des données en entrée et en sortie. Le système de représentation des données prend une forme purement numérique, celle d'un vecteur³³, sur lesquels sont appliquées des calculs statistiques. L'apprentissage s'opère progressivement de manière supervisée, en utilisant des informations annotées, ou de manière non-supervisée³⁴ (Jackson 2018).

Ces démarches caractérisent une approche *connexionniste* qui envisage les activités de la pensée comme une forme de calcul parallèle de fonctions élémentaires. Celles-ci sont réparties au sein du réseau et les propriétés émergentes du système se constituent à travers ses interactions locales. Cette vision s'oppose au courant *symbolique*, fortement instigateur des systèmes experts, et qui privilégie les activités de calcul sur des symboles portant des valeurs sémantiques et permettant de manipuler des représentations de haut niveau (Cardon, Cointet, et Mazières 2018). Les chercheurs en intelligence artificielle, et particulièrement en matière de réseaux de neurones, ne programment pas les règles qui permettent de résoudre un problème mais utilisent les

³³ Nous utiliserons le terme de *vectorisation* pour faire référence à ces descriptions mathématiques du monde.

³⁴ Différentes méthodes sont explorées pour réaliser ces apprentissages à partir d'importants corpus de données. Pour en citer quelques uns, ces algorithmes s'instituent *Artificial Neural Network (ANN)*, *Deep Neural Network (DNN)*, *Generative Adversarial Neural Network (GAN)*, *Recurrent Neural Network (RNN)*.

fonctionnalités d'apprentissage des machines, pour progressivement constituer un programme capable de traiter intelligemment des quantités importantes de données. Les règles ne sont pas écrites, la procédure de traitement des données se construit progressivement à travers l'apprentissage de l'algorithme.

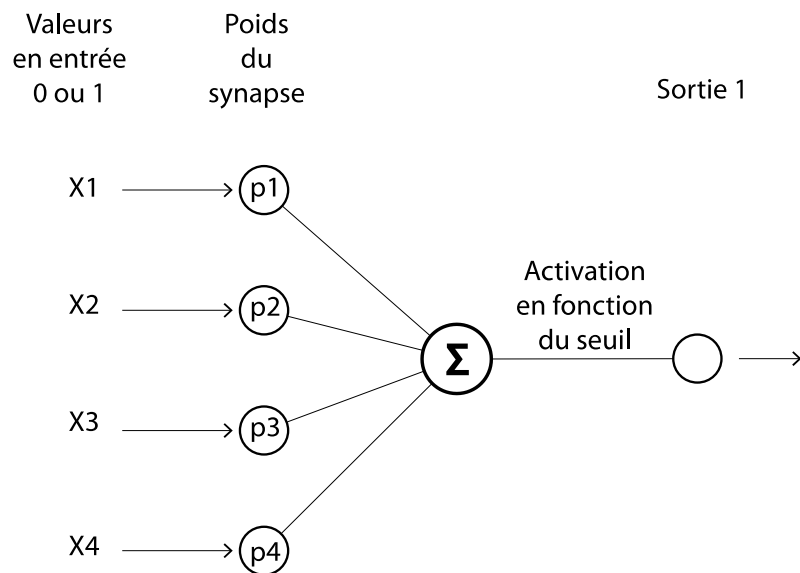


Figure 13. Modèle perceptron, activation de la synapse en fonction du résultat de la somme pondérée des valeurs d'entrée.

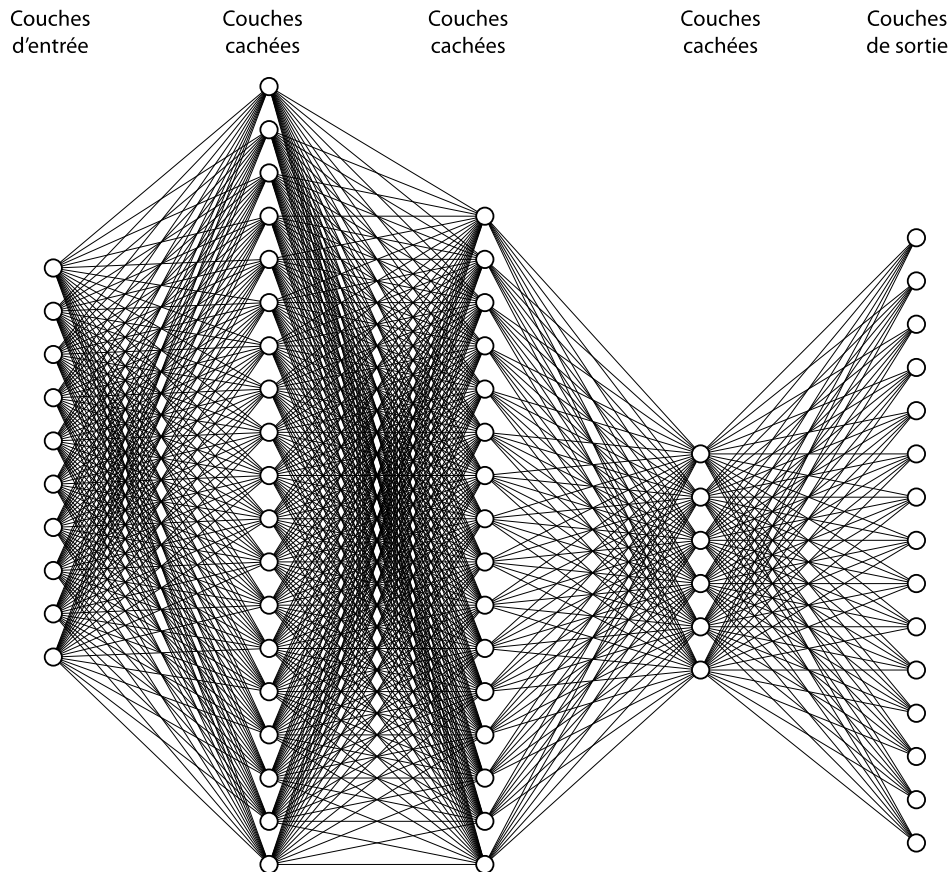


Figure 14. Réseau de neurones, perceptron multicouches, illustration de l'auteur

2.6 PREEMINENCE DU FLUX INFORMATIONNEL

2.6.1. *La modélisation paramétrique adaptative*

Nous proposons ici de porter un regard sur les limites et les prolongements des instrumentations paramétriques. Celles-ci caractérisent un basculement qui va d'une pensée de la forme finale vers une pensée processuelle du projet (Oxman 2006). Cependant ces modes d'instrumentation présentent des limites. John Harding (J. E. Harding et Shepherd 2017) identifie les avantages et les inconvénients entre les approches explicites, basées sur une description paramétrique, et les approches implicites ou inductives, fondées sur des processus génératifs. L'interface proposée par les modeleurs paramétriques de type *Grasshopper* offre des fonctionnalités de programmation visuelle dont la représentation passe par la construction de graphes,

appelés *graphes orientés acycliques*³⁵ (GOA), ces derniers constituent un réseau, reliant, paramètres, fonctions, objets géométriques ou mathématiques, et dont la topologie peut difficilement évoluer. Ce formalisme permet de conserver l'historique de la construction géométrique de l'objet, il est associatif et hiérarchique, mais ne permet pas la construction de circuits ou de boucles. Une bonne structuration du modèle peut permettre son partage ou sa réutilisation, mais la complexité du graphe peut rapidement croître et sa facilité d'évolution ou de transformation s'en trouve réduite. De plus l'espace des solutions est limité à l'explicitation paramétrique mise en place par le concepteur, aucune nouveauté ou divergence ne peut apparaître en dehors de cet espace.

Les approches génératives, quant à elles, favorisent une exploration plus large, une légère modification des règles ou du gène, peuvent engendrer d'importantes transformations phénotypiques. Mais ces algorithmes fonctionnent souvent comme une « boîte noire » pour le concepteur, les effets des modifications restent difficilement compréhensibles. L'auteur, John Harding (J. E. Harding et Shepherd 2017), propose un processus qualifié de *meta-paramétrique*. Il vise la construction générative des modèles paramétriques. La méthode s'appuie sur les principes de la *programmation génétique*, pour générer automatiquement des graphes paramétriques cohérents. Cette hybridation des approches paramétriques et génératives paraît intéressante pour accompagner une pensée divergente dans une phase initiale de conception.

Par ailleurs, Mette Thomsen (Thomsen 2016) propose la notion de *modélisation paramétrique adaptative*. Elle situe ses réflexions dans le cadre de modélisations complexes qui intègrent des contraintes de fabrication, des spécificités de la matière ou des matériaux, qui s'appuient sur diverses simulations et qui prennent place au sein d'une activité collaborative mobilisant des compétences et des savoirs variés. Un récent travail de doctorat cherche à définir le cadre méthodologique d'une modélisation paramétrique multi-échelle et composée de plusieurs définitions paramétriques (Poinet 2020). Quatre aspects particuliers doivent concentrer l'attention des concepteurs.

- La distinction des modèles en fonction des niveaux de granulométrie ou des niveaux de détails doit être mise en place. Les modèles peuvent communiquer entre eux mais le concepteur doit également pouvoir les isoler. La

³⁵ Directed Acyclic Graph (DAG).

*clusturisation*³⁶ des fonctions constitue une stratégie d'organisation d'un modèle paramétrique. Il permet la simplification du modèle, cependant ses facilités d'édition et de transformation restent limitées.

- La hiérarchisation du code doit faire l'objet d'une attention particulière. Elle se traduit par la constitution de regroupements en unités logiques, par l'attention portée à la dénomination de ces unités fonctionnelles, ainsi que de leurs endroits de liaison. L'intégration de commentaires au sein du code informatique est une pratique habituelle. Cependant la structure d'un modèle paramétrique ne reprend pas l'organisation classique d'un code informatique, la déclaration des variables ou l'intégration des fonctions s'opèrent au fil du modèle ce qui rend difficile sa structuration.
- Une distinction entre les fonctionnalités de modélisation géométrique et de simulation doit être mise en place. Cette différenciation doit également se faire aux différentes échelles du projet, en isolant par exemple la mise au point du détail constructif, de celle de l'enveloppe générale de l'édifice.
- Le flux de travail³⁷ doit être précisé en envisageant les interfaces de gestion des modèles et de leurs composants. Deux exemples de plateformes intégratives des échanges, dans une situation de conception collaborative, sont les plateformes Speckle³⁸ et BHoM³⁹ (Buildings and Habitats object Model). La Figure 15 présente l'interface du prototype *Layer Explorer*, outil qui permet la visualisation de la structure et des relations entre les calques d'un fichier Rhinoceros (Poinet et al. 2018). La plateforme Aioli⁴⁰, développée par le laboratoire MAP, propose un environnement de documentation et d'annotations sémantiques d'objets patrimoniaux.

Ce regard sur l'outillage numérique de conception donne une vision concrète des enjeux et de la manière dont le *flux informationnel* peut s'organiser.

³⁶ La constitution d'un *cluster* de composants est une fonctionnalités, elle peut se traduire par le regroupement et le compactage de ses composants au sein d'un nouveau composant personnalisé.

³⁷ Traduction de l'expression workflow

³⁸ <https://speckle.works/> consulté en mars 2020, plateforme open source développée dans le cadre du programme InnoChain

³⁹ <https://bhom.xyz> consulté en mars 2020, plateforme open source développée par le bureau d'étude BuroHappold

⁴⁰ <http://www.aioli.cloud/> consulté en février 2020

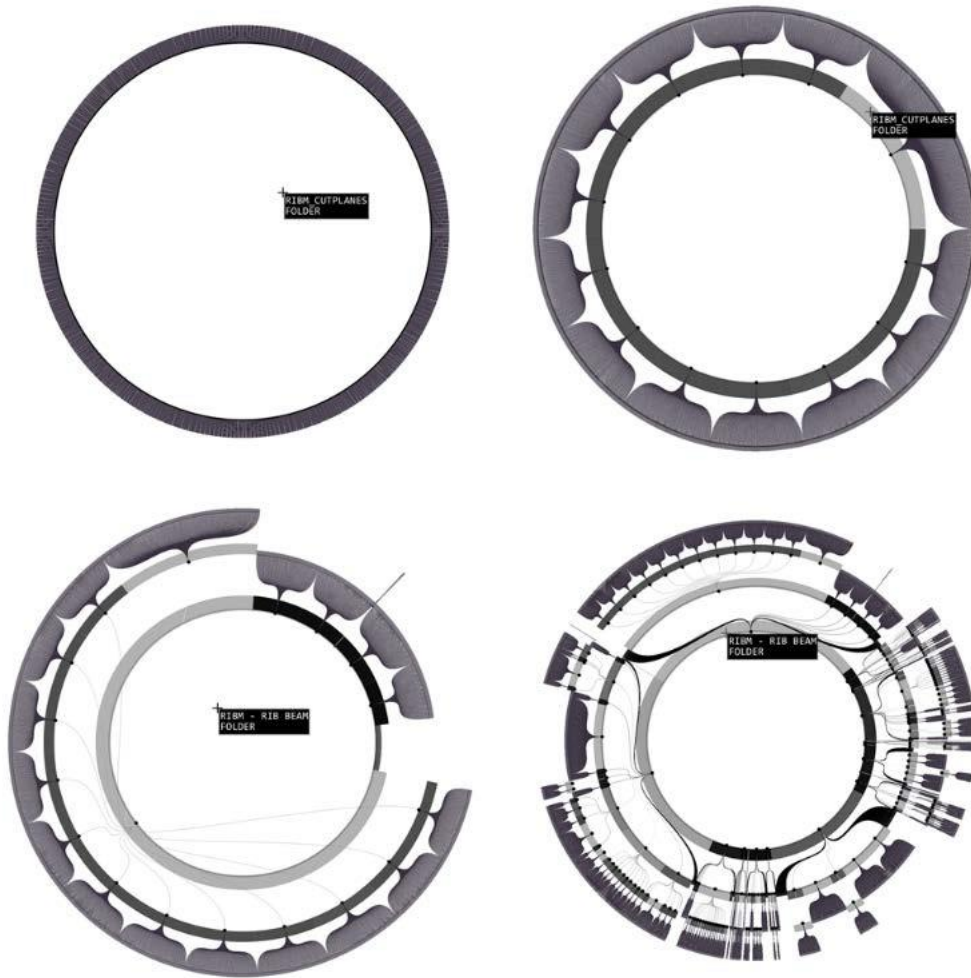


Figure 15. Illustration du projet LayerExplorer, interface de présentation de la structure des calques d'un fichier RhinoCeros (Poinet et al. 2018).

2.6.2. Continuité et discontinuité numériques

Il nous semble maintenant nécessaire de préciser la notion de *continuité* qui est associée aux instrumentations numériques alors que paradoxalement cette technique numérique s'appuie sur une discrétisation binaire des mécanismes, l'unité élémentaire de l'information, appelée bit, pouvant prendre les seules valeurs de 0 ou 1. Le monde numérique se constitue ainsi à travers cette suite alternative d'états discrets, il constitue un système digital, basé sur des mesures à caractère numérique. Le monde physique est analogique, il se caractérise par des valeurs continues, une longueur d'ondes, une tension électrique ou une déformation élastique. Le continu serait alors le propre du monde physique alors que le discontinu se réfère aux processus numériques. Il apparaît cependant un enchevêtrement des notions de continuité et de discontinuité, et nous pouvons nuancer cette distinction. D'une part, la physique quantique nous apprend que

l'état électrostatique d'une particule se décrit par la valeur de son *spin*, celui-ci bascule de manière indéterminée entre des états discrets. Ainsi le monde physique présente des formes de discontinuité. D'autre part *l'architecture non standard* nous révèle un état des connaissances qui nous permet d'envisager une forme de continuum numérique constitué par un flux informationnel.

L'expression *architecture non standard* est étroitement associée à l'exposition éponyme organisée au Centre Georges Pompidou en 2003 sous le commissariat de Frédéric Migayrou. L'exposition et son catalogue proposent une plongée dans un univers de l'architecture étroitement associé à la computation et à une instrumentation numérique de la conception et de la production. Les questions tournent moins autour d'enjeux de représentation que sur l'identification d'un « champ informationnel continu et homogène⁴¹ ». Deux principaux domaines permettent la délimitation terminologique du terme « non standard ».

C'est d'une part une référence aux mathématiques, la notion renvoie à « l'analyse non standard » (*Non Standard Analysis*), formulée notamment par Abraham Robinson dans les années 60. Le terme *standard* évoque des objets mathématiques intelligibles qui se distinguent d'objets *non standard*, ces derniers échappant à notre horizon perceptible. Les mathématiciens proposent ici un formalisme mathématique de l'infiniment grand et de l'infiniment petit. L'analyse « non standard » et le calcul différentiel rendent possible le calcul des nombres dérivés, et définissent ainsi mathématiquement la notion de continuité. La continuité est une propriété topologique d'une fonction, définie par la correspondance entre les variations infinitésimales d'une variable x et de sa valeur $f(x)$. La continuité est associée à la notion de continuum géométrique qui fait référence à une continuité spatiale sur un plan ou dans l'espace. Les travaux de l'avant-garde architecturale des années 1990-2012 ont largement exploré un vocabulaire formel en prise avec des formes de continuité mathématique et géométrique, ces explorations ont conduit à la réalisation de surfaces courbes et continues, révoquant les distinctions classiques entre sol, mur et plafond, elles ont ouvert la voie à une spatialité fluide constituée d'espaces continus (Barrès 2007). A la géométrie rigide du modernisme aurait alors succédé un espace mathématique, constitué par la topologie des anneaux de Möbius, une « géométrie anexacte⁴² », une esthétique de la fluidité et de

⁴¹ Citation de Frédéric Migayrou, Avant Propos du catalogue

⁴² Expression utilisée par Greg Lynn pour exprimer une indétermination de la forme, soumise à l'influence de conditions externes et résistant à une « toute réduction à une forme idéale » (Lynn 1998).

l'indétermination, constituée de boucles et de spirales, évoquant une temporalité non linéaire, un espace-temps interactif et informationnel (Buci-Glucksmann 2008). A la rationalité déterministe puis relativiste, nos rapports au temps et à l'espace se constitueraient maintenant à travers une appréhension « informel » et « informationnel » (Gausa 1997). Celle-ci est constituée de flux, elle est changeante et dynamique, elle se réalise à travers des relations et des interconnexions entre les événements. Il reviendrait alors aux architectes de produire des dispositifs d'action adaptés aux conditions changeantes et que Manuel Gausa caractérise par le facteur « in- ». Celui-ci résume les concepts mobilisés : « in-formation », « in-certitude », « in-détermination », « in-stabilité », « in-cohérence », « in-manence », « in-termittence », « in-teractivité », « in-complétude », « in-finité » et « in-formalité ». Cette *espace-temps-information* est révélateur de nos rapports au monde.

Le second domaine de référence du terme « non standard » renvoie à la question de la norme et de la standardisation dans le contexte de l'industrialisation. L'exposition et son commissaire considèrent ici des modes de production en identifiant les outils de fabrication numérique et le renouvellement des méthodes de production. Les encodages numériques constituent des flux de données qui vont des phases de conception aux étapes de réalisation, de l'agence d'architecture à l'usine⁴³ (*File to factory*), de la modélisation géométrique au pilotage des machines. Cette question de la norme et du standard interroge les modes de production, elle porte un regard critique sur l'uniformisation d'une industrie de masse et propose une redéfinition du domaine de production de l'architecture, en mettant en valeur les techniques de prototypage et de personnalisation. L'ordre rationnel n'est plus seulement celui des conventions traditionnelles de l'architecture mais se trouve défini par des processus algorithmiques, des régulations chaotiques et émergentes.

Cette *architecture non standard* se révèle à travers un vocabulaire formel spécifique, mais celui-ci est avant tout rendu possible par des modalités de conception, des instrumentations numériques et algorithmiques, qui vont de la conception à la fabrication et qui s'étendent à l'instrumentation de l'espace, des objets et des équipements. L'information et la donnée constituent des matériaux de conception, des moyens de production, aussi bien que des vecteurs d'interaction entre les machines et avec les humains. Un continuum numérique se manifeste avec son *flux informationnel*,

⁴³ L'expression anglaise *File to Factory* sera communément utilisée pour caractériser ces processus.

il facilite des approches intégrées et il est rendu possible par la généralisation des technologies numériques à tous les moments de la conception et à tous les acteurs de l'acte de construction.

2.6.3. Logique processuelle et méta-conception

Outillage de la conception

Les travaux que nous portons proposent une réflexion sur les outils de la conception et l'instrumentation des processus. La caractérisation de ces instrumentations a été discutée dès le XX^e siècle par des auteurs comme John Dewey (1859-1952) ou Donald Schön (1930-1997). Ces derniers insistent sur l'imbrication des activités de conceptualisation avec des activités pratiques de manipulation et de fabrication. Des aller-retours qui vont du concret à l'abstrait se constituent, dans des cycles itératifs, pour délimiter le problème, constituer des hypothèses et réaliser des évaluations. Ces mécanismes constituent le processus de conception créatif, en associant réflexion et action, en instituant un dialogue entre le concepteur et la situation de conception, et ils se réalisent avec l'usage d'outils de conception. Ces outillages présentent cinq qualités (Dalsgaard 2017). Ils facilitent la *perception* et la *compréhension*, en révélant des facettes du problème de conception, et parallèlement ils induisent des modes d'exploration qui leurs sont propres. Ils participent à l'acte de conception, en contribuant au développement, à l'évaluation des hypothèses et à l'exploration d'un espace des possibles. Ils permettent l'*externalisation* de la pensée à travers la constitution de représentations diverses et variées. Ils donnent lieu à la constitution d'une *connaissance par l'action*, ici une connaissance nouvelle se constitue en agissant. Et finalement ces outillages supportent des activités de *médiation*, entre les acteurs et les artefacts dans une situation de conception. Il apparaît que les outils offrent, ou imposent, leurs propres potentiels d'action. Le choix du bon outil au bon moment ainsi que la capacité de personnalisation, de mise au point de ses propres outils de conception, se révèlent alors décisifs pour un concepteur.

Donnée, information et connaissance

La description de la chaîne de l'information géographique, proposée par Dao (Dao

2005), nous permet de distinguer les notions de *donnée*, d'*information* et de *connaissance*. Dans un premier temps nous rappelons que l'approche cybernétique, avec la théorie de l'information, portent davantage sur le transfert d'information en tant que signal, sans s'intéresser au sens que porte cette information. Ce signal permet la constitution d'une donnée à travers l'opération de mesure. Une donnée brute est ainsi le résultat d'un enregistrement, elle peut être collectée, stockée et transmise. Une donnée ne contribue pas à la prise de décision, elle reste décontextualisée. Pour qu'une ou plusieurs données soient interprétables, il est nécessaire de les contextualiser, de les trier et de les organiser. Elles porteront alors une signification, elles présenteront des singularités qui pourront alimenter une prise de décision. Une connaissance est le fruit d'une réflexion sur les données analysées. Elle passe par une interprétation du phénomène ou des caractéristiques identifiées, elle mobilise une activité cognitive basée sur un savoir. Cette connaissance peut être objectivée et codifiée ou à l'inverse rester tacite et subjective. Elle implique alors une distance critique, une interprétation créative mobilisant intuition, subjectivité et individualité.

La donnée brute n'est pas structurée, elle doit être organisée et triée, elle doit faire l'objet d'une structuration, puis en mobilisant une connaissance explicitée, des interprétations peuvent s'opérer pour constituer une nouvelle connaissance tacite ou implicite. Celle-ci permet d'évoluer dans le processus de conception ou peut être réutilisée dans d'autres situations de conception. Cette formulation reprend le modèle de connaissance en pyramide intitulé *donnée, information, connaissance, sagesse*⁴⁴ qui explicite la succession des activités cognitives (Ermine, Mouradi, et Brunel 2012). La place que prennent la donnée et l'information pour constituer une connaissance est particulièrement important dans un contexte de production massive de données.

Subjectivité computationnelle et autonomie critique

Dans le contexte de l'instrumentation numérique, le codage est une compétence fondamentale, il autorise la personnalisation et le détournement des outils. Le script, l'algorithme ou la donnée, constituent des matériaux privilégiés pour éclairer un problème de conception, ils sont des moyens de *compréhension, d'exploration, d'externalisation* et de *médiation*. Les connaissances nouvelles se constituent à travers

⁴⁴ Traduction de l'expression Data, Information, Knowledge, Wisdom (DIKW)

des activités de programmation, de codage, qui donnent forme à des représentations diverses, numériques ou analogiques, tridimensionnelles ou diagrammatiques. Ces techniques pourraient nous donner une plus grande puissance de pensée, participer à la constitution de nos imaginations.

Cette appropriation des savoirs du numérique est pour certains le moyen de faire émerger une « subjectivité computationnelle critique et réflexive » (Berry, Citton, et Masure 2015), mais elle impose l'appropriation par des acteurs agissant de certains aspects de cette culture numérique. La pensée computationnelle devrait rendre capable de comprendre et concevoir le fonctionnement des systèmes numériques. Elle devrait accompagner la compréhension des logiques algorithmiques, en intégrant les principes d'itération, de boucle conditionnelle ou de discrétisation. Elle devrait permettre d'envisager la signification des modèles et des données, des relations entre donnée, information, connaissance, modèle et simulation. Elle devrait entraîner à lire et écrire du code, et conduire à un apprentissage de certains langages de programmation. Et finalement elle pourrait emmener à une esthétique du codage, dans la forme de l'écriture du code mais également dans sa relation aux arts et à la création, en envisageant également la programmation de manière expérimentale.

Dans le champ de l'architecture les savoir-faire en matière de codage ont été exprimés, par exemple, par le bureau d'étude BuroAppold Engineering. Celui-ci identifie quatre catégories de compétences qui vont de la construction simple de modèles à l'aide d'outils de programmation visuelle, de type grasshopper ou dynamo, à une programmation expérimentée à l'aide de langage évolué, du type C#. Cette gradation des compétences et des expertises rend possible les développements des modélisations personnalisées, l'automatisation de certaines tâches, ou la réalisation d'outils sur mesure plus robustes.

Mathématisation et flux informationnel

Les outils numériques imposent une forme de mathématisation et une description explicite de l'objet en conception. Dans ce contexte, le projet n'est plus formel mais devient processuel. La particularité de ces dispositifs repose sur le fait que le concepteur ne manipule pas l'objet en cours de conception mais le système génératif. Le rôle du concepteur bascule vers celui d'un méta-concepteur. Avec l'avènement des technologies numériques dans le champ de la conception, le rôle du designer s'est

transformé. Du concepteur créateur d'une œuvre, d'une solution unique, on assiste aujourd'hui à l'émergence d'un méta-concepteur créateur d'un ensemble élargi de solutions répondant aux contraintes du problème (Marin et Bignon 2013). Le concepteur ne travaille plus à l'élaboration d'un objet exclusif, mais plutôt à la conception d'une famille de formes, dont la solution retenue représentera un état significatif au sein de cet ensemble de potentialités. Le concepteur ne dessine plus un objet mais un système d'objets possibles, une machine à explorer les virtualités.

Si la forme issue des mécanismes génératifs est virtuelle, sans matériaux tangibles ou systèmes structurels familiers, les récents développements des techniques de fabrication numérique facilitent la matérialisation et la construction de formes complexes. La notion d'invariant par variation, proposée par Deleuze (Deleuze 1988), illustre cette re-conceptualisation de la forme associée à une transformation des modes de fabrication.

« C'est une conception très moderne de l'objet technologique : elle ne renvoie même pas aux débuts de l'ère industrielle ou l'idée de standard maintenait encore un semblant d'essence et imposait une loi de constance (l'objet produit par les masses et pour les masses), mais à notre situation actuelle quand une fluctuation de la norme remplace la permanence d'une loi, quand l'objet prend place dans un continuum par variation quand la productique ou la machine à commande numérique se substitue à l'emboutissement. Le nouveau statut de l'objet ne rapporte plus celui-ci à un moule spatiale, c'est à dire à un rapport forme matière, mais à une modulation temporelle qui implique une mise en variation continue de la matière autant qu'un développement continue de la forme ». (Deleuze 1988)

Cette nouvelle logique de production déplace la définition de la forme vers celle du processus. La virtualisation de la forme architecturale et sa déformation incrémentielle deviennent le concept sous-jacent d'un bâtiment dans lequel le flux numérique et les surfaces manipulées virtuellement se traduisent en une forme construite.

La définition du flux informationnel, ses données, sa structure et son traitement, constitue un élément central de la mise au point de l'outil numérique de conception qui

représente le support privilégié du processus d'élaboration du projet. Ce *flux informationnel* est propre à chaque situation et la compétence du concepteur repose sur sa capacité à mettre en œuvre un système numérique de traitement de ce flux. Le système de conception, cette machine à explorer des virtualités, peut prendre corps au sein des modeleurs paramétriques en intégrant des fonctions, des extensions, des moteurs de simulation, en envisageant les modes de traitements des informations. Celles-ci constituent des flux de données, elles sont de natures variées, elles peuvent alimenter des processus génératifs, elles s'appliquent à différentes échelles et à différents moments du projet. Cette approche tend à reconsidérer les enjeux d'interopérabilité pour privilégier un transfert des informations dans une forme de flux de données. Les outils récents de modélisation paramétrique rendent possibles de telles instrumentations.

2.7 CONCLUSION

Dans ce volet, nous avons donné une épaisseur historique aux techniques numériques, en montrant comment progressivement des méthodes d'automatisation et de programmation se mettent en place, de la clepsydre aux activités de programmation en passant par la mise au point des cartes perforées. Un encodage du raisonnement s'opère à partir des premières formes d'algébrisation jusqu'à la mise au point d'algorithmes inductifs et de l'intelligence artificielle. La notion d'*information* est devenue à partir des travaux de la cybernétique un mécanisme de transmission et de transcription, elle est le vecteur des interactions et des morphogénèses. En architecture, cet encodage germe dès la renaissance avec une pensée proto-paramétrique, puis trouve au XX^e siècle un terreau propice à son développement. La démocratisation de l'informatique, avec l'intégration de fonctionnalités mathématiques, géométriques et d'interactions, permet la réalisation d'outils de modélisation paramétrique et génératif, elle rend possible l'exécution de simulations, et elle adosse la conception numérique à des questions de performance créative tout en tissant des relations avec la fabrication. Ces instrumentations impliquent des descriptions univoques, des mathématisations, des approches processuelles. L'outil informatique est considéré comme une machine à explorer des virtualités et un principe de *continuum* numérique s'installe. Les travaux plus récents révèlent le basculement d'une logique d'interopérabilité vers la mise en place de *flux informationnels continus*.

Dans cette partie nous portons un regard sur la visualisation de l'information. Nous organisons notre analyse autour de trois chapitres. La première traite de l'émergence des nouvelles formes de cartographie que nous qualifions de *néo-cartographie*. Nous rappelons les enjeux qui lui sont associés avant de s'intéresser à la naissance des instruments numériques du domaine, à travers les systèmes d'information géographique et la géomatique. Nous reprenons les concepts de la *graphique* et les spécificité d'une *pensée diagrammatique*. Nous associons ensuite ces démarches, ces productions cartographiques et diagrammatiques, à une pensée de la ville comprise en tant que métabolisme.

Dans un second chapitre nous notons l'importance que prennent les *données* dans les formes de descriptions géographiques. Nous regardons les défis et transformations méthodologiques que posent les *méga-données* et nous envisageons leurs productions dans le contexte de la *ville intelligente*. Cette dernière constitue un environnement informé et informant, dans lequel prennent place des pratiques émergentes et des formes d'intelligence collectives, mais qui révèle également les risques d'un « monitoring » optimisé et dirigé par une *datafication* du réel.

Dans un troisième chapitre, nous nous arrêtons sur le domaine de la *visualisation de l'information*. Nous en donnons une définition plus précise et nous décrivons différents projets remarquables. Finalement nous considérons plus particulièrement les techniques et les concepts manipulés lors de la construction de ces représentations. Cette dernière partie sert de guide technique à la mise en œuvre de néo-cartographies numériques.

3.1 ÉMERGENCE D'UNE NEO-CARTOGRAPHIE

3.1.1. *La cartographie*

La cartographie porte moins sur la constitution d'un miroir de la réalité que sur un moyen de compréhension, de conception et de fabrication de l'espace en révélant ses potentialités. Jean-François Coulais rappelle que l'image est un « système de relation et de compréhension du monde » (Coulais 2015). L'image se construit à l'aide d'instruments, certains sont utilisés pour capter et d'autres pour calculer et représenter.

Les externalisations associées aux outils modifient nos schèmes perceptifs et les « visibilités calculées » sont le résultat de l'usage de l'outil et du travail du concepteur. Ainsi les représentations cartographiques sont considérées comme un moyen de conception, de création et d'invention. Elles rendent concrète des intentions et sont le support d'une activité de projet.

Dans cette perspective, ce n'est pas la représentation de ce qui est déjà connu qui va intéresser le concepteur mais plus l'expression des potentiels et des réalités impensées. Ce ne sont pas seulement l'expression de ce qui est déjà là, ou l'identification des attributs physiques (réseaux hydrologiques, viaires ou bâtis) du terrain, mais aussi l'identification des forces invisibles présentes sur le territoire ou le site qui sont identifiées et représentées. Celles-ci se constituent à travers l'identification des phénomènes naturels, ensoleillement ou mouvement d'air, des événements socio-historiques, des questions économiques et administratives, ou encore des enjeux de biodiversité (Corner 1999). C'est un ensemble de forces, visibles et invisibles, matérielles et immatérielles, naturelles et culturelles, compris dans sa complexité et sa dynamique qui permet de révéler les potentialités et les dimensions inconnues d'un territoire. L'activité de cartographe implique des choix d'échelle, d'orientation ou encore de projection, elle passe par des opérations de sélection, de nommage, de tri, de schématisation, de géométrisation. Ces activités s'appuient sur des méthodes quantitatives, statistiques et analytiques tout aussi bien que sur des considérations esthétiques et visuelles. L'activité de cartographe est en elle-même une activité de projet dans sa réalisation. La carte n'est pas neutre ou passive mais elle est un acte de création et de conception, sa réalisation participe aux activités d'exploration des possibles, de formulation d'hypothèses et de propositions, elle facilite l'anticipation de l'effet des choix réalisés par le concepteur.

Les qualités de cet instrument, de cet outil de conception, contribuent à appréhender l'espace dans sa dynamique. Une dynamique qui est d'une part temporelle, avec la prise en compte des évolutions, des transformations ou des rythmes, avec l'appréhension des mouvements et des déplacements, mais également systémique, à travers l'identification des interrelations existantes au sein des composants des systèmes complexes, naturels et artificiels, qui habitent le monde. La carte n'est plus une représentation fixe mais un état provisoire d'un territoire.

3.1.2. *Système d'Information Géographique et géomatique*

Le développement des techniques de cartographie durant le XX^e siècle est étroitement associé à l'apparition des systèmes de calcul automatisé, des ordinateurs et des procédures computationnelles. Celles-ci prennent progressivement la forme de logiciels, de langages de programmation, de techniques de stockage et de structuration de bases de données. Ces développements sont soutenus par différents programmes nationaux notamment en Amérique du nord à travers des financements militaires et cette géodésie naissante est issue pour partie de la guerre froide (Desbois 2016). Dès les années 50, par exemple, le projet SAGE (*Semi-Autonomous Ground Environment*), compose un système de défense à travers la constitution d'un réseau de radars, censé détecter automatiquement un mouvement aérien hostile, centraliser les informations pour commander et coordonner une réponse militaire. Un des volets du dispositif établit une représentation cartographique en temps réel de la position des forces aériennes. Dans les années 1960, l'un des premiers Système d'Information Géographique (SIG) est développé au Canada. Le *Canada Geographic Information System* (CGIS) naît d'une collaboration entre services gouvernementaux et entreprises privées, il a notamment pour objectif d'établir un inventaire des ressources naturelles du pays. Il donne lieu à la mise au point de techniques de relevé laser, de vectorisation des images ou de stockage des informations numérisées. A l'université d'Harvard, le *Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis* (LCGSA) est fondée en 1965 par Howard Fisher (1903-1979). Celui-ci travaille au programme SYMAP (*SYnagraphic MAPping*) dont la caractéristique repose sur la possibilité, non seulement de représenter le territoire à travers une décomposition de ces composantes, mais également de manipuler ces variables dans un même environnement graphique. Cet outil facilite ainsi les activités de conception, en construisant des représentations nouvelles, en permettant des traitements graphiques, en élaborant des visualisations stratégiques. La représentation visuelle des données devient centrale dans les activités de planification urbaine, paysagère et architecturale (Monchaux 2016). En 1969, l'un des membres associés du LCGSA, Jack Dangermond (1945-), fonde le *Environmental System Research Institut* (ESRI) qui reste aujourd'hui encore un acteur majeur de l'édition des logiciels géographiques. Progressivement des standards de description sont établis et des sociétés savantes s'organisent. Durant les années 70-80 plusieurs campagnes de relevé sont financées par les gouvernements nord-américains et européens (Waters 2017).

Le terme de *géomatique* est proposé par Bernard Dubuisson, géomètre et photogrammètre français, il décrit avec ce néologisme l'intégration des techniques informatiques et des sciences de la géographie, pour acquérir, stocker, traiter et diffuser des informations à références spatiales. La description des activités humaines et des phénomènes naturels s'appuie sur la manipulation d'informations. Celles-ci font l'objet de traitement de deux types. L'un sémantique, il offre une description des attributs de l'objet, et l'autre géométrique, il permet de spécifier une forme et une localisation.

Initialement intégré à des systèmes centralisés de production et de gestion de l'information, les méthodologies SIG se trouvent depuis la fin des années 1990 associées à des pratiques participatives (*Public Participation in GIS* (PPGIS)). Ces approches se caractérisent par des démarches moins quantitatives et elles mobilisent les habitants dans la cartographie de leur cadre de vie. Depuis le début des années 2000, ces pratiques cartographiques se renforcent avec l'activité de cartographes volontaires rassemblés en communautés de passionnés ou d'utilisateurs. L'information géographique proposée par un volontaire (*Volunteered Geographic Information* (VGI)) se démocratise avec l'usage des outils de cartographie en ligne (*web-based mapping*), comme *OpenStreetMap*, *OpenImageMap* ou *Google Earth*, avec les techniques de géolocalisation (*Global Positioning System*, (GPS)) ou avec l'informatique en nuage (*cloud computing*) (Waters 2017). Une forme de néo-cartographie ou de néo-géomatique émerge en s'appuyant sur les techniques de communication et d'information. Nous distinguons les outils de *cartographie en ligne* (*webmapping*), des *web SIG*. Les premiers limitent leurs fonctionnalités à des opérations d'affichage de données géo-référencées et distribuées via le réseau internet et proposent une interface web de consultation. Les *web SIG* sont des solutions plus riches permettant d'acquérir, d'analyser et d'afficher des données, ces outils intègrent certaines des fonctionnalités des logiciels SIG traditionnels, en s'appuyant sur un fonctionnement en réseau et en exploitant les langages de programmation du web (javascript par exemple). D'autres expérimentations proposent des outils participatifs en s'appuyant sur les fonctionnalités des modeleurs paramétriques et exploitent les fonctionnalités d'interaction avec les données urbaines pour envisager un processus d'urbanisme participatif (Schulz et al. 2018).

3.1.3. *La graphique*

Pour compléter la délimitation de la notion de cartographie, il nous paraît nécessaire de faire référence à Jacques Bertin (1918-2010), fameux représentant de la sémiologie graphique. Jacques Bertin fonde en 1957, à l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales de Paris (EHESS), le Laboratoire de Cartographie, qui deviendra rapidement le Laboratoire de Graphique. Acteur majeur des recherches en matière de visualisation des données, il synthétise ces travaux dans un ouvrage intitulé *Sémiologie Graphique* (Bertin 1967). La *graphique* constitue une science de la représentation visuelle des informations, elle se distingue du graphisme. Elle « utilise les propriétés du plan pour faire apparaître les relations de ressemblance, d'ordre ou de proportionnalité entre des ensembles de données⁴⁵ ». La *graphique* s'intéresse principalement aux relations de ressemblance, d'ordonnement et de proximité entre des signes. Elle est un système de signes qui constitue des *diagrammes*, des *réseaux* ou des *cartes*. Nous précisons cette typologie.

Une *carte* géographique reproduit la disposition d'éléments à la surface de la terre. Ce rapport analogique présente un double avantage, il fournit une information de proximité et il constitue une forme de référence. La carte permet ainsi d'introduire une information externe qui facilite l'interprétation et la décision.

Les *diagrammes* caractérisent la mise en relation de plusieurs ensembles d'éléments, sans nécessairement conserver des relations de proximités géométriques. Les relations construites entre les éléments d'un seul ensemble construisent quant à eux un *réseau* (Bertin 1977).

Les *cartes*, les *réseaux* et les *diagrammes* sont des moyens privilégiés de découvrir des structures et des organisations au sein des ensembles de données. Nous reviendrons dans le chapitre intitulé *techniques de cartographie* sur les apports de la *graphique* à la mise en forme de l'information, en considérant un ensemble de règles, contraintes, intérêts et limites formulés par Bertin pour guider la réalisation d'une représentation visuelle.

⁴⁵ Citation tirée de l'ouvrage précédemment référencé.

3.1.4. *Pensée diagrammatique et processus virtuels*

En architecture, la notion de diagramme prend une place et des formes particulières, elle présente des caractéristiques singulières et opère comme un outil de la pensée et du projet. Dans l'introduction de l'ouvrage *The Diagrams of Architecture*, Mark Garcia (Garcia 2009) revient sur la longue histoire que le diagramme entretient avec l'architecture. Il insiste sur la pluralité des formes du diagramme. Celui-ci peut se constituer à travers des dessins, des illustrations, des visualisations variées, des modèles analogiques ou des cartes. Il est particulièrement adapté pour exprimer les flux ou les phénomènes inscrits dans une temporalité ou au sein de cycles. Il facilite l'expression des processus organiques de croissance ou d'auto-organisation. Il peut être objectif ou subjectif. Le diagramme opère une spatialisation des concepts à travers l'abstraction sélective des idées ou des phénomènes. Il passe par une décomposition de la complexité pour ensuite permettre une recombinaison, ce processus se traduit par une simplification ou une conceptualisation des notions. Il est un outil d'analyse, en servant à décrire des conditions ou des contextes, mais également un outil de génération d'idées et d'imaginaire. Les abstractions prennent formes et restent visuelles et ouvertes aux interprétations et aux métaphores. Le diagramme est un outil support à la production d'idées, il est un vecteur d'investigation et de révélation d'une ossature sur laquelle les idées peuvent se condenser. Les formes d'expressions des idées, et de reformulations qui l'accompagnent, sont ouvertes aux interprétations et constituent des réservoirs de potentialités. Avec des dimensions poétiques il est générateur de nouvelles associations et il participe à la découverte (Bowring et Swaffiel 2009).

La réalisation de diagrammes prend place dans le domaine de la *visualisation d'information*, et nous donnerons dans les paragraphes suivants une définition plus précise de ce champ. Nous notons que des formes nouvelles de diagrammes sont étroitement associées aux médias et aux techniques de représentations numériques (McGrath 2009). Les technologies de captation du réel, d'imagerie satellitaire, de géolocalisation, d'enregistrements des traces urbaines, l'usage des périphériques mobiles, la constitution des méga-données ou encore l'ensemble des techniques de visualisation, constituent des moyens pour envisager de nouvelles formes de diagrammes, plus complexes, interactifs, et actualisés en temps réel. Ces diagrammes participent à la conceptualisation des villes intelligentes, ils offrent une représentation de ces villes faites de flux et d'informations, rendant visible des processus sociaux et

écologiques. Ils sont les moyens et les vecteurs pour concevoir et habiter des villes inscrites à la fois dans des écosystèmes naturels et fortement informationnels.

Les technologies numériques autorisent des formes de représentations, et celles-ci ouvrent la voie à une compréhension des activités humaines en tant que processus dynamiques, évoluant dans le temps et l'espace. Ainsi il apparaît essentiel d'envisager ces technologies en tant que moyen d'émancipation et de transmission de connaissance, plutôt que comme outil de surveillance, d'oppression et de contrôle. Le rôle des architectes porte non seulement sur l'édification du cadre bâti, mais également sur celui de concevoir des processus virtuels qui participent à l'organisation des métabolismes urbains.

3.1.5. Néo-cartographie et métabolisme urbain

Les techniques de cartographie connaissent ces dernières années un renouvellement important à travers le développement des technologies de communication, des méthodes de collecte des données, des plateformes de constitution collaborative ou de mise à disposition des données, ainsi qu'avec l'usage des interfaces de consultation accessibles depuis des périphériques mobiles, et des systèmes de géolocalisation. La carte imprimée sur un support papier a laissé la place à des modes de consultation via des écrans, ils proposent des fonctionnalités de zoom, de géolocalisation, de recherche, de filtre ou de traitement en temps réel d'informations. Cette disparition des représentations imprimées et figées des informations géographiques, au profit d'un affichage interactif des données, contribue à la constitution d'une réalité comprise comme un ensemble d'évènements, de fluctuations ou d'occurrences (Picon 2013b; Ponte 2019). La représentation et l'analyse des réseaux, leurs topologies, les interrelations, la visualisation des données ou encore les rapports relatifs distance-temps, deviennent les critères et les supports des analyses et des modes de compréhension des réalités. Les frontières physiques ou administratives ne sont plus suffisantes pour décrire les limites d'un territoire, celui-ci se comprend au sein d'un système d'interrelations dont les composantes sont multiples et variées. Elles intègrent des dimensions géologiques et topographiques, des emprises administratives ou historiques. Elles s'enrichissent des positionnements au sein de réseaux d'infrastructures, énergétiques ou communicationnelles, ces derniers se constituent à des échelles régionales, continentales, ou même intercontinentales si l'on considère par

exemple le maillage des câbles sous-marins de transport de l'information. Ces maillages constituent des enjeux géopolitiques et socio-économiques de premier ordre. La Figure 16 met en parallèle deux représentations cartographiques dynamiques, construites à partir de données ouvertes, elles sont accessibles depuis un navigateur internet. La première image cartographie un ensemble d'informations météorologiques, la seconde représente la position en temps réel des avions dans le ciel européen. Ces néo cartographies participent à l'appréhension dynamique de nos environnements. Cette compréhension d'un territoire à travers la description de son métabolisme est également illustrée par le projet *Smart about Cities* présenté à l'occasion de la biennale d'architecture de Rotterdam en 2014 qui portait le titre *Urban by Nature* (Hajer et Dassen 2014). Les auteurs présentent une série de cartes et de data visualisations, ils plaident pour un *urbanisme intelligent*, un urbanisme pensé à travers son interconnexion à une échelle globale, tirant avantage des technologies d'information et de communication pour envisager le métabolisme des villes en intégrant des innovations sociales et solidaires. Ce métabolisme territorial se constitue à travers une pluralité de flux, matériels et immatériels, reliant la ville à la nature. C'est le territoire des Pays-Bas qui est considéré et décrit en 10 thématiques : la démographie⁴⁶, la qualité de l'air⁴⁷, la qualité de l'eau, le type de nourriture⁴⁸, la biodiversité, la mobilité⁴⁹, le transport⁵⁰, les matériaux de construction⁵¹, les déchets⁵² et l'énergie⁵³. Ces descriptions donnent à voir un territoire dynamique constitué de flux et d'interrelations, il constitue une forme de métabolisme intégrant des composantes naturelles, humaines et artificielles.

⁴⁶ démographie et migrations

⁴⁷ pollution et zones d'émission

⁴⁸ types, zones, surfaces et origines de production

⁴⁹ évolution des types de transport, temps de parcours, description des réseaux

⁵⁰ évolution des flux de marchandises et de personnes, origine, destinations et quantité

⁵¹ types de matériaux, origines des matériaux

⁵² types de déchets, origine des déchets, recyclage

⁵³ types et usages de l'énergie, réseau national

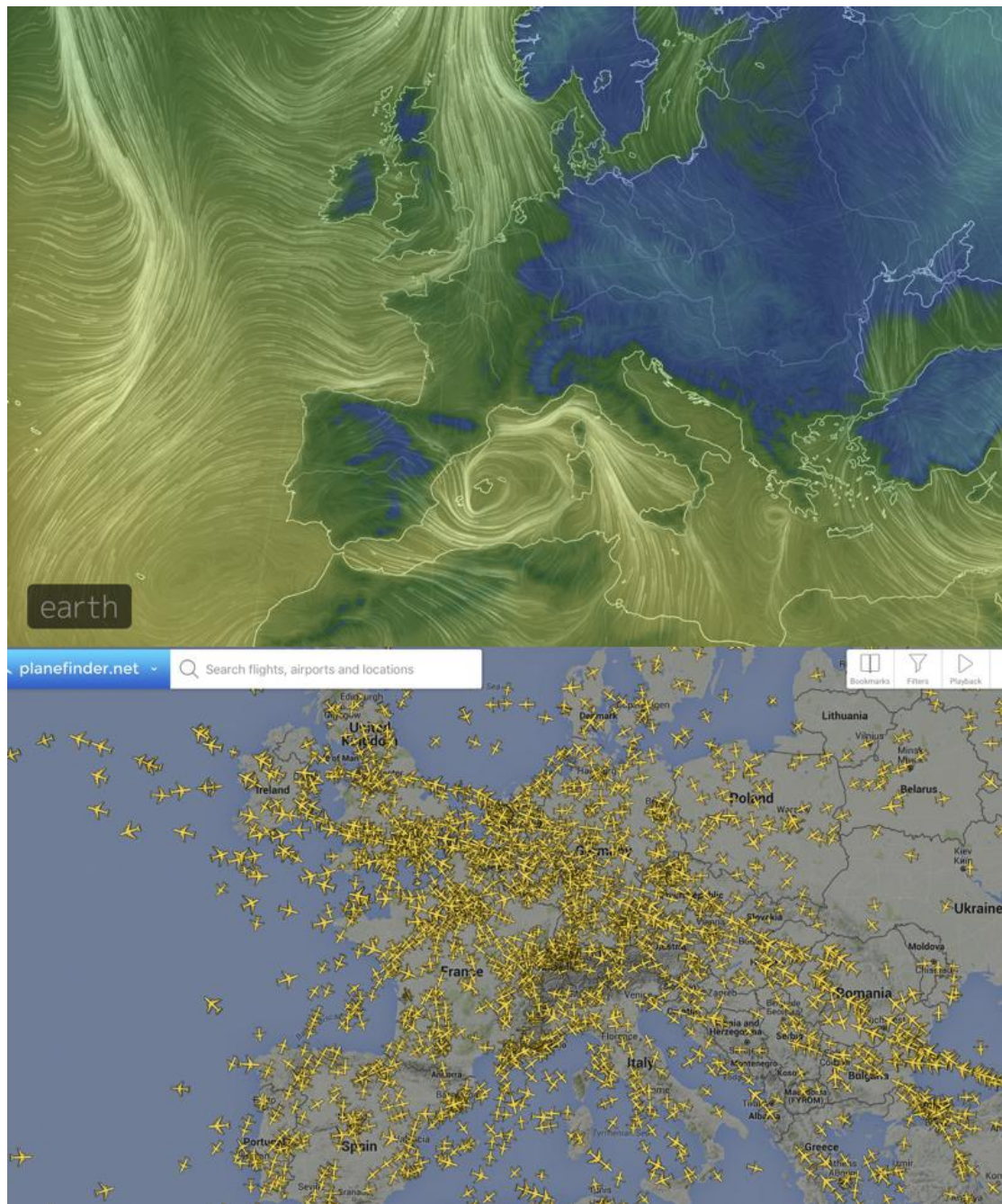


Figure 16. Mise en parallèle de 2 cartographies dynamiques, offrant une compréhension des flux matériels et immatériels. Image du haut : Carte des vents, données météorologiques libres, capture d'écran de la plateforme Earth <https://earth.nullschool.net>. Image du bas : Carte de la position en temps réel des avions, données ouvertes, capture d'écran de la plateforme Planefinder <https://planefinder.net>

Les néo-cartographies rassemblent des informations environnementales, sociales, politiques, culturelles et économiques. Elles sont interactives, actualisables, *zoomables* et *cliquables*. Antoine Picon les considère comme des interfaces spécifiques étroitement associées aux développements des villes intelligentes (Picon 2015), des interfaces entre les mondes numériques et physiques, permettant notre navigation et notre orientation dans des environnements complexes et hybrides, assurant une

médiation entre les dispositifs techniques et les humains. Les systèmes en réseau constituent de nouvelles relations avec le monde physique, ils contribuent à constituer un *flux informationnel continu* (Ratti et Claudel 2016).

La généralisation de la cartographie des activités géolocalisées révèle ces phénomènes qui font de la carte un instrument privilégié de nos interactions sociales, de nos pratiques urbaines et qui accompagne nos activités quotidiennes. Son caractère interactif, associé à ses fonctionnalités de géolocalisation, modifie notre rapport à la ville. La ville intelligente se décrit comme un ensemble d'événements ou d'occurrences, elle est vécue comme une suite d'expériences et la carte électronique constitue une représentation privilégiée pour s'orienter et interagir dans cet environnement urbain. Cette néo-cartographie constitue un instrument central de la planification urbaine des villes intelligentes (Picon 2013b).

La cartographie des traces numériques géolocalisées démontre ces formes de représentations émergentes et offrent de nouvelles lectures des activités humaines. Les travaux du *Senseable lab*, au sein du *Massachusetts Institute of Technology* de Boston (MIT), avec le projet *Real Time Rome*, réalisé en 2006 (Reades et al. 2007), montre la localisation des activités humaines pendant un concert en positionnant sur le plan de la ville l'intensité de l'activité des relais téléphoniques. Ou encore le projet *Ville Vivante*⁵⁴, réalisé pour la ville de Genève, par les agences de design Near Future Lab, Lift et Interactive Things, qui reprend l'activité des téléphones cellulaires sur le territoire du grand Genève pour illustrer les mouvements humains transfrontaliers au cours de la semaine (Figure 17). Ces travaux ne sont que quelques exemples des expérimentations et des réalisations qui proposent des formes de représentation des métabolismes urbains à travers la cartographie de traces numériques. Nous reviendrons dans la partie suivante sur la caractérisation de cet environnement urbain informant et informé.

⁵⁴ <https://www.villevivante.ch> consulté le 12 avril 2019

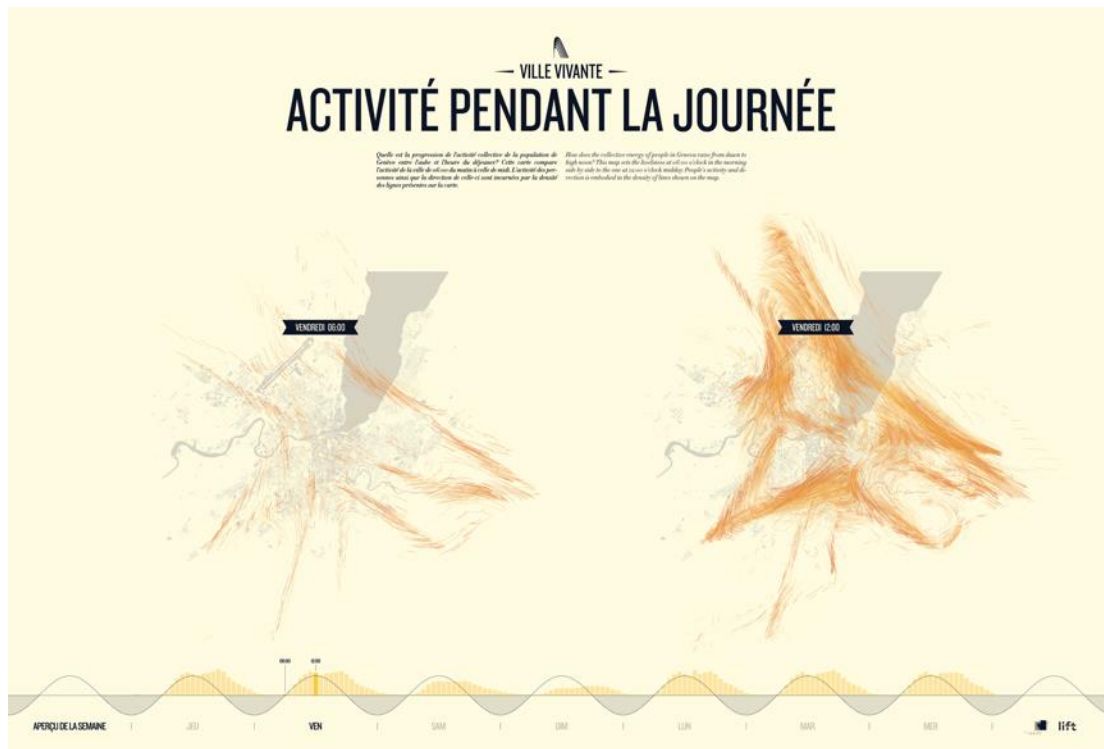


Figure 17. Projet Ville Vivante, montrant le flux quotidien des déplacements au cours de la semaine à l'aide du relevé des activités cellulaires, pour la Ville de Genève, réalisé par Near Future Lab, Lift et Interactive Things, <https://www.villevivante.ch/#posters>

*Urban observatory*⁵⁵ est une exposition qui prend la forme d'une application interactive, également consultable en ligne, elle propose la comparaison de plusieurs villes du monde à travers la construction d'une série de cartes interactives. Initié par Richard Saul Wurman, en partenariat avec ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) et réalisé par l'agence Radical Media, le projet propose une lecture comparée des villes à travers la représentation d'un ensemble de données. Celles-ci sont organisées en 5 thèmes : Travail⁵⁶, déplacement⁵⁷, personnes⁵⁸, public⁵⁹ et système⁶⁰. Les informations représentées sont principalement constituées de données ouvertes. *Urban observatory* s'inscrit dans la continuité des travaux publiés en 1976 par R. S. Wurman (Wurman 1976).

La plateforme internet⁶¹ de l'Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR) offre un accès à un ensemble de cartes, d'applications interactives et de data visualisations permettant de

⁵⁵ <https://www.urbanobservatory.org> consulté le 22 août 2019

⁵⁶ zones commerciales ou industrielles

⁵⁷ types de routes, infrastructures de transport

⁵⁸ densité de population, types de population

⁵⁹ espace et équipements publics

⁶⁰ température, vitesse des vents

⁶¹ <https://www.apur.org/fr/> consulté le 23 août 2019

représenter des données géographiques du Grand Paris. Les données sont ouvertes et téléchargeables⁶² dans des formats facilitant leurs réutilisations. Ces documents sont généralement les résultats d'études ou recherches pilotées par l'APUR. Une des applications propose une cartographie comparée des villes de Paris, Londres et New-York⁶³, elle est le fruit d'une étude réalisée en 2015 en collaboration avec les étudiants de Science-Po Paris. Elle a pour objectif de présenter une lecture comparée d'indicateurs, en donnant une place à des indicateurs socio-territoriaux, plus rarement utilisés dans les études internationales. Le travail s'appuie sur les données ouvertes disponibles sur ces trois villes ainsi que sur les données statistiques des états. L'outil reprend l'interface et les fonctionnalités de l'application *Urban Observatory*. 17 indicateurs sont regroupés en 5 thématiques : Démographie⁶⁴, logement⁶⁵, économie⁶⁶, mobilité⁶⁷, environnement⁶⁸.

3.2 UNE GEOGRAPHIE DIRIGEE PAR LES DONNEES⁶⁹

3.2.1. *La production de mégadonnées*⁷⁰

La facilité de collecte, de stockage et de traitement des données accompagne la constitution des *mégadonnées*. Avec les mégadonnées des quantités importantes de données sont disponibles sans que celles-ci soient forcément structurées, organisées ou qualifiées. Cette constitution massive de données est habituellement décrite à l'aide de l'expression des *trois V* : Le *volume* rend compte de quantités importantes ; la *vélocité* renvoie à la vitesse avec laquelle les données sont capturées ; la *variété* fait référence à l'hétérogénéité de celles-ci. La question de la *véracité*, ou de la *validité*, de la donnée est également est une dimension importante à prendre en compte. Ces quantités impliquent la mise en place de traitements et d'analyses, à l'aide par exemple des statistiques ou de l'analyse des réseaux avec la théorie des graphes, elles sont associées à la construction de visualisations pour faire comprendre les résultats de leurs

⁶² <http://opendata.apur.org> consulté le 23 août 2019

⁶³ https://www.apur.org/dataviz/benchmark_metropoles/index.html consultée le 23 août 2019

⁶⁴ densité de population, moins de 15 ans, 65 ans et plus, ménages d'une personne, population étrangère, familles monoparentales

⁶⁵ logements individuels, propriétaires, locataires du parc social

⁶⁶ actifs, étudiants, diplômés de l'enseignement supérieur, chômage

⁶⁷ transports collectifs, réseau routier, équipement automobile

⁶⁸ végétation

⁶⁹ Traduction de l'expression anglaise : *data driven geography*

⁷⁰ L'expression « mégadonnées » est la traduction officielle de « Big Data », les termes « datamasse » ou « données massives » sont également utilisés

traitements. Ces données sont constituées par l'ensemble des images satellites, par l'enregistrement des interactions sociales, par la mesure des flux et des échanges, par l'ensemble de nos traces électroniques individuelles, par les mesures des capteurs qui recouvrent le territoire.

Cette disponibilité de données participe au renouvellement des pratiques scientifiques et des méthodologies de recherche. Traditionnellement la science se fonde sur une connaissance empirique des phénomènes et sur des constructions théoriques traduites sous forme de modèles. Les pratiques plus récentes mettent en œuvre des simulations numériques ou des traitements spécifiques faisant ressortir des tendances, constituant des prédictions à partir de grandes quantités de données. Ces données sont peu organisées, structurées à l'intérieure de catégories non-homogènes, constituées d'échantillonnages aléatoires, formées de granulométries variées, mais leur grand nombre confère des capacités prédictives (Karsenty 2016). Dans un contexte d'abondance des données, les pratiques se transforment, elles passent par la fouille et le parcours des données pour identifier des corrélations ou des ressemblances. La corrélation repose sur le seul rapport statistique entre deux phénomènes. L'analyse des causes du phénomène n'est pas nécessairement au centre de l'analyse, et la capacité prédictive repose sur le traitement statistique de données. Ces analyses automatisées peuvent s'opérer en temps réel. Certains projets démontrent les risques d'absurdité de ces approches. La Figure 18 présente une corrélation entre le nombre de doctorat en ingénierie et la consommation de mozzarella par habitant.

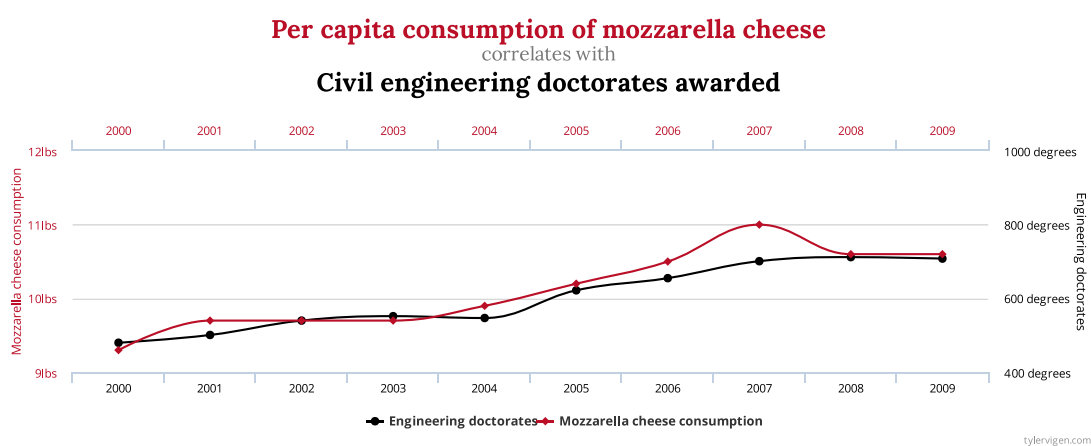


Figure 18. Graphique de corrélation entre la consommation de mozzarella par habitant avec le nombre de doctorats en génie civil, tiré de <https://www.tylervigen.com/spurious-correlations>, consulté le 26 février 2020.

Cependant le traitement des données quantitatives spatialisées, appelé également

géocomputation (Fotheringham 1998), peut prendre une place centrale dans un processus de conception, en définissant de manière intrinsèque la forme et les critères d'analyses. Cette approche *géocomputationnelle* s'apparente à un processus exploratoire dans lequel les données sont analysées pour suggérer des hypothèses. Les données ne sont pas ici des éléments de calibration ou de validation, mais deviennent la source et la matière de l'analyse (Miller et Goodchild 2015). Dans ce contexte, l'auteur identifie trois défis majeurs que les disciplines doivent relever.

Le premier défi est à rapprocher des types des jeux de données. Ceux-ci ne sont plus le résultat d'un échantillonnage mais constituent l'ensemble des informations décrivant une population ou un phénomène. Si cette approche présente l'avantage d'éviter les limites et les incertitudes statistiques liées aux échantillonnages, elle mobilise des informations non nécessairement représentatives de l'ensemble des pratiques. Dans la Figure 19, nous représentons l'activité Twitter d'une métropole au cours d'une période de temps et nous positionnons les *tweets* géolocalisés sur un fond de carte (Marin et Blanchi 2016). Il est ici important de savoir que les *tweets* géolocalisés ne représentent qu'une proportion limitée des activités de micro-publication de ce service. Un second exemple permet d'illustrer ce rapport aux données. Les services *OpenStreetMap* se constituent à travers une collecte volontaire des informations. Ces collectes peuvent présenter des biais sélectifs et ne garantissent pas nécessairement des campagnes systématiques, organisées et planifiées.

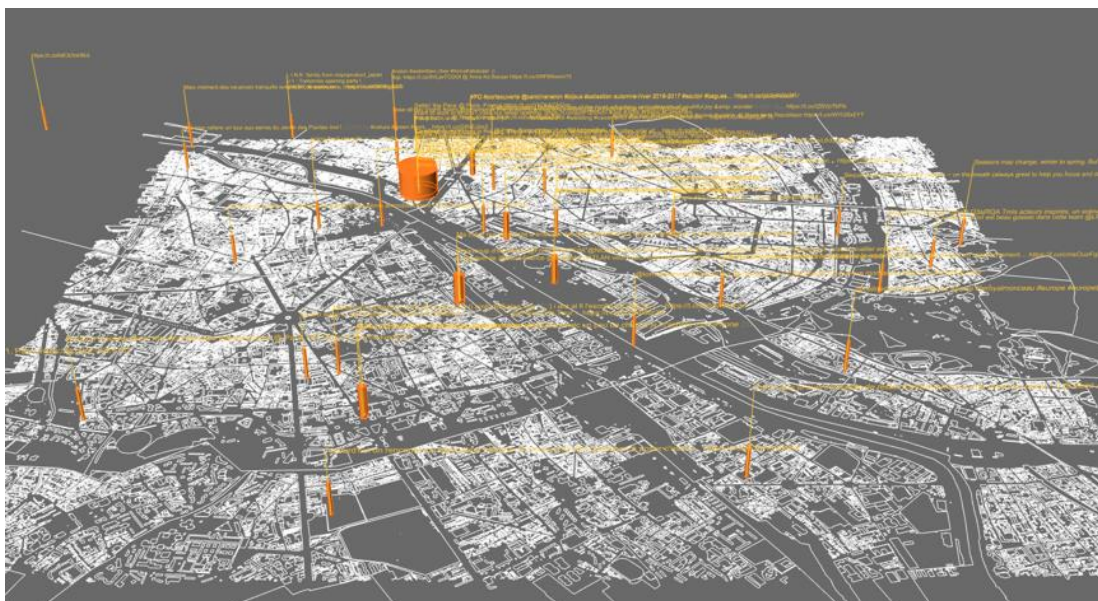


Figure 19. Géolocalisation des activités twitter, travaux de l'auteur, ENSAG, 2015

Un deuxième défi se révèle dans la validité relative des sources. Celles-ci sont souvent

non-structurées, sans contrôle de la qualité des collectes et peu de documentation ou de méta-information leur sont associées. L'utilisation de ces données peut se révéler pertinente pour des expérimentations ou des recherches préliminaires. Elle peut aussi intéresser des travaux ne nécessitant pas de généralisation, des travaux portant sur des dimensions qualitatives et n'imposant pas une exhaustivité ou une rigueur particulière dans l'échantillonnage des données. Une approche plus traditionnelle nécessiterait un nettoyage et une vérification des informations.

Le troisième défi est relatif au risque de délaissement de l'analyse des causes au profit d'une analyse corrélative des données. Ces méthodes corrélatives se révèlent judicieuses dans une perspective de prédiction ou de détection de relations nouvelles et elles permettent la construction de visualisations spécifiques. Mais toute la difficulté repose sur les possibilités de généralisation de ces corrélations.

Ainsi une méthodologie inverse de recherche semble se dessiner. Dans une démarche classique, le chercheur ou le concepteur, identifie une question et collecte les données qui peuvent lui permettre de trouver une réponse. Alors que certains projets récents débutent par la collecte des données et regardent à quelles questions ces données peuvent répondre.

Cependant ces approches dirigées par les données, présentent l'intérêt d'offrir une lecture des dynamiques territoriales à travers la constitution de représentations multiples et variées, elles illustrent des préoccupations et des méthodologies mobilisées historiquement par la géographie et l'urbanisme. Ces préoccupations prennent place dans un contexte de transition écologique, et récemment les expressions d'*urbanisme écologique*⁷¹ (Mostafavi et Doherty 2015), ou encore de *geodesign*⁷², ont été utilisées pour identifier les démarches d'aménagement portant un regard holistique sur la planification urbaine. Celles-ci intègrent les questions environnementales, politiques, culturelles et sociales pour envisager la qualité de nos cadres de vie, elles portent un regard multi-échelle, qui va de l'édifice au territoire, en intégrant des lectures complexes et dynamiques, et en s'appuyant sur les capacités computationnelles des outils numériques pour visualiser, comparer et évaluer.

⁷¹ Traduction de l'expression anglaise *Ecological Urbanism*

⁷² Le terme de *geodesign* est employé par Dangermond à l'occasion du discours d'ouverture de la Esri User Conference (Dangermond 2014).

3.2.2. Une production massive adossée à la ville intelligente

La *ville intelligente*, associée aux pratiques émergentes, contribue à la constitution de cette masse d'informations. L'informatique ambiante, la généralisation des objets communicants qui peuplent l'environnement urbain, la production d'un flux d'information continu, la multiplication des traces, des tags ou d'autres signes numériques qui marquent le territoire, conduisent à la production massive d'informations. Ces données sont produites automatiquement, dans un flux continu et à l'aide de capteurs variés. La tendance à la miniaturisation ainsi que l'augmentation des capacités de calcul ont généralisé l'équipement informatique et électronique des objets quotidiens. Les capacités de collecte et traitement de l'information ont augmenté de manière considérable ces dernières années.

Parallèlement des politiques d'ouvertures des données publiques, avec la mise en place des portails métropolitains ou institutionnels, confortent cette mise à disposition des données. Ces plateformes accompagnent la *ville intelligente*, elles répondent à une mission d'information des citoyens, mais avant tout, elles stimulent le développement économique d'un territoire et l'émergence d'acteurs économiques (Paquienseguy 2016). Ces démarches d'ouverture des données sont impulsées par les projets d'*open government* ou par des directives européennes, elles s'imposent à travers la promulgation de lois ⁷³, elles manifestent des volontés de transparence et de modernisation de l'administration, tout en poursuivant un objectif de croissance économique et d'innovation technologique censés profiter aux citoyens (Valentyna et Paquienséguy 2017).

3.2.3. Traitement et exploitation des mégadonnées⁷⁴

L'analyse et le traitement de ces informations autorisent des activités prédictives dans des domaines variés, qui vont de la consommation énergétique, à l'optimisation du trafic, en passant par la prédiction des flux ou des activités humaines. L'analyse des *mégadonnées* et leur utilisation comme support de décision représentent un champ d'investigation émergent qui passe par la mise en œuvre d'outils innovants et puissants d'analyse, de traitement et de représentation de l'information pour contribuer à la

⁷³ Loi NOTRe de 2015 sur la Nouvelle Organisation Territoriale de la République ou loi pour une République numérique de 2016.

⁷⁴ On trouve également l'expression « données massives » pour traduire « big data »

compréhension des activités, des tendances, pour donner du sens à cette masse d'informations hétérogènes.

Dans le champ de l'architecture, ces informations contribuent à la compréhension du métabolisme urbain (Batty 2013). Une compréhension du fonctionnement urbain qui porte sur des questions de mobilité, de flux, de consommation énergétique, d'activité humaine et qui s'interprète dans une forme d'instantanéité. Ainsi pour l'auteur, les technologies numériques et leurs applications aux activités de planification urbaine renouvellent les approches urbanistiques en considérant le fonctionnement de la ville dans un temps court et à une échelle parfois très localisée. A l'inverse la conception d'un édifice peut s'ancrer dans un contexte élargi, dans un territoire plus vaste, l'édifice et ses usages associés prenant place dans une réalité physique et numérique mesurable et représentable. Un exemple d'utilisation de données géolocalisées mis au service d'une activité de conception architecturale est proposé par les auteurs dans le cadre d'une expérimentation avec des étudiants de l'école d'architecture de Lyon (Marin, Janda, et Blanchi 2014). Les données, ouvertes ou collectées à l'aide de capteurs divers, sont utilisées pour caractériser un territoire ou un site d'étude. Les données font l'objet de représentations, numériques ou analogiques, pour constituer des outils de projet.

L'utilisation des *mégadonnées* dans une démarche de projet impose par ailleurs l'utilisation d'outils de modélisation capables de parcourir et d'organiser ces masses d'information. Des enjeux économiques et sociaux, des enjeux de connaissance et de compréhension des activités humaines sont associés à l'utilisation de ces *mégadonnées* et leurs exploitations s'adosent à des démarches transdisciplinaires.

3.3 LA VILLE, UN ENVIRONNEMENT INFORME ET INFORMANT

La notion de *ville intelligente* trouve ses origines dans les années 1980 avec le concept de *ville câblée*⁷⁵ (Batty 2012), mais c'est avec le développement et la généralisation de l'informatique ubiquitaire que l'expression *ville intelligente* s'impose. Celle-ci correspond à la traduction de l'expression anglaise *smart city*, qualificatif qui ne doit pas prévaloir de la qualité a priori de cette ville mais qui renvoie plutôt aux capacités de collecte, de traitement et d'échange d'informations. Ainsi la *ville intelligente* se conçoit dans cette possible interaction continue entre des réalités physiques et numériques, construites autour de maillages de capteurs et d'actionneurs autorisant des

⁷⁵ Traduction de l'expression anglaise « wired city »

pratiques et des usages nouveaux, une compréhension multi-échelle, une supervision urbaine et le développement d'une intelligence collective.

Le développement des techniques numériques et de l'informatique participe à cette transformation de la ville. Les équipements informatiques, les logiciels et maintenant les données s'inscrivent depuis le milieu du XX^e siècle dans un mouvement de décentralisation. La miniaturisation des ordinateurs est associée à leur intégration à l'ensemble de notre environnement, ils fonctionnent en parallèle et en réseau, ils communiquent et interagissent parfois de manière autonome. Certaines fonctionnalités de traitement peuvent être distribuées dans le *nuage*, les données sont produites en continu par des capteurs dédiés ou des périphériques mobiles de télécommunication (Batty 2013).

Nicolas Douay a identifié trois modèles de développement des villes dans un contexte de planification numérique (Douay 2016). Le premier envisage un *urbanisme rationnel*, qui se caractérise par l'importance accordée à une gouvernance algorithmique, le second, intitulé *post-stratégique*, repose sur l'activité et la place des nouveaux acteurs de l'économie numérique dans les décisions politiques et d'aménagement, le troisième, dénommé *urbanisme citoyen*, tire avantage des techniques communicationnelles et participatives pour impliquer les habitants dans les décisions collectives.

Notre commentaire sur la *ville intelligente* se fait en considérant le flux informationnel qui la compose, et nous notons des pratiques émergentes, des formes d'intelligence collective et des compréhensions multi-échelles. Par ailleurs nous rappelons les limites et les risques d'une logique d'optimisation et de *datafication* du réel.

3.3.1. Des pratiques et des usages émergents

Les nouvelles technologies ont une influence limitée sur la forme physique des villes mais contribuent par contre à une transformation des expériences individuelles et sociales des citoyens (Wachter 2010). De plus en plus, la ville et nos activités quotidiennes mêlent des activités physiques et virtuelles. Depuis quelques années les activités humaines se caractérisent par une mobilité importante, et le développement de l'informatique ubiquitaire renvoie à ces pratiques qui mobilisent, parfois inconsciemment, plusieurs dispositifs ou systèmes informatiques simultanément. Ce traitement en réseau des informations et leurs consultations via des interfaces homme-machine souvent mobiles, participe à la constitution de communautés et engendre des

espaces de signification nouveaux (Picon 2013b). Le territoire est recouvert d'une couche d'informations accessibles à l'aide de dispositifs informationnels.

3.3.2. *Une intelligence collective*

Cette mise en communication des éléments urbains et des objets quotidiens trouve également une application dans le développement d'une économie de partage et de réseau favorisant une intelligence collective (Rifkin 2012). Les pratiques urbaines interconnectées permettent une mise en réseau des activités citoyennes, les usages de la ville sont renouvelés et s'inscrivent dans un réseau co-expérientiel. La disponibilité de services numériques est utilisée pour multiplier les expériences tangibles en milieu urbain et favoriser les initiatives individuelles ou collectives. Des démarches coopératives cherchent à la fois une implication et un aiguillage du comportement des usagers. Une implication, dans la capacité d'appropriation technologique par les citoyens, dans une dynamique de conception ouverte et partagée, dans laquelle les usagers sont conscients et acteurs de l'environnement technologique qui les entoure. Un aiguillage des comportements, dans une perspective de prise de conscience des effets des agissements individuels, qui, dans une logique de grand nombre, conduiraient à des économies d'énergie, à la constitution d'une ville plus durable et responsable.

La constitution collaborative de connaissance, ou l'assemblage de données à travers les démarches volontaires, avec par exemple les activités de collectes d'information géographiques par des volontaires (*Volunteered Geographic Information*, VGI), montrent les possibilités offertes par les technologies de communication.

Le projet *Smart Citizen*⁷⁶ initié par *Institute for Advanced Architecture of Catalonia* (IAAC) en 2012, propose la mise à disposition d'un kit pour réaliser par soi-même une station météorologique et de mesure des conditions environnementales, à l'aide de capteurs et d'une carte électronique de type *arduino*. La proposition est associée à une plateforme internet qui centralise l'ensemble des enregistrements de la communauté pour constituer une sorte de base de connaissance ouverte, partagée et constituée collectivement.

Les initiatives, citoyennes ou via des acteurs privés, sont nombreuses, il apparaît important de veiller aux aspects inclusifs et égalitaires de l'usage de ces techniques.

⁷⁶ <https://smarcitizen.me> consulté en mars 2020

3.3.3. *Une compréhension multi-échelle*

Ce territoire *sur-imprimé* s'adosse à des logiques computationnelles dans lesquelles l'instrumentation de notre environnement se décline à plusieurs échelles. Nous notons le développement d'infrastructures communicantes qui équipent les réseaux urbains ou contribuent par exemple au développement de solutions de transport par véhicules électriques et hybrides. Le cadre bâti, la ville et le territoire participent ainsi d'une réalité physique hybridée avec un champ informationnel, et deviennent les entités d'un réseau nourrissant un flux de données. L'espace urbain est recouvert d'un espace informationnel, ils s'enrichissent mutuellement, se dédoublent et se confondent dans une forme hybride.

Les mesures s'opèrent aux niveaux des capteurs et s'agglomèrent à l'échelle de la ville ou de la métropole. Les sources sont variées, les données sont nombreuses et de natures différentes. Elles agrègent aussi bien des niveaux de pollution, des flux de personnes, des niveaux de remplissage de bacs à ordures, l'enregistrement de la situation des végétaux urbains, des comportements sociaux ou les niveaux de consommation énergétique des édifices. Elles se constituent automatiquement avec les enregistrements de nombreuses machines en réseau, ou avec la production de traces numériques urbaines et individuelles déposées volontairement ou non. La gestion de cette hétérogénéité constitue un des enjeux à relever.

La consolidation de ces données, l'identification de relations ou d'absence de pertinence, pourraient-ils conduire à la constitution de réseaux métaboliques qui représenteraient les interactions urbaines ? Cela impliquerait de concevoir la ville comme un système et d'envisager son écologie à travers la description des relations et des interactions. La compréhension multi-échelle d'un écosystème urbain pourrait paraître judicieux. Elle permettrait d'appréhender la ville et d'envisager simultanément différentes échelles. L'analyse des usages individuels, le fonctionnement de l'édifice, les comportements sociaux, les qualités de l'espace public, les dynamiques urbaines ou territoriales, peuvent faire l'objet de mesures ou de modélisation, mais la difficulté repose dans la manière d'intégrer ou de lier ces observations de natures diverses, pour dégager des processus globaux sous-jacents.

L'absence de modèle holistique, l'impossibilité de définir un système de règles ou de lois, qui ordonnerait le fonctionnement urbain, impliquent plutôt des approches subjectives, ou des micro-analyses, qui peuvent révéler des potentialités ou

accompagner des démarches de projet, plus que d'envisager une supervision d'ensemble, une vision globalisée d'un système urbain.

3.3.4. Une supervision optimisée

Les infrastructures, les édifices ou micro-architectures, aussi bien que les humains, deviennent autant de capteurs contextuels, entités d'un maillage informationnel au service de la compréhension et du monitoring urbain. L'artiste Simon Weckert, avec la performance *Google Maps Hacks*⁷⁷, démontre le fonctionnement de ce maillage. Il empile 99 smartphones dans un charriot et parcourt des rues désertes de Berlin. L'application Google Map analyse la densité des traces numériques géolocalisées et affiche un embouteillage (Figure 20).

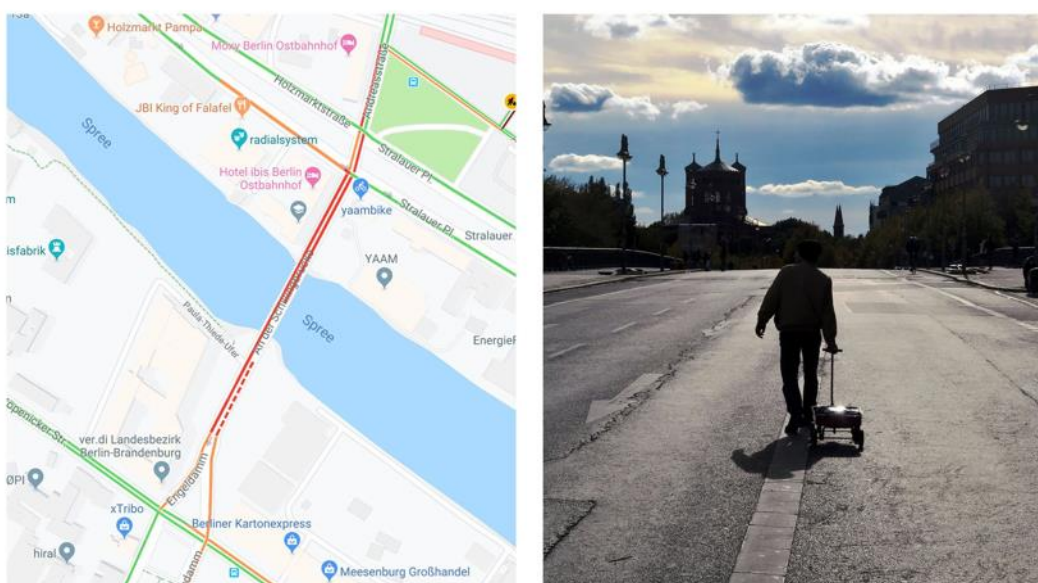


Figure 20. Performance Google Maps Hacks, Simon Weckert, 2020, “99 second hand smartphones are transported in a handcart to generate virtual traffic jam in Google Maps. Through this activity, it is possible to turn a green street red which has an impact in the physical world by navigating cars on another route to avoid being stuck in traffic”.

Ce maillage du territoire donne lieu à des formes de supervisions urbaines qui s'inscrivent dans des dynamiques d'optimisation des transports, de contrôle des niveaux de pollution ou de mesure des activités humaines. Ici les modalités de représentation de l'information et la conception d'interfaces homme-machine facilitant

⁷⁷ <http://www.simonweckert.com/googlemaphacks.html>, consulté le 26 février 2020

la compréhension et l'interaction avec les données sont centraux. Ces modes de visualisation et de représentation dynamique de l'information constituent aujourd'hui des thèmes de recherche à part entière et les activités du *Senseable City Lab*⁷⁸ en donnent quelques exemples.

Les maquettes numériques urbaines (City Information Model, CIM) représentent une technique de centralisation des informations urbaines, censée faciliter les activités de supervision, d'administration ou de planification. Des travaux ont montré comment l'usage et le partage de base de données consolidées contribuent à réduire les impacts environnementaux des activités humaines (Dantas, Sousa, et Melo 2019). Ils considèrent les indicateurs de développement durable des communautés urbaines⁷⁹, édités par l'ISO⁸⁰, et ils identifient les indicateurs auxquels les CIM, couplés au BIM, pourraient contribuer à apporter des réponses.

Le développement durable et les économies d'énergie constituent des arguments privilégiés de certains gouvernements ou industriels pour renforcer la démarche des *villes intelligentes*. Il s'agit aussi bien d'améliorer la gouvernance urbaine ou d'anticiper les comportements des habitants, des usagers ou des consommations (Eveno 2017). L'auteur précise qu'il est important de considérer simultanément la « redéfinition des frontières entre liberté et sécurité, entre espace public et privé entre éthique et efficacité » (Eveno 2017). La Figure 21 illustre la multitude des activités susceptibles de produire une trace numérique au cours de la journée, aussi bien dans l'espace domestique, au bureau, dans les magasins, dans l'espace public ou dans les transports en commun. Il apparaît primordial de replacer l'humain au centre de la gestion et de sa relation à ses productions techniques (Delhome, 2010), en s'assurant d'un usage conscient, en évitant les seules logiques de marchandisation ou d'optimisation, en préservant des approches intégratives pour éviter les risques d'accroissement des inégalités entre les individus, les communautés ou les territoires.

⁷⁸ <http://senseable.mit.edu/>

⁷⁹ Sustainable development of communities, Indicators for city services and quality of life, ISO 37120

⁸⁰ International Organization of Standardization

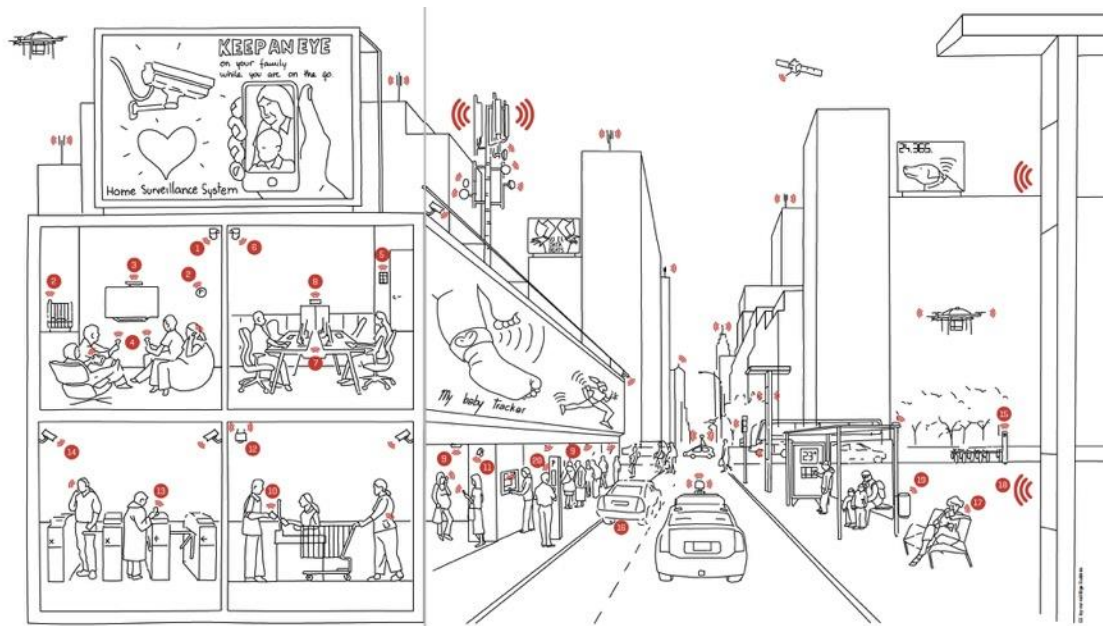


Figure 21. Identification des activités quotidiennes susceptibles de produire des traces numériques dans nos habitations, au travail, dans les commerces, dans les transports en commun, dans l'espace public. Illustration tirée de *Anonymise Yourself, Electronic Self-Defence Handbook*⁸¹

3.3.5. Datafication⁸² du réel

Matériaux instrumentés et objets connectés

Les données et les algorithmes constituent des conditions d'intelligibilité et d'agissement à travers les interconnexions des systèmes. La généralisation des technologies numériques, l'utilisation et le développement des matériaux instrumentés et des objets connectés représentent une autre caractéristique des transformations à l'œuvre. Les objets et les dispositifs sont instrumentés ou équipés de capteurs. Un capteur assure la transformation de grandeurs variées (biologique, chimique, physique, comportementale) en grandeurs numériques (les données) (Combette et Foucaran 2017). Le capteur est intégré à un système composé d'éléments assurant la communication sans contact, le traitement des données, une source d'énergie et souvent un actionneur. Le système devient « intelligent » à partir du moment où il est capable d'assurer certaines fonctions de manière autonome. Les degrés d'intelligence peuvent correspondre à des fonctions de captation, action ou traitement, impliquer des fonctions

⁸¹ <https://www.eticasconsulting.com/anonymise-yourself-electronic-self-defence-handbook/> consulté en février 2020

⁸² L'expression *datafication* est proposée par Eric Sadin (Sadin 2015)

de mémoire, intégrer des modalités d'apprentissage ou de gestion de son énergie (Bensaude-Vincent, 2004). L'intelligence est apportée de l'extérieur par l'électronique et le degré d'intégration de la couche électronique est variable. Elle peut être étroitement associée à une structure matérielle qui fonctionne comme un support (Figure 22), ou rester plus indépendante et prendre la forme de cartes électroniques plus ou moins intégrées.



Figure 22. Projet Smart Concret, intégration d'une couche d'électronique dans une dalle de béton, des capteurs capacitifs activent un scénario lumière avec l'identification de la présence humaine, travaux de l'auteur, projet réalisé en collaboration avec le CEA, l'école d'architecture de Lyon, de Grenoble, 2012.

Objet cyber-physique et objet-quasi-sujet vers une écologie de l'artificiel

En prolongement de ces hybridations des fonctions matérielles et informationnelles, le développement de l'*Internet des Objets* (IoT) accentue la mise au point d'objets cyber-physiques interconnectés. La multiplication des objets communicants et leurs interconnexions a porté à la fin du XX^e siècle les concepts d'*intelligence ambiante* et d'*informatique ubiquitaire*. Les *objets communicants multi-sensoriels* enrichissent ces notions avec une dimension expérientielle et des possibilités d'interaction. Les interfaces sensibles requièrent les sens, elles sont dotées de modalités interactives et sollicitent l'utilisateur dans une dynamique relationnelle.

La définition de l'espace par ses limites physiques se trouve modifiée et enrichie par son imbrication avec l'espace virtuel. Des couches informationnelles inaccessibles sans

instrumentation électronique jalonnent le territoire, ils s'intègrent à notre environnement bâti, aux artefacts qui nous entourent. L'espace communicationnel et la constitution de communautés ou l'établissement de rapports sociaux s'inscrivent aussi bien, et parfois simultanément, dans des dimensions physiques et numériques. Les matériaux, les surfaces, les objets ou les composants architecturaux sont désormais capables d'interagir avec les conditions extérieures ou avec les activités humaines. Ces dispositifs intelligents hybrides constituent eux-mêmes un réseau à travers leurs interconnexions. L'*informatique spatialisée*⁸³ intègre fonctions computationnelles et dispositifs physiques de types capteurs et actionneurs, elle identifie et anticipe les activités humaines, elle mesure les conditions environnementales et elle modifie l'environnement physique (Dulman, 2014).

Manzini (Manzini 1992) parle de *neo-objets* pour caractériser les *objets hybrides* constitués de surfaces animées et sensibles, qui établissent des interfaces d'échanges informationnels, des « peaux communicatives » et interactives, et qui se révèlent en réseaux, en systèmes d'objets interconnectés. Ces objets réunissent des notions de situation, de service, d'information et de mise en relation (Frechin 2008). Ainsi les objets inertes ont laissé la place à des systèmes, des dispositifs, des objets relationnels, des objets interfaces, des objets d'information et de communication. Ils représentent des conjonctions de situations, d'interaction et de représentation, en explorant de nouvelles formes de matérialité, de nouvelles temporalités, de nouvelles situations. La modification du comportement de l'objet en fonction de variables externes contribue à instaurer un dialogue et des interactions avec le sujet ou l'environnement, elle en fait un *objet-quasi-sujet*.

Ces fonctionnalités sont rendues possibles par les tendances à la miniaturisation des composants, par l'interconnexion des systèmes, par le renforcement des capacités de calcul en temps réel. Ces dispositifs instaurent des rapports à l'espace et au temps qui bouleversent nos repères habituels. Les mécanismes sous-jacents échappent à notre expérience directe et rendent leur compréhension et leurs intégrations socio-culturelles difficiles. Manzini plaide pour l'instauration d'une *écologie des environnements artificiels* en s'inspirant des *cycles naturels* et en définissant des *cycles de l'artificiel*. Cette écologie de l'artificiel suppose d'envisager l'artificiel en tant que « système d'artefacts matériels et immatériels qui entrent en relation et en compétition au sein

⁸³ Traduction de l'expression *spatial computing*

d'un environnement limité » (Manzini 1992). Il considère l'adjectif « écologique » en intégrant les interactions qui s'opèrent entre des systèmes naturels, mais également entre les systèmes artificiels et avec l'homme. Il propose d'assumer l'artificialisation de notre environnement. Ce *cycle de l'artificiel* est un processus associé à la prise en compte des flux matériels, c'est-à-dire à l'analyse des cycles de vie, il est associé à des stratégies de recyclage et permet de considérer l'activité humaine à la fois comme une « construction » et comme une « déconstruction ».

L'artificialisation croissante des environnements et la complexité de l'ère *néotechnique* devraient alors s'accompagner d'une nouvelle culture écologique, intégrant les dimensions culturelles et sensibles, aussi bien que la prise en compte des équilibres entre environnements artificiels et naturels. Cette pensée écologique se révèle *écotechnologique*, elle intègre culture matérielle et culture numérique, et elle envisage la position de l'homme au sein d'environnements hybrides, où la distinction entre l'artifice et le naturel est de plus en plus floue (Antonioli 2016). Cette attitude écologique vise à préserver l'équilibre de l'environnement physique, mais également les richesses sensorielles de nos expériences sensibles et sociales. Elle nécessiterait la prise en compte d'un cycle de vie des objets matériels mais également des objets immatériels. La question de « l'immortalité de la donnée », par exemple, qui reste stockée de server en server, pourrait être envisagée. Son cycle de vie peut être examiné en considérant le vaste écosystème technologique dans lequel elle prend place, et qui va de l'extraction des métaux pour fabriquer les objets connectés et les capteurs, aux *datacenters* qui servent d'entrepôts de stockage et de distribution, en passant par les infrastructures de communication et les logiciels de traitement des informations. Rajoutons que l'utilisateur est également au cœur de ce processus puisqu'il a le choix de conserver ou de supprimer les données qu'il contrôle.

L'artificialité ne doit pas être comprise en opposant « l'origine fabriquée de l'objet à de la spontanéité productive de la nature⁸⁴ » (Simondon 2012), elle est à considérer dans le fait que l'homme doit intervenir pour protéger cet objet et le maintenir dans l'existence. L'artificialisation peut intervenir aussi bien sur un objet fabriqué et que sur un objet naturel. La rose qui croît dans l'atmosphère contrôlée d'une serre a perdu ses capacités de régulation naturelle qui sont déléguées à un système artificiel. Parallèlement les « objets techniques évolués se rapprochent des modes d'existence des

⁸⁴ Page 57

objets naturels⁸⁵ » (Simondon 2012). Les mises en relation des objets techniques sont des éléments régulateurs de leur fonctionnement, une partie du monde naturel participe à leurs conditions de fonctionnement. Ces interactions sont régulatrices. Et si les objets techniques tendent vers une naturalisation, il est évident qu'ils n'acquerront jamais le statut d'existence entièrement naturelle.

Quantification et vectorisation du monde

L'intelligibilité du réel se constitue au prisme des données dans une forme d'*interopérabilité universelle*, de mesure et de quantification de la réalité, des activités humaines et des phénomènes (Sadin 2015). Dans le domaine de l'intelligence artificielle, par exemple, la description du monde se réalise à l'aide de *vectorisations*⁸⁶, formalisme mathématique permettant des opérations statistiques de pondération au sein des réseaux de neurones. Des visions panoramiques et des pilotages optimisés des activités urbaines sont envisagés avec la collecte en temps réel, l'analyse corrélative, l'interprétation automatisée, ou encore avec la constitution de tableaux de bord, accessibles depuis des salles de contrôle, version contemporaine des *war room* de la guerre froide (Picon 2013b).

Face aux « vérités rationalisantes du numérique », aux risques de marchandisation et de renforcement d'une société sous surveillance, une philosophie de la technologie contemporaine devrait se renforcer. Il nous paraît important d'encourager la constitution d'une éthique qui s'attacherait à préserver les libertés individuelles, à favoriser l'accroissement des capacités de penser et d'agir, à accompagner la prise de distance critique et les formes d'appropriation et de détournement, en évitant de soumettre les rapports humains à des logiques utilitaristes et marchandes, et en favorisant la constitution de *biens communs* (Dardot et Laval 2015; Crosnier 2015).

⁸⁵ Page 56

⁸⁶ Description du monde sous forme de vecteurs, technique principalement utilisée dans le domaine de l'IA

3.4 VISUALISATION DE L'INFORMATION

3.4.1. *De la data visualisation à la data physicalisation*

La data visualisation

La représentation de l'information est associée à une terminologie riche et nous souhaitons ici distinguer les notions de *visualisation d'information*, qui intègre la *visualisation des données* (ou *data visualisation*), la *visualisation scientifique* ou encore la *data physicalisation*, et qui se distingue du *design d'information*.

La *visualisation d'information* (*information visualization*) est un terme générique qui regroupe un ensemble de représentations présentant un niveau d'organisation. Elles peuvent prendre la forme de tableaux, graphiques ou cartes et offrent un niveau de compréhension ou présentent des relations qui ne pourraient pas être perçues initialement.

La *visualisation des données* (*data visualization*) est une branche de la visualisation d'information, elle implique une science de la représentation des données statistiques, elle intègre à la fois des approches en prise avec les graphiques statistiques, la visualisation de données quantifiées, mais également des approches associées à la cartographie avec des formes de contextualisation et de localisation d'informations du domaine de l'espace ou de la géographie.

La *visualisation scientifique* (*scientific visualization*) concerne la représentation, souvent en 3 dimensions, de phénomènes, par exemple météorologiques, biologiques ou médicaux, elle s'intéresse à des représentations réalistes de volumes, de surfaces, de matière et lumière dans le cas de représentations techniques. Certaines des représentations architecturales font référence à ce domaine d'expertise.

Dans le contexte des données massives, la question de la visualisation des données prend une place croissante. Certains auteurs distinguent la *visualisation analytique*, qui vise l'exploration des jeux de données pour faire émerger des informations ou des phénomènes méconnus, et la *visualisation descriptive*, qui permet d'explicitier un phénomène identifié (Auber et Beaudouin-Lafon 2017).

Par ailleurs, le *design d'information* (*information design*) trouve son origine dans le fonctionnalisme visuel des années 60 avec les travaux du Bauhaus ou de l'Ecole d'Ulm,

il met l'accent sur la lisibilité et la visibilité du message (Vollaire 1997) en considérant des questions d'esthétique, d'efficacité cognitive ou d'accessibilité. Les travaux d'Otto Neurath (Neurath et al. 2018), avec la mise au point d'un langage graphique à l'aide de représentations symboliques, qu'il appelle *isotype*, ainsi que les apports de la *gestalt*, prennent place dans ce domaine. Le design d'information s'intéresse à donner du sens aux données et s'appuie sur un langage visuel articulant forme, taille et couleur pour constituer des relations de continuité, de similitude, de proximité, d'ordre ou de proportionnalité (Fredricksson 2015). *L'International Institute for Information Design*⁸⁷ (IIID) donne la définition suivante du design d'information :

Information is the result of processing, manipulating and organizing data in a way that adds to the knowledge of the person receiving it.

Design is the identifying of a problem and the intellectual creative effort of an originator, manifesting itself in drawings or plans which include schemes and specifications.

*Accordingly, information design is the defining, planning, and shaping of the contents of a message and the environments in which it is presented, with the intention to satisfy the information needs of the intended recipients*⁸⁸ (IIID definition modified by the idX* group).

Ainsi le *design d'information* porte sur à la mise en forme d'un message par des moyens visuels, il a comme point de départ une information déjà structurée, qu'il se charge de mettre en forme. Quant à elle, la *visualisation d'information* travaille à partir de données dont il faut trouver les relations sous-jacentes. L'architecte à travers la production des représentations qui accompagnent ses réflexions, opère ce double travail de visualisation d'information et de mise en forme dans des représentations visuelles

⁸⁷ <https://www.iiid.net/> (consulté le 22 juillet 2019)

⁸⁸ <https://www.iiid.net/home/definitions/> consulté en janvier 2020.

L'information est le résultat du traitement, de la manipulation et de l'organisation des données d'une manière qui enrichisse la connaissance de la personne qui la reçoit.

Le *design* est l'identification d'un problème et l'effort créatif de l'auteur, il se manifestant par des dessins ou des plans qui intègrent des schémas et des spécifications.

En conséquence, le design d'information est la définition, la planification et la mise en forme du contenu d'un message et des environnements dans lesquels il est présenté, avec l'intention de satisfaire les besoins d'information des destinataires (Traduction de l'auteur)

stimulantes et diagrammatiques.

La visualisation par graphes et arbres

Nous précisons dans les paragraphes⁸⁹ suivants les catégories de représentations en distinguant notamment les *cartes*, des *diagrammes*, des *réseaux* ou des *représentations symboliques*. Le choix du type de représentation est, pour Jacques Bertin, dépendant de la nature des correspondances entre les données (Bertin 2013). Dans ces mêmes paragraphes nous nous attarderons plus particulièrement sur les représentations du domaine des cartes. Cependant nous précisons ici que l'usage des données massives est associé à la constitution de nombreuses représentations qui prennent la forme de diagrammes et de réseaux, de graphes et d'arbres. La structuration des données sous forme d'arbre n'est pas nouvelle et Manuel Lima (Lima 2014) donne une épaisseur historique à ce mode de représentation tout en identifiant des figures plus récentes de visualisation. Précédemment ce même auteur nous plongeait dans un univers visuel de représentations de la complexité avec la publication d'un inventaire de visualisations de données (Lima 2011). Ces modes de représentation sont à rapprocher des premiers travaux en matière de classification des connaissances. De Raymond Lulle (1235-1315), avec son *Arbre des sciences* (Figure 23), aux réseaux de neurones (Figure 14), et en passant par les nombreux travaux sur la taxonomie des espèces, une généalogie des représentations en forme d'arbre se constitue (Morel 2020).

Nous donnons deux interprétations récentes de ce type de représentation. La Figure 24 montre la participation des enseignants titulaires de l'ENSAG aux différentes unités d'enseignement du cycle licence, en les regroupant par champs disciplinaires. Le graphe est généré à partir de la lecture fichier texte. Plus appliqué au domaine de la conception architecturale, nous avons vu que ces modes de représentation peuvent, par exemple, servir à la compréhension ou à la définition du *flux de travail*, ou du *flux d'information*, dans le cadre de réalisations collaboratives ou de modélisation paramétrique avancée. La Figure 25 montre la structure des calques et des composants d'un fichier Rhinoceros. Nous notons que ces représentations sont mises en forme de manière automatisée, qu'elles offrent des fonctionnalités interactives de tri et de sélection, qu'elles peuvent présenter des *visualisations multi-échelles*, en agrégeant

⁸⁹ 3.4.3 Les principes de la cartographie traditionnelle , paragraphe Nature des correspondances entre les données.

récurivement les entités pour pouvoir passer d'un niveau résumé à la donnée élémentaire.

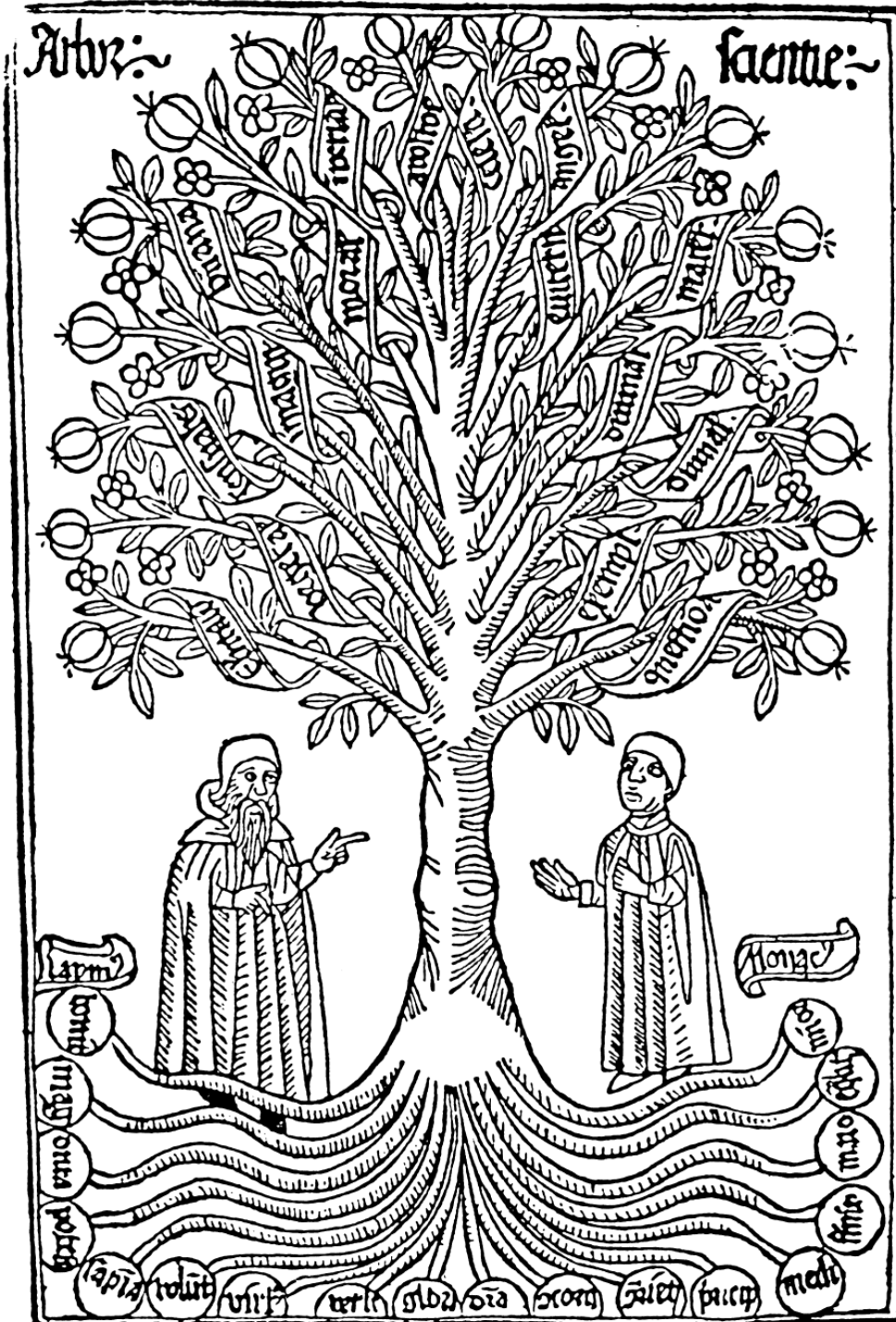


Figure 23. *Arbor scientiae*, Raymond Lulle, vers 1295, source de l'image Druck von 1505 in Tomkowiak: *Populäre Enzyklopädi*

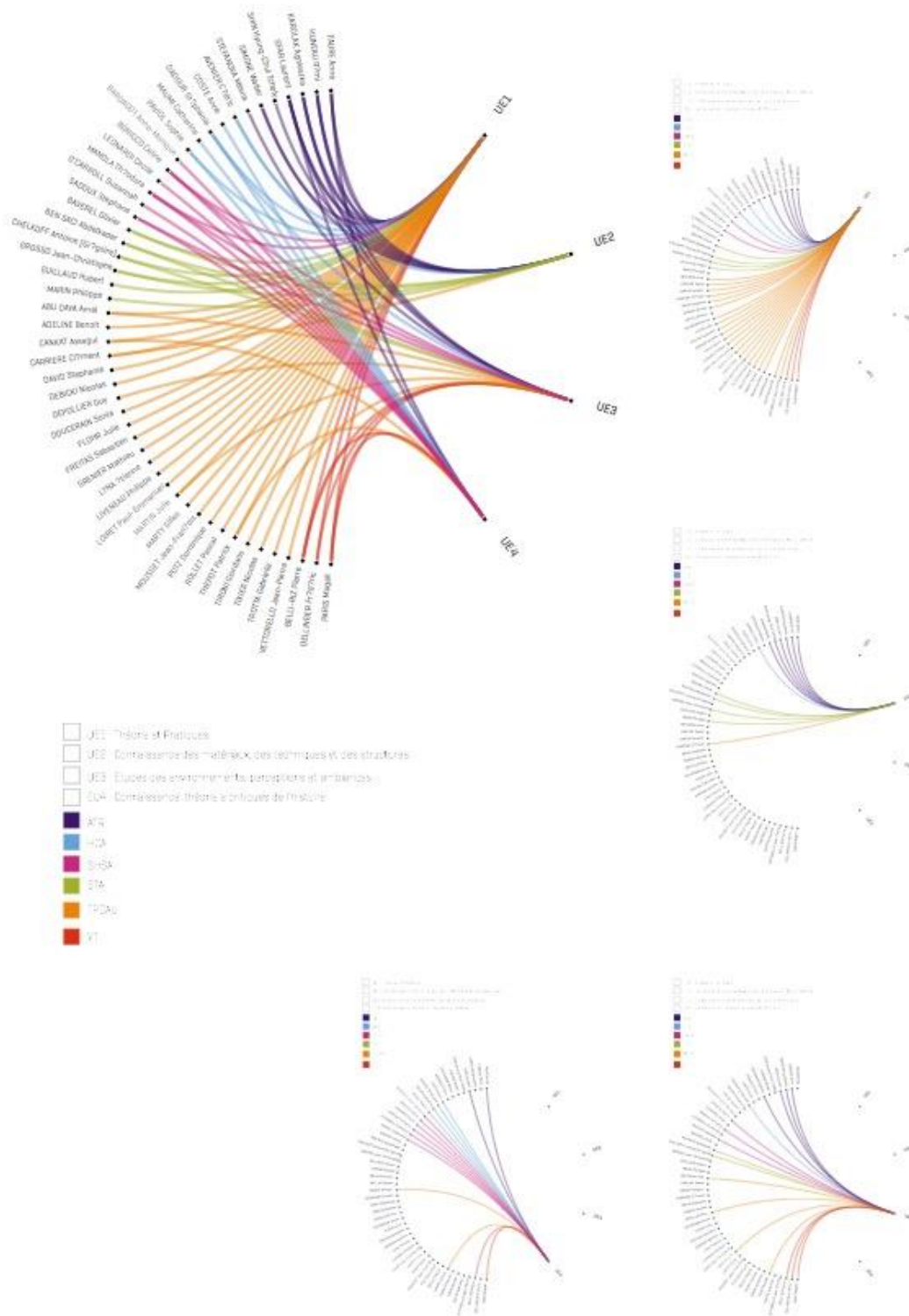


Figure 24. Illustration d'une data visualisation, sous forme de diagramme. Représentation de la répartition des enseignants de l'ENSAG au sein des différentes unités d'enseignement en fonction de leur champ disciplinaire, illustration de l'auteur, 2017

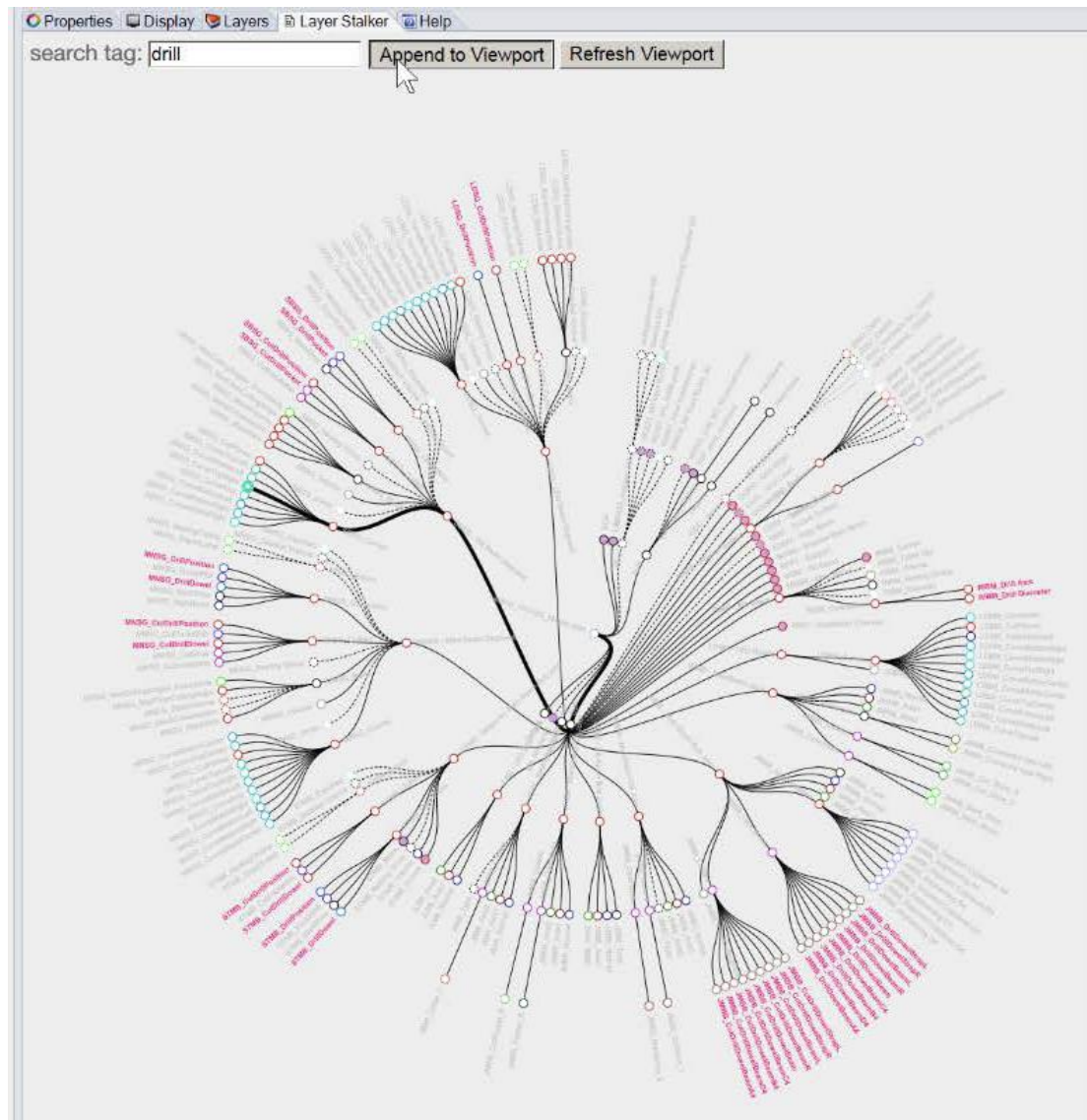


Figure 25. Visualisation de la structure d'un fichier Rhinoceros dans le cadre d'une modélisation d'un pavillon. Les branches du graphe représentent des calques et des groupes de calque. (Poinet et al. 2018)

La visualisation interactive

De plus, de nouveaux domaines émergent aujourd'hui avec notamment l'accès aux fonctionnalités d'animation et d'interaction. On parle de *graphic design*, *visual design*, *user interface design* (UI) ou encore de *user experience design* (UX) pour faire référence à des domaines de compétence et d'application qui traitent de la mise en forme visuelle d'information, en considérant des réflexions sur la couleur, la typographie, l'organisation de l'information, et en intégrant les spécificités des supports de diffusion et des interfaces homme-machines. Celles-ci facilitent les modes de consultation à partir de périphériques de différentes natures, elles offrent des fonctionnalités d'interaction, de tri, de sélection et intègrent parfois des animations.

Data physicalisation

Ces visualisations peuvent également prendre la forme d'installations en offrant une présence dans l'espace ou à travers des matérialisations appelées *data physicalisation*. Une *data physicalisation* correspond à la matérialisation physique, c'est-à-dire la réalisation d'un artefact, dont la géométrie ou les propriétés du matériau intègrent et révèlent des données (Jansen et al. 2015). Les auteurs en donnent la définition suivante : « A data physicalization (or simply physicalization) is a physical artifact whose geometry or material properties encode data ⁹⁰ ». Le terme de *data physicalisation* fait référence à la fois l'artefact réalisé, au processus qui donne forme aux données, ou constitue un nouveau domaine de recherche à la frontière entre les disciplines de la *visualisation de l'information* et celles des *interfaces homme-machine*.

Cette démarche de matérialisation d'une quantité, ou d'une valeur numéraire, n'est pas nouvelle et les premiers jetons d'argile mésopotamiens constituent des objets de médiation symbolisant une valeur d'échange. Dans le domaine de l'art, le terme de *data sculpture* est employé pour qualifier les œuvres dont le processus de constitution repose sur la manipulation de données et dont les résultats relèvent une expression artistique. La peinture de François Morellet, intitulée *Répartition aléatoire de triangles suivant les chiffres pairs et impairs d'un annuaire de téléphone*, réalisé en 1958, révèle cette démarche.

Les travaux de visualisation physique de l'information apparaissent dans la littérature approximativement en 2008, leurs popularités est associées aux développements des *fab lab* et des techniques de fabrication numérique. Les qualités de ces physicalisations sont identifiées. Elles contribuent à l'exploration, à la prise de connaissance ainsi qu'à la communication des données (Dragicevic, Jansen, et Vande Moere 2019). Ces réalisations participent à l'analyse et la compréhension des phénomènes dans les domaines de la science et de l'ingénierie, de l'éducation et de la médiation. Leurs qualités reposent sur les perceptions qu'elles facilitent. L'existence physique permet des « prises en main », des implications corporelles, des lectures de formes ou de géométries complexes. La *data physicalisation* peut mobiliser nos sens non-visuels ou encore une expérience multi-sensorielles. Ainsi elle rend accessible et compréhensible

⁹⁰ Une physicalisation de données (ou simplement une physicalisation) est un artefact physique dont la géométrie ou les propriétés matérielles sont le résultat d'un encodage de données (traduction de l'auteur).

les concepts et les phénomènes à travers une traduction tangible de valeurs abstraites.

La Figure 26 montre une physicalisation réalisée dans le cadre d'un atelier de projet avec des étudiants de l'École Nationale Supérieure de Création industrielle de Paris (ENSCI-Les Ateliers). L'artefact se constitue avec les données ouvertes récoltées par Airparif. Elle représente les niveaux de pollution au dioxyde d'azote enregistrées dans différentes stations de relevé de l'agglomération et montre la concentration des intensités dans le centre de Paris.

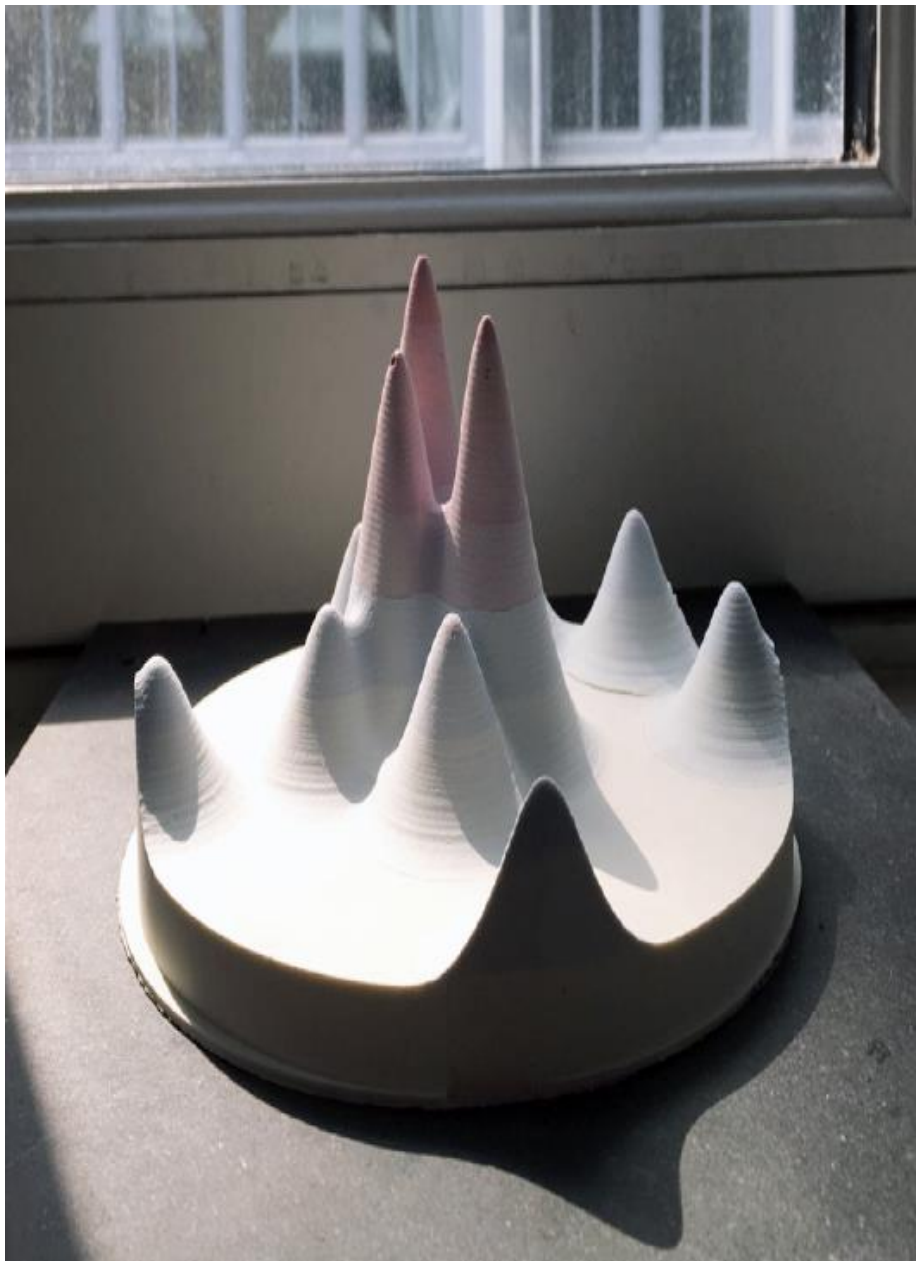


Figure 26. Data physicalisation, représentant les niveaux de pollution du Grand Paris, auteurs Jonas Aymoz et Sarah Saulnier de Praingy, réalisé dans le cadre d'un atelier organisé et animé par l'auteur, l'ENSCI-Les Ateliers, 2018.

Les données, matière de création

Deux expositions récentes présentaient des installations et des sculptures qui convoquent des données. L'exposition *Big Bang Data*⁹¹, présentée une première fois en 2014 au *Centre de Cultura Contemporània de Barcelona* (CCCB), propose de porter un regard sur la place, l'usage et l'importance que prennent les données dans notre société contemporaine. Artistes, activistes, architectes, journalistes, ingénieurs ou encore programmeurs ou cartographes, présentent un ensemble d'œuvres interrogeant les risques, les limites, les usages, les promesses des méga-données.

L'exposition *1,2,3 Data* (Bihanic 2018), présentée en 2018 à la Fondation EDF de Paris, cherche à montrer comment les disciplines de la création peuvent contribuer à mettre en forme visuellement les amas de données produites, générées et échangées quotidiennement. Avec l'objectif de montrer de nouvelles orientations, de nouveaux usages, de révéler le potentiel de la donnée en tant que matériau de création, artistes et designers présentent des sculptures, des installations, des infographies ou des visualisations, en traitant d'enjeux de société, aussi bien autour des questions environnementales, écologiques, sociales ou encore migratoires.

Les concepteurs, qu'ils soient architectes, designers ou artistes, traitent et interprètent les données pour constituer une connaissance. Les formes et les traitements de ces représentations sont variés et multiples, mais ils sont les supports d'un discours, d'un point de vue, d'une prise de connaissance d'un état des choses ou de perspectives d'évolutions. Elles sont un vecteur de compréhension du monde.

D'une abstraction géométrique à une visualisation directe des données

Historiquement la visualisation d'information opère une forme de réduction en transcendant une donnée dans un symbole visuel. Cette représentation prend habituellement la forme d'un ensemble de points, de lignes, de surfaces ou de primitives géométriques judicieusement agencés (Manovich 2010). Dans le domaine des humanités, l'auteur identifie une transformation dans les pratiques de visualisation de données avec de nouvelles formes de visualisation qu'il qualifie de directe. La

⁹¹ <http://bigbangdata.somersethouse.org.uk> (consulté le 23 juillet 2019)

*visualisation directe*⁹² se définit comme la mise en forme directe des éléments du corpus, ceux-ci pouvant être du texte ou les images extraites d'un film. Ces informations sont directement organisées pour construire une représentation constituée de l'assemblage de ces données. Ces formes de visualisation se révèlent particulièrement pertinentes pour les humanités numériques et de nombreux projets se développent pour traiter, consulter, analyser ou représenter des corpus de données variées. Ceux-ci sont constitués par des données quantifiées mais aussi par des éléments multimédias du type images, textes, sons ou films.

3.4.2. Les précurseurs

Nous souhaitons dans les paragraphes suivants identifier quelques-unes des représentations remarquables qui constituent des moments privilégiés de l'histoire de la représentation visuelle de l'information.

La représentation des flux dans le temps et l'espace

Un premier acteur marque l'histoire des représentations. Il s'agit de Charles-Joseph Minard (1781-1870). Il est ingénieur civil, il intègre l'Ecole Polytechnique puis l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées où il mène des travaux sur les questions de navigation intérieure ou d'aménagement des lignes de chemin de fer. Ces recherches le conduisent à produire plusieurs représentations visuelles qui décrivent des phénomènes, facilitent l'analyse et participent à la prise de décision. Ces représentations visuelles, construites à partir de données statistiques précises et recueillies avec méthode, vont progressivement s'enrichir en intégrant des formes de cartographie et de localisation des événements. La *Carte figurative des pertes successives en hommes de l'Armée française dans la campagne de Russie en 1812-1813* (Figure 38) est célèbre pour sa qualité de synthèse. Elle présente en deux dimensions un ensemble de variables intégrant localisation, itinéraire, point de regroupement et de séparation des armées, pertes humaines et variation de la température de l'air. Les productions de Minard expriment des flux tout en permettant des comparaisons à travers des rapports de proportionnalité, il construit des *cartes statistiques* en intégrant des repères géographiques, des localisations et des éléments contextuels. Son objectif est de

⁹² Traduction de l'expression anglaise *direct visualisation*

montrer des rapports numériques appréhendables par le regard, il marque les premiers pas d'une forme de narration graphique en remplaçant les visualisations statistiques dans une perspective globale, qui doit faciliter l'analyse de problèmes complexes. La perception du phénomène et la mémoire des idées et des sensations produites, participent à la faculté de raisonnement et d'analyse.

« La statistique est l'enregistrement des faits similaires dans un ordre méthodique, numérique ou chronologique. La mémoire est l'enregistrement intuitif dans le cerveau d'idées ou de sensations qui nous ont plus ou moins impressionnés. La statistique est une connaissance acquise par expérience et d'où nous tirons des conséquences par raisonnement. La mémoire est la faculté involontaire et primordiale de l'âme, indispensable à tout raisonnement⁹³. » (Minard s. d.).

Ainsi, il faut noter qu'une intention sous-tend la carte ou la visualisation de données, celles-ci sont orientées vers un but, elles participent à l'analyse du problème à travers une forme de simplification visuelle, tout en intégrant une rigueur dans le traitement des données et dans l'expression des méthodologies de construction.

L'efficacité visuelle de la carte à points

Cette combinaison des statistiques et de la cartographie donne naissance aux *cartes de densité de points*. Un exemple célèbre est celui de la carte de points du Dr John Snow qui localise les morts du choléra dans le quartier de Soho à Londres pendant l'épidémie de 1854 (Figure 27). Sur un fond de carte, la localisation des décès est représentée par un point, les fontaines à eau sont localisées par une croix. En s'appuyant sur l'observation des répartitions, le Dr Snow établit un lien entre les décès et la fontaine de Broad Street. Après la fermeture de celle-ci, la contagion est arrêtée. Ce sont les qualités de la représentation visuelle de l'information qui ont ici facilité la compréhension et l'explication de la contagion. Les relations entre la fontaine et les cas de choléra ont été facilitées par la lecture visuelle du document.

⁹³ Page 1



Figure 27. Variante de la carte du Dr John Snow localisant les cas de choléra à Londres lors de l'épidémie de 1854.

Une vision humaniste et technophile : la carte dymaxion

Richard Buckminster Fuller (RBF) (1885-1983), ingénieur et inventeur nord-américain, en prolongeant ses recherches sur la géométrie des prismes, développe un système de projection du globe qu'il nomme *carte dymaxion*. Ce planisphère est constitué par le développé d'un polyèdre, d'abord sur la base d'un cuboctaèdre puis d'un icosaèdre. Les triangles, qui composent la forme en plan, peuvent s'agencer de différentes manières en fonction du point de vue géographique que l'auteur veut privilégier. Ce système de projection présente l'avantage de respecter les distances entre les régions de la terre et d'éviter ainsi les déformations. L'organisation des triangles construit les proximités visuelles. Cette représentation devient notamment le

support d'un jeu dénommé *World Game* (Buckminster Fuller 1971).

C'est en juillet 1961 que RBF propose à l'Union Internationale des Architectes (IUA⁹⁴) d'initier un programme intitulé *the World Design Science Decade*. Une des manifestations de ce programme sollicitait les écoles d'architecture pour concentrer leurs activités durant 10 ans, de 1965 à 1975, autour d'une question : « Comment faire pour que les ressources mondiales totales, qui [en 1961] ne servent que 40% des habitants, servent 100% de l'humanité ? » Dans cette perspective RBF rédige plusieurs documents qui décrivent en détail la manière dont les étudiants des écoles d'architecture tout autour de la planète peuvent concentrer leurs efforts pour trouver une réponse à cette question. Ce programme prend la forme d'un jeu, le *World Game*. Celui-ci se compose notamment d'un ensemble de données statistiques, de références de bases de données ou d'organismes internationaux, capables de fournir des informations quantifiées, sur des niveaux de consommation, de production, de matière ou d'énergie, de migrations humaines ou de flux de marchandises. L'ensemble de ces informations est rassemblé sous forme de tableaux, de séries statistiques ou synthétisé dans des représentations diagrammatiques et cartographique. La *carte Dymaxion* est un support visuel privilégié d'organisation de cette connaissance, elle permet des géolocalisations et la mise en évidence des flux et des relations. Fidèle à sa vision humaniste, RBF développe une argumentation qui vise à auto-éduquer la population, à éveiller les consciences sur les risques de déséquilibre des richesses. Il défend une vision écologique et systémique du fonctionnement du *vaisseau terre*, à travers des mises en réseau. Les démarches, travaux et visions de RBF caractérisent une démarche utopique qui prend naissance dans un contexte d'optimisme technologique et envisage un monde meilleur abolissant les contradictions et les fractures du développement économique (Picon 1997).

L'expérience sensible et la carte mentale : la psychogéographie situationniste

Le groupe d'artistes et d'activistes *de l'Internationale Situationniste* développe dans les années 1960-70 un ensemble de réflexions autour du dépassement des conditions du réel pour envisager la réalisation et l'épanouissement de l'individu. Ils considèrent le cadre matériel de notre environnement comme un élément participant à notre

⁹⁴ International Union of Architects

aliénation et ils proposent son réaménagement et son « éclatement » pour faire surgir des conditions nouvelles d'organisation des modes de vie. Les notions de *situation construite*, de *psychogéographie* ou d'*urbanisme unitaire* sont proposées comme des moyens et des méthodes de transformation du milieu urbain. Nous reprenons ici les définitions de ces concepts publiées dans le numéro 1 de la revue *Internationale Situationniste* paru en 1958.

Situation construite : Moment de la vie, concrètement et délibérément construit par l'organisation collective d'une ambiance unitaire et d'un jeu d'évènements.

Psychogéographie : Etude des effets précis du milieu géographique, consciemment aménagé ou non, agissant directement sur le comportement affectif des individus.

Urbanisme unitaire : Théorie de l'emploi d'ensemble des arts et techniques concourant à la construction intégrale d'un milieu en liaison dynamique avec des expériences de comportement.

Dérive : Mode de comportement expérimentale lié aux conditions de la société urbaine ; technique du passage hâtif à travers des ambiances variées. Se dit aussi, plus particulièrement, pour désigner la durée d'un exercice continu de cette expérience⁹⁵. (Collectif 1997).

Dans ce même numéro, Abdelhafid Khatib, présente une description psychogéographie des Halles de Paris. Il en décrit les méthodes, avec en premier lieu la *dérive expérimentale* comme moyen d'action et de connaissance. La lecture des cartes, des vues aériennes, des plans, la prise de connaissance d'informations statistiques ou sociologiques sont également considérées, l'auteur précise que ces lectures restent théoriques et qu'elles ne présentent pas la qualité d'une connaissance « active et directe ». Elles contribuent à la constitution d'une première représentation du milieu étudié qui pourra être enrichie de cartographies allant dans le sens d'une complexité plus grande et d'un enrichissement. La représentation la plus aboutie de ces

⁹⁵ Page 13

expérimentations est probablement *Le Guide psychogéographique de Paris, discours sur les passions de l'amour*, réalisé par Guy E Debord et publié en 1957. L'auteur parcourt la ville au hasard en se laissant guider par ses envies, ses sensations, ses passions, il applique la méthode de la *dérive* pour constituer son guide. Celui-ci retrace un trajet, défini par *l'affectivité* du milieu géographique sur le dériveur. Il représente des *unités d'ambiance* urbaine reliées entre elles par des flèches évoquant les points d'entrée et de sortie (Paquot 2010). L'expérience sensible est au cœur du processus de cartographie. Les cartes *psychogéographiques* composent des cartes mentales, elles rendent lisibles de nouvelles relations spatiales au sein de la ville, elles sont réalisées dans une forme participative et portent des valeurs politiques fortes.

Small multiples

Edward Tufte (Tufte 2001) est un pionnier dans le domaine de visualisation de l'information. Il a notamment rendu populaire le concept de *small multiples* pour qualifier une série de graphiques ou diagrammes similaires, utilisant la même combinaison de variables et illustrant l'évolution de la valeur d'un des paramètres. Ce mode de représentation facilite une lecture comparative et permet une évaluation de l'évolution d'un phénomène. L'agence d'architecture Hahn+Zimmermann, utilise cette forme de représentation dans son étude sur la qualité des dispositifs architecturaux dans une commune proche de Zurich (Figure 29). Le journal allemand Die Zeit produit également une représentation de ce type (Figure 28), elle montre l'évolution des températures sur le territoire entre 1881 et 2018, avec une accélération de leurs hausses depuis les 22 dernières années.

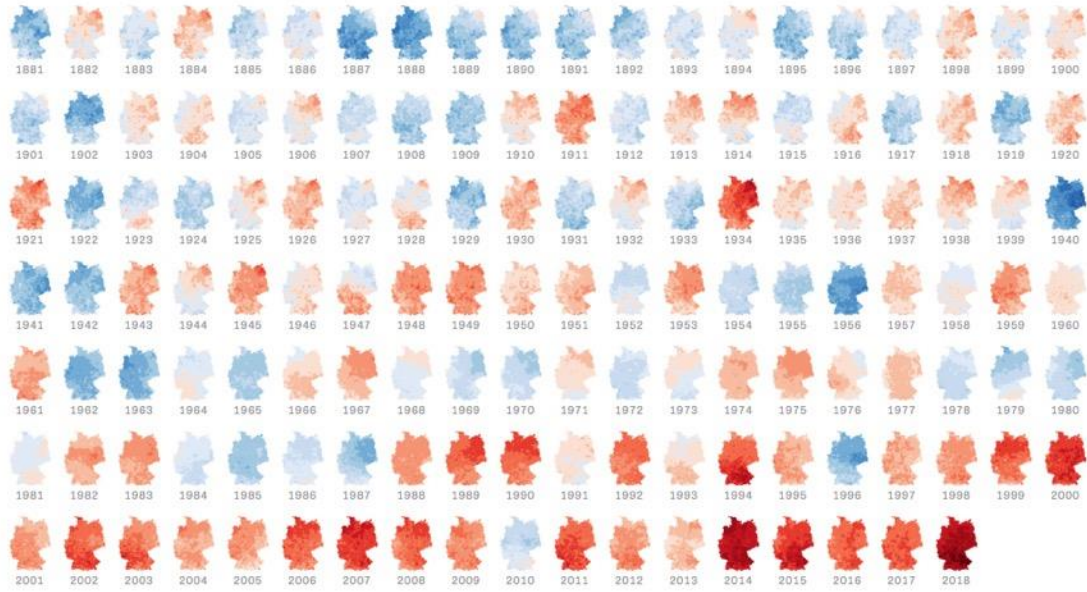


Figure 28. Composition de type *small multiple*, évolution des températures sur le territoire allemand entre les années 1881 et 2019, image produite par le journal Zeit, <https://www.zeit.de/wissen/umwelt/2019-12/klimawandel-globale-erwaermung-warming-stripes-wohnort>, consulté en mars 2020



Figure 29. Composition de type *small multiple*, Inventaire des types d'entrée dans le cadre d'une étude sur les qualités architecturales du quartier de Labitzke, Zurich. Réalisation Agence d'architecture Hahn+Zimmermann, <http://hahn-zimmermann.ch/projekte/visuelle-analyse-labitzke-areal-altstetten>, consulté en mars 2020

La donnée comme matière première de la création

En 1999, l'agence d'architecture *MVRDV* produit et présente une installation vidéo intitulée *Metacity / Data Town* (MVRDV 1999). En prenant comme point de départ de leurs analyses la forte interdépendance des zones urbaines, en considérant les échanges à des échelles continentales et en retenant les logiques de spécialisations des régions, les architectes proposent une étude dont les résultats prennent la forme de représentations de données. La description statistique et quantifiée des phénomènes urbains constitue l'essentiel des informations qui sont manipulées. Ces data deviennent les paramètres de représentations diagrammatiques et celles-ci composent un paysage abstrait. La construction de scénarios extrêmes, à travers la radicalisation des données et des statistiques, ainsi que la combinaison des paramètres retenus, permettent d'envisager des situations limites. Celles-ci alimentent en retour des prises de conscience et projettent de nouvelles formes et de nouvelles organisations urbaines. Dans un premier temps 12 mégapoles (Tokyo, Mexico, Jakarta, Shanghai, Randstad, Séoul, New York, Beijing, Bombay, Sao Paulo) sont décrites à travers 23 paramètres dont : la population, la superficie, la densité, la contribution au PIB national, la qualité de l'air, le nombre de passagers des transports en commun, la longueur des lignes de métro. Cette première analyse donne lieu à la constitution d'une ville théorique faite exclusivement de données quantifiées. Cette *ville* est inscrite dans un carré de 400 km de côté, elle est divisée en 25 secteurs, à chacun d'eux une superficie est allouée. On trouve notamment les secteurs dénommés *agriculture, aéroport, cimetière, nature sauvage, habitat, parc, divertissement, déchet, surface d'eau...* Sur la base de cette abstraction statistique des scénarios se développent pour envisager, par exemple, des formes d'habitat qui se déclinent de l'habitat individuel à une densification extrême. Des typologies traditionnelles sont identifiées, avec par exemple, les blocs barcelonais du plan Cerda, les tours de Hong Kong ou les villes-tours de Le Corbusier. Chaque scénario se traduit par une représentation, une visualisation diagrammatique, à la frontière entre une pure représentation graphique et une intention de spatialisation. Les scénarios peuvent être multi-paramètres en considérant des hypothèses de villes jardins intégrant les surfaces vertes. L'impact de chaque scénario est mesuré au regard de l'emprise de l'hypothèse dans le secteur théorique initial. Cette expérimentation illustre un travail dont la matière principale est faite de données quantifiées, manipulées à travers la construction de scénarios et conduisant à des représentations

diagrammatiques. Ce travail interroge les méthodes de planification urbaine aussi bien que les questions de visualisation de l'information.

Le détournement créatif des techniques de géolocalisation

Les dessins collaboratifs, constitués par les traces GPS produites au cours du déplacement du corps dans l'espace, offre un exemple de détournement créatif des technologies et propose une forme de *géocomputation sensible* en intégrant une dimension subjective et sensible. Jeremy Wood est artiste, formé au dessin, il s'empare des technologies de géolocalisation par satellite (*Global Positioning System, GPS*) pour en faire un instrument sensible de perception du territoire. Systématiquement équipé d'un GPS, il arpente les villes, les campagnes ou les montagnes, en capturant la mémoire de son cheminement (Lauriault et Wood 2009). Dans l'illustration Figure 30 l'expérimentation mobilise un groupe d'étudiants, à qui il est demandé de parcourir le campus universitaire, non pas en suivant les routes et les voies, mais plutôt en marchant à travers les champs et les pelouses (Marin et Karolak 2017). Les parcours sont construits en fonction de la singularité de la parcelle. Sa forme, son orientation, la présence d'obstacles, la ligne d'horizon, les événements, les sensations constituent un jeu de contraintes initiateur des trajectoires. Les parcours sont enregistrés, les informations sont traitées et rassemblées pour constituer une cartographie poétique, une symbolisation nouvelle du campus. Ici le GPS ne guide plus, il trace et il enregistre un déplacement. Les qualités et les caractéristiques du territoire sont rendues visibles et lisibles à travers les tracés qui sont le résultat d'une implication corporelle et physique, d'un parcours à pieds, d'une marche systématique à travers les prés, en évitant les routes et des rues, entre les bâtiments et les constructions. Dans une forme de renversement, c'est le corps sensible et la culture de l'observateur qui sont les vecteurs de mesure et de perception de l'espace. A la manière des premiers tracés au sol, réalisés il y a trente-cinq siècles, et qui se constituaient par une implication corporelle, l'expérience décrite ici, mobilise le corps dans la constitution de la trace, tout en s'appuyant sur un système technique hautement avancé pour encoder, traiter, représenter et mettre en forme ces marques numériques.



Figure 30. Traces GPS, carte du Campus de Grenoble. © Jeremy Wood, 2017, avec la participation des étudiants de l'ENSAG et de l'auteur. Reproduit avec permission.

3.4.3. *Les principes de la cartographie traditionnelle*

Ces derniers paragraphes visent à identifier quelques principes de réalisation des visualisations de données, nous limitons notre examen aux techniques associées plus particulièrement aux cartographies et aux données géolocalisées. Nous terminons par un inventaire des formes de cartes que nous rencontrons aujourd'hui. Ce chapitre peut se comprendre comme un « guide des principes ». Nous envisageons ces modes de représentation en tant qu'outils de la conception architecturale et urbaine, tout aussi bien que d'outils pour la recherche en architecture. Ces instrumentations participent à la délimitation du flux informationnel numérique que nous nous proposons de délimiter.

Les principales étapes de la cartographie

Jacques Bertin (Bertin 1977) reprend les différentes étapes d'un processus de cartographie. Il appuie cette formulation sur l'étude d'un exemple de visualisation de l'information qui a permis de guider les réflexions et les décisions. L'auteur identifie 5 étapes : 1) la définition du problème, 2) la collecte des données, l'identification des types de variables et leurs organisations, 3) l'identification d'un langage de traitement, en considérant son efficacité visuelle et sa *mobilité*, c'est à dire sa facilité de reconstruction multiple et de manipulations successives, 4) le traitement des données, à travers des activités de simplification et de regroupement des ressemblances, 5) l'interprétation et la prise de décision ou la communication des résultats. Par ailleurs l'auteur précise la notion de *quantité d'information*, à laquelle il préfère la notion de *niveaux d'information*. Celui-ci correspond aux niveaux des questions auxquelles la représentation doit apporter des réponses ainsi qu'aux *niveaux de lectures* qui sont offerts. Trois niveaux d'information sont identifiés : un *niveau élémentaire*, qui correspond à la granulométrie la plus fine des données, un *niveau moyen*, qui correspond à des regroupements en sous-ensemble, un *niveau d'ensemble*, qui met en exergue les relations entre les ensembles de composantes.

Edward Tufte (Tufte 2001) propose dans son ouvrage de revenir sur les qualités d'une représentation statistique de l'information. Il relève l'importance : 1) du choix du format du support, 2) de l'association de mots, chiffres et dessins, 3) de révéler un équilibre, une proportion, un sens de l'échelle pertinente, 4) de faciliter l'accès à la

complexité des détails, 5) de présenter une qualité narrative, 6) d'assurer une qualité de production, 7) d'éviter les éléments décoratifs superflus. L'auteur identifie trois grands principes qui soutiennent la qualité d'une représentation graphique. Le premier principe repose sur la clarté, la précision et l'efficacité à communiquer une idée complexe. Le second est associé à sa capacité à offrir au regardeur le plus grand nombre d'idées dans le temps le plus court, en utilisant le « moins d'encre possible » et prenant le moins de place possible. Le troisième principe renvoie au fait que la représentation est le plus souvent constituée de variables de natures multiples.

Présenter, extraire, tracer

James Corner (Corner 1999), quant à lui, identifie trois opérations principales dans l'activité de cartographeur : la constitution des *choix de présentation (field)*, l'*extraction* des informations (*extract*) et le travail de *présentation (plotting)*. Les *choix de présentation* portent sur l'identification des échelles, du système de projection, du choix des symboles ou des couleurs, des unités de mesure, des formes et des géométries manipulées, des valeurs esthétiques et visuelles. Cette activité est cruciale dans le processus de création et dans sa capacité à révéler de nouvelles compréhensions de la réalité. *L'extraction* s'attache à l'identification des informations et des données qui vont être représentées. C'est une activité de sélection et d'isolement des informations, celles-ci seront recombinaées dans un second temps. Le *travail de présentation* s'intéresse à la mise en forme des données, à leur hiérarchisation et à la mise en avant de leurs relations. Elle est une activité créative et imaginative, elle doit permettre l'émergence de nouvelles structures, de nouvelles configurations.

Les variables visuelles

Il est tout d'abord nécessaire de distinguer les types de variable. Celles-ci peuvent être *nominales*, *ordinales*, *d'intervalle* ou de *ratio*. Une variable *nominale* renvoie à une catégorie nommée, par exemple les catégories de genres, sa valeur correspond au nombre d'éléments dans cette catégorie. Des variables *ordinales* sont ordonnées, elles renvoient à un classement, par exemple les résultats d'une course. Des variables *d'intervalles* sont elles aussi ordonnées et elles sont inscrites dans des catégories comparables. Les variables peuvent être qualitatives, elles expriment une qualité, le

métier par exemple, et c'est le cas à la fois pour les valeurs nominales et ordinales. Elles peuvent être quantitatives, pour les valeurs d'intervalle et de ratio, elles sont alors associées à des valeurs mesurables, par exemple la distance ou la vitesse (White 2017).

Ces types de variable peuvent être associées à des représentations visuelles. Jacques Bertin (Bertin 1977) définit 7 variables de forme (Figure 31) qui permettent de représenter visuellement les données. La *position* (en X et Y sur un plan à 2 dimensions), la *taille*, le *grain* (motif de remplissage d'une surface), la *couleur*, l'*orientation* et la *forme*. Ces signes visuels constituent des primitives de base pour représenter des données. Ces variables peuvent s'appliquer aux figures élémentaires de la géométrie, et dans un espace à 2 dimensions, ces figures sont le point, la ligne ou une zone. Bertin appelle ces taches visibles élémentaires des *implantations*. Par ailleurs, ces variables peuvent se combiner pour enrichir les représentations. Cet inventaire a été par la suite enrichi en intégrant les notions de *texture* (image de remplissage d'une surface), de niveau de *netteté* ou du niveau de *flou*, en décomposant la couleur par ses composantes de saturation, de luminosité ou de saturation, en intégrant des mesures d'angles ou de volumes. L'animation et le déplacement dans le plan permettent également de représenter des variables temporelles. En fonction du type des données, certaines variables visuelles présentent des qualités de lecture, de compréhension ou de comparaison, plus adaptées que d'autres.

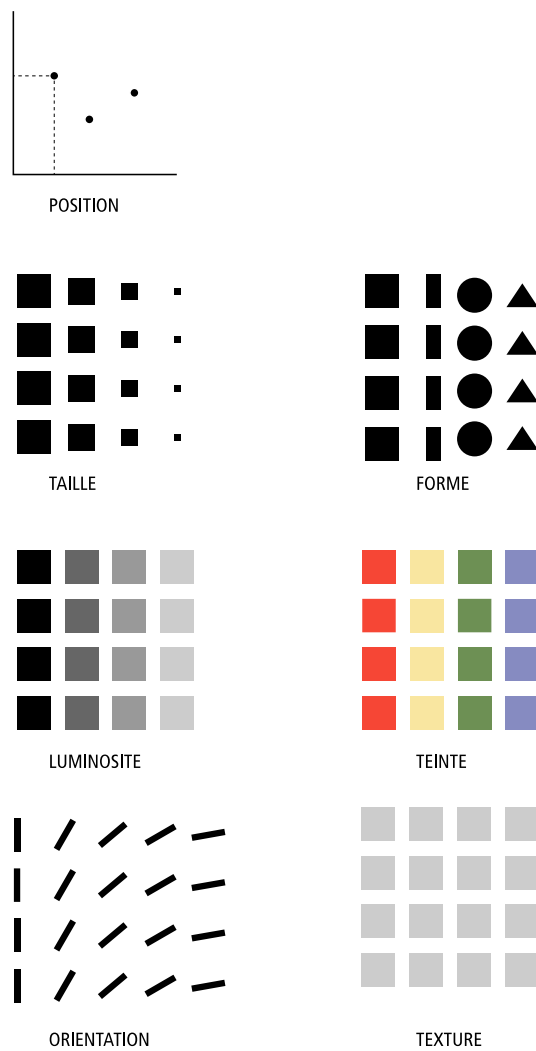


Figure 31. Variables visuelles de la graphique

La nature des correspondances entre les données

Jacques Bertin (Bertin 1967) distingue et définit quatre groupes de représentations graphiques : les *diagrammes*, les *réseaux*, la *cartographie*, la *symbolique*. Les caractéristiques de ces représentations sont fonction de la nature des correspondances entre les données.

Lorsque les correspondances dans le plan peuvent s'établir : entre toutes les divisions d'une composante, et toutes les autres composantes, la construction est un diagramme. (...)

*Lorsque les correspondances dans le plan peuvent s'établir :
entre toutes les divisions d'une même composante, la
construction est un réseau. (...)*

*Lorsque les correspondances dans le plan peuvent s'établir :
entre toutes les divisions d'une même composante, disposées
suivant l'ordre géographique, le réseau trace une carte
géographique. (...)*

*Lorsque la correspondance ne s'établit pas dans le plan mais
entre un seul élément du plan et le lecteur, la correspondance
est extérieure à la représentation graphique. C'est un
problème de symbolique⁹⁶ (Bertin 2013).*

Dans son ouvrage de 1977, Bertin généralise sa définition de *carte géographique*, pour la considérer comme une composante d'un groupe plus large dénommé *réseau ordonné* ou *topographie*. Une topographie constitue un réseau ordonné et représente un objet matériel. Cet objet matériel peut aussi bien être un espace géographique, un être vivant ou une machine.

Carte à lire et carte à voir

Nous avons dit que le choix des variables visuelles rend la représentation plus ou moins opérante et efficace. Bertin distingue les représentations qui nécessitent la prise de connaissance de la légende pour répondre à la question posée par la carte, elles sont qualifiées de *carte à lire*. Les *cartes à voir*, quant à elles, permettent de percevoir la structure des informations, elles facilitent la lecture du dessin, elles présentent des qualités opérantes de compréhension, elles sont dites plus *efficaces*, ou *prégnantes*. La notion d'efficacité d'une représentation visuelle est définie par l'auteur :

*Si pour obtenir une réponse correcte et complète à une
question donnée, et toutes choses égales, une construction
requiert un temps d'observation plus court qu'une autre*

⁹⁶ Page 50

*construction, on dira qu'elle est plus efficace pour cette question*⁹⁷ (Bertin 2013).

Ainsi le choix de variables visuelles et les modes de simplification des informations, appelé également *généralisation cartographique*, se révèlent particulièrement important pour assurer la bonne lisibilité de la représentation.

Les valeurs équidistantes et le choix des bornes

La compréhension des représentations visuelles passe également par la pertinence des correspondances entre l'échelle des quantités et la gamme des signes disponibles. Ces correspondances doivent faire émerger des groupements, des ressemblances ou des structures de données. La visibilité de ces regroupements est étroitement associée au *choix des bornes des intervalles de données*. Ce choix et leurs déplacements permettent l'apparition des groupements, de structures au sein des données. De la présentation de cette organisation émerge une information. Certaines bornes peuvent être redéfinies pour faciliter l'apparition des structures d'information. Les outils statistiques de calcul des moyennes, médianes ou écarts types ne sont pas suffisants pour établir ces limites. Ainsi la distribution des nombres et la nature des extrémums peuvent devoir être considérées.

Le choix des couleurs

Le choix des couleurs est particulièrement important dans la construction d'une représentation graphique. Une couleur se caractérise par sa teinte, sa saturation et sa luminosité. La construction du nuancier des couleurs est à rapporter aux types des valeurs mis en forme. Des valeurs qualitatives devront être associées à un nuancier composé de classes de couleurs séparées. Des valeurs ordinales, inscrites dans une séquence, se rapportent à des couleurs composant un dégradé. Des intervalles constitués de valeurs divergentes sont associés à une suite de couleurs définies par des teintes complémentaires (Figure 32).

Quelques principes accompagnent la définition colorimétrique d'une représentation visuelle. Le nombre de couleurs différentes doit rester limité, sept couleurs (± 2), et les

⁹⁷ Page 139

couleurs peuvent être rassemblées par groupes. Des conventions culturelles et symboliques peuvent également être prises en compte. Les compositions peuvent intégrer des contraintes de lisibilité des contrastes pour les personnes à la vision déficiente, ou dans le cadre de contraintes de reproduction des documents. L’outil en ligne « Colorbrewer⁹⁸ » facilite la définition de ces palettes de couleurs.

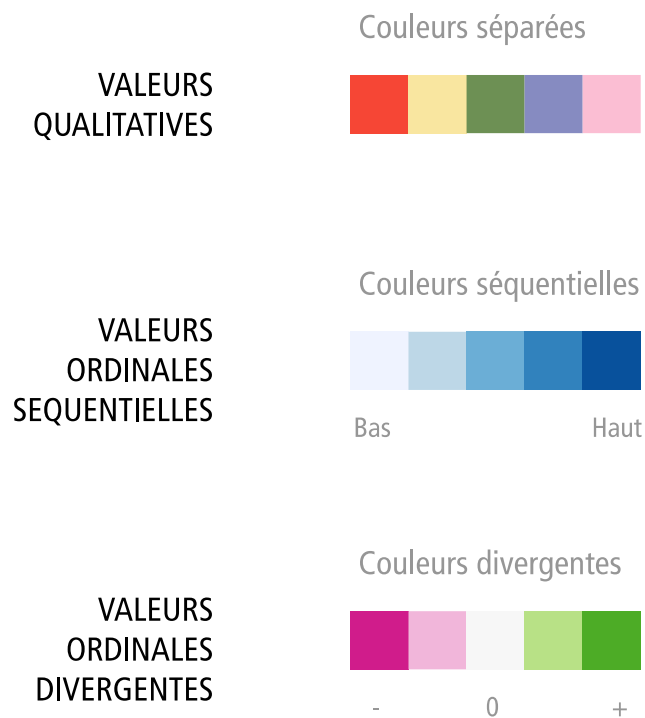


Figure 32. Principes de composition des nuanciers de couleurs en fonction des types de valeur

3.4.4. Typologies des représentations visuelles

L’agence d’infographie Ferdio propose un inventaire des typologies de représentations visuelles de l’information. Ces exemples sont consultables depuis un site internet⁹⁹ et l’accès aux descriptions se fait en choisissant : un type de représentation, la structure des données en entrée, la fonction de la représentation ou le type de formes utilisées. Cette base de données en ligne nous a permis de construire en partie la liste des typologies suivantes. Les descriptions sont complétées d’informations et de références et parfois illustrées de représentations historiques ou issues d’expérimentations

⁹⁸ <http://colorbrewer2.org/> (consulté le 18 avril 2019)

⁹⁹ <https://datavizproject.com/> (consulté le 19 juillet 2019)

spécifiques. Nous précisons que nous limitons cet inventaire aux représentations cartographiques en laissant de côté les représentations en diagramme, réseau ou graphique.

Les cartogrammes

Un cartogramme, ou carte en anamorphose, est une carte dont la surface des symboles visuels est déformée en fonction de la valeur des variables associées. Dans la Figure 33 la surface des régions françaises est rapportée à leur population. Les cartogrammes se déclinent en différentes variantes. Ils peuvent être continus, les éléments constitutifs sont adjacents, ou discontinus, la carte est alors construite de formes éclatées et espacées. Ils sont dits *graphiques*, lorsque la déformation est appliquée à un symbole abstrait qui est ré-agencé dans un second temps pour reconstituer la carte (Fish 2018). Les cartogrammes de Dorling agencent des cercles (Figure 34), les cartogrammes de Demers se composent de quadrilatères.

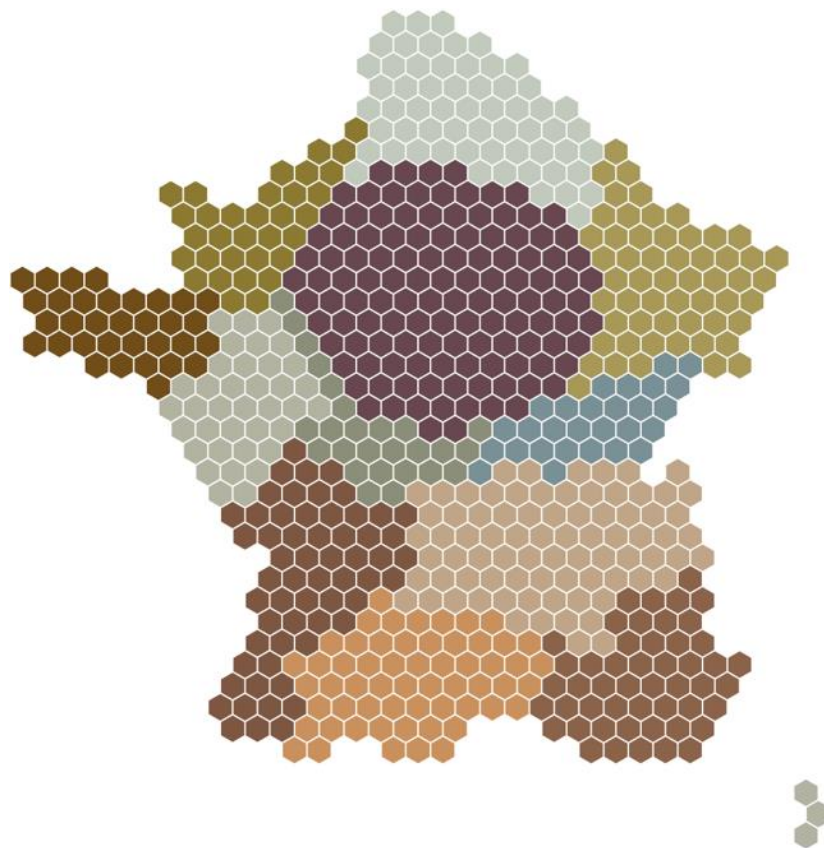


Figure 33. Cartogramme de la population française par région (Généré avec Tilesgrams), travaux de l'auteur, 2019

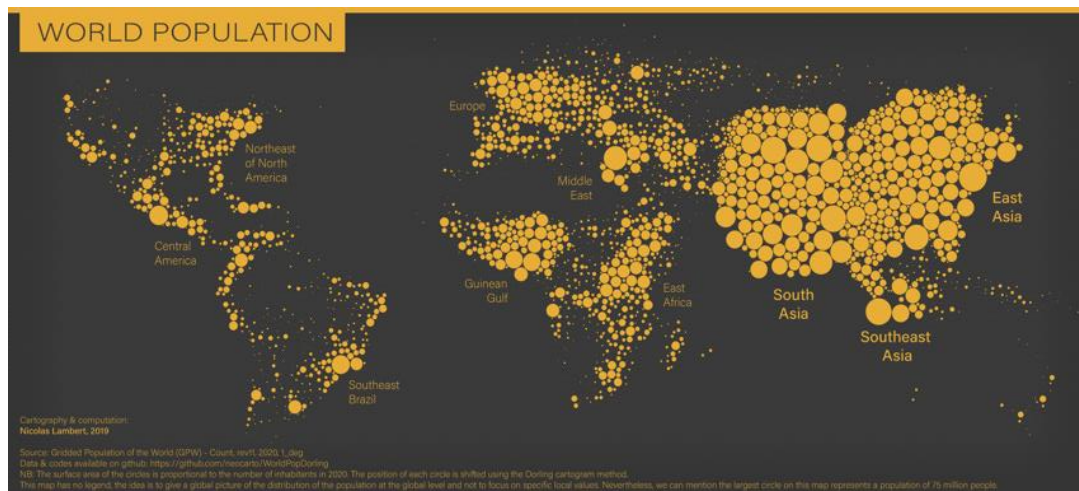


Figure 34. Exemple de cartogramme de Dorling, population mondiale, réalisation Nicolas Lambert, 2019, consulté 19 février 2020, <https://neocarto.hypotheses.org/6201>

Le cartogramme en mosaïque est une variante du précédent qui maintient la topologie et les relations de proximité entre les symboles (Field 2017). Ici le motif est constitué d'une grille régulière de forme quadrilatère ou hexagonale. La taille de ce quadrillage est définie en fonction de l'échelle de la carte et de la résolution des données représentées. Dans la situation où la cellule recouvre des zones dont la valeur du paramètre étudié est multiple, la cellule peut prendre une valeur chromatique interpolée. Ces cartes permettent la comparaison des régions étudiées. Une des limites de ces représentations repose sur les possibles difficultés de lecture offertes par l'anamorphose. Dans certaines de ces représentations la constante géographique, la reconnaissance commune de la représentation géographique, peut être perdue.

Les cartes faites d'isolignes

Les *isolignes* relient les points de valeur égale. Ces valeurs peuvent rendre compte de la température, du niveau de pollution, de l'altitude, du temps de voyage par rapport à un point. Dans le cas où les *isolignes* relient des points de même altitude, on parle de carte topographique. Dans le cas où les lignes relient les points de qui se trouvent à un même temps de voyage par rapport à un ou plusieurs points de référence, on parle de carte isochrone. Ces représentations sont utilisées pour des lectures comparatives ou pour prendre connaissance de la distribution des phénomènes sur un territoire. La Figure 35 montre une carte des temps de trajet sur le territoire français depuis Paris en 1882.



Figure 35. Carte des communications rapides entre Paris et le reste de la France. Dressée par E Martin ; E. Chevallier, del, 1882. Source ; University of Chicago Map Collection

La carte choroplèthe

La carte choroplèthe est une carte thématique dans laquelle les régions sont colorées, ou remplie d'un motif, et représentent une valeur statistique, quantifiée ou qualifiée. Ces cartes facilitent la comparaison ou la distribution des valeurs au sein d'une aire géographique. Ce type de représentations est utilisé par l'agence 300000kms dans le cadre du projet *Big Time BCN* (Figure 36). La représentation est interactive, elle permet de naviguer dans la zone géographique de Barcelone et de prendre connaissance du

patrimoine architectural. Les périodes de construction et les niveaux de protection sont représentés à l'aide de couleurs.



Figure 36. Carte interactive du patrimoine de la ville de Barcelone, Réalisation 300000kms, consulté le 19 février 2020, <http://bigtimebcn.300000kms.net>

La carte de densité de points

La carte de densité de points utilise un point, ou un autre symbole, pour représenter la présence d'un phénomène ou d'une qualité. Ces symboles sont localisés et leurs densités indiquent des concentrations plus ou moins importantes. Les symboles peuvent représenter un enregistrement unique ou une quantité d'enregistrement d'un phénomène. La taille du symbole reste fixe mais sa couleur peut changer pour représenter une variété de phénomènes. Un exemple célèbre de ce type de représentation est la carte du Dr Snow montrant les amas de cholera à Londres en 1854 (Figure 27).

Une carte de densité de points plus récente est illustrée par la Figure 37. Elle est produite par Eric Fisher et montre la géolocalisation des photos déposées sur Flickr et Picasa pour la région parisienne. Trois catégories sont identifiées, en bleu les photos prises par des habitants sur une période de 1 mois ou plus, en rouge les photos prises par des visiteurs sur période de 1 mois, en jaune les photos prises par des personnes dont la catégorie n'est pas définie. La prise de vue est représentée par un point sur un

fond de carte construit à partir d'*Open Street Map*. La carte illustre les zones d'attractivité et de fréquentation de la métropole. Eric Fisher a réalisé ce type de représentation pour une cinquantaine de villes. Le travail explore l'usage des traces numériques et des métadonnées disponibles sur les plateformes internet pour produire des représentations visuelles ouvrant de nouvelles formes d'interprétation du métabolisme urbain. Cette forme de cartographie est rendue possible par un traitement computationnel ainsi que par l'usage des données ouvertes.

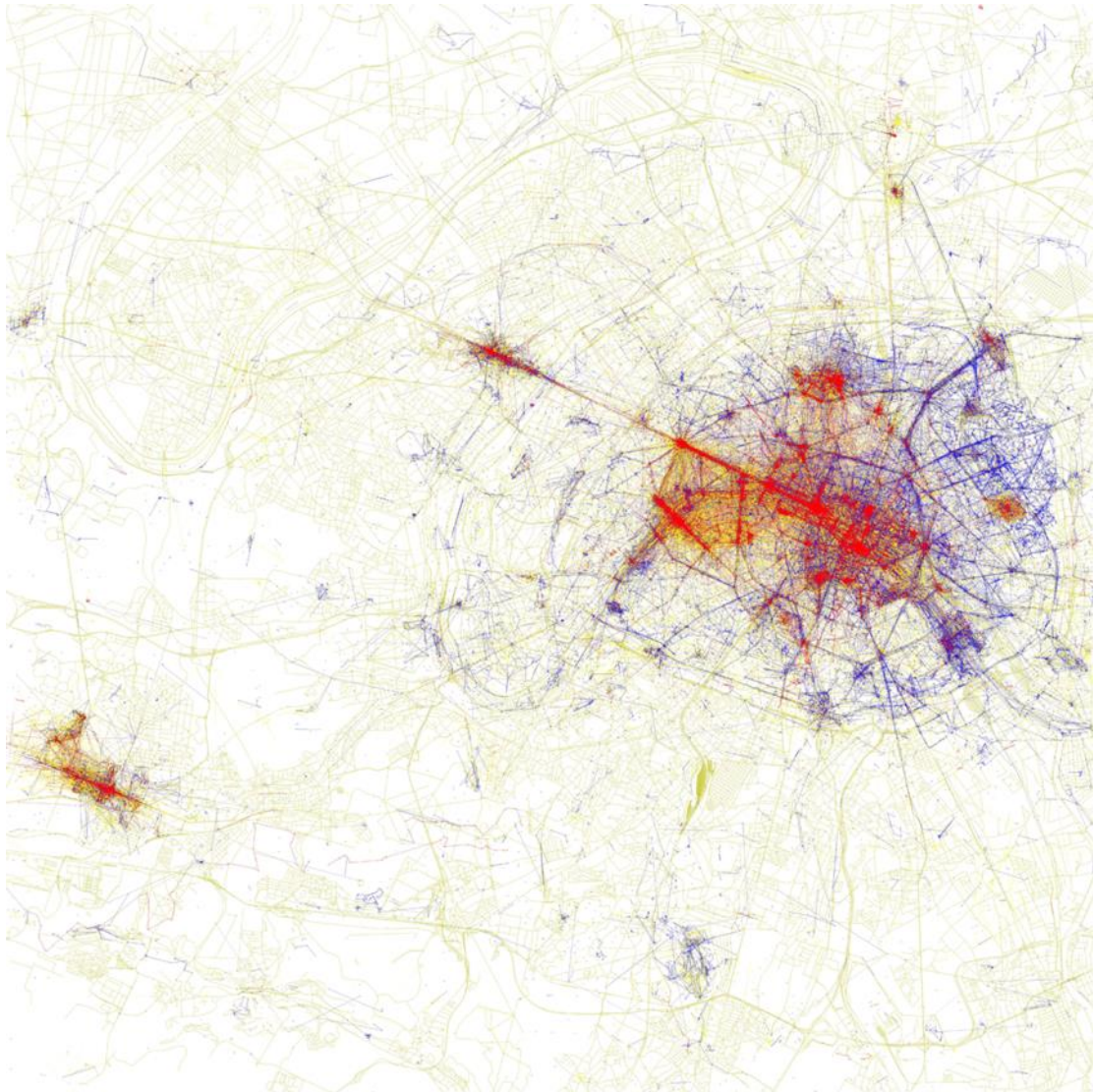


Figure 37. Carte de géolocalisation les photos déposées sur Flickr et Picasa. © Eric Fisher, 2010. Base map © OpenStreetMap, CC-BY-SA

La carte de symbole proportionnel

Ce type de carte positionne des symboles sur un fond de carte. Les symboles peuvent être des points, des symboles simples ou des graphiques en barres ou circulaires. Dans le cas de symboles simples, c'est la taille du symbole qui varie proportionnellement à la valeur des paramètres étudiés. Dans le cas d'utilisation de graphiques ceux-ci sont localisés à l'intérieur des zones étudiées. Ce mode de représentation facilite des lectures comparatives des données géolocalisées.

La carte de flux

La carte de flux intègre à un fond de carte un diagramme de Sankey. Elle permet de représenter le mouvement des flux d'une localisation à une autre. La taille de la connexion peut être associée à l'importance du flux. Une des premières représentations montrant un flux de personnes entre des positions géographique est la *Carte des pertes successives en hommes de l'armée française dans la campagne de Russie de 1812 à 1813* réalisée par Charles Joseph Minard (Figure 38). Ces représentations sont pertinentes pour faciliter des lectures comparatives, des corrélations ou des distributions de phénomènes géolocalisées.

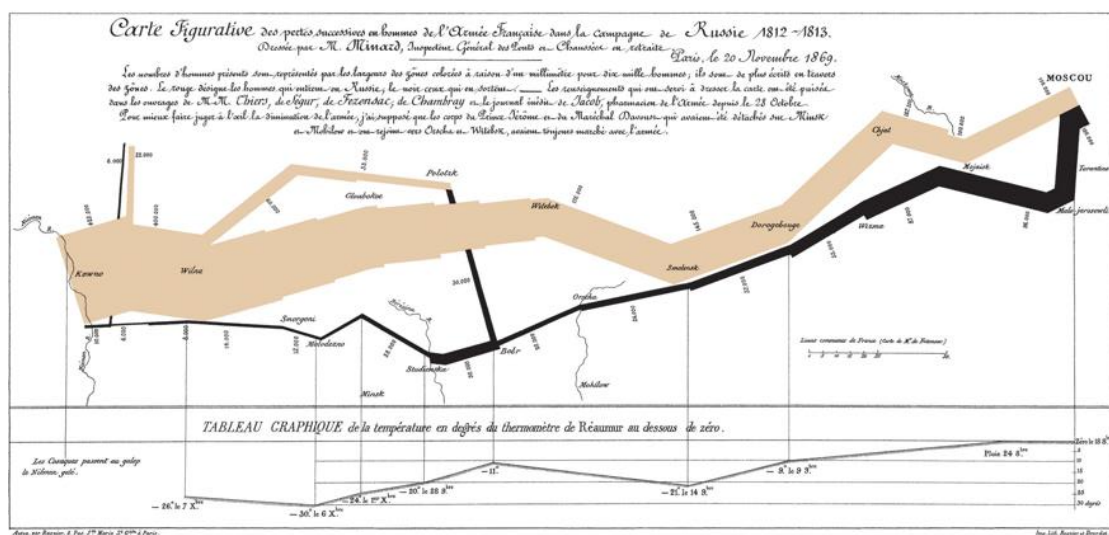


Figure 38. Carte montrant le nombre d'hommes au sein de l'armée de Napoléon lors de la campagne de Russie de 1812, leurs mouvements, ainsi que les températures rencontrées lors du retour. Lithographie, 62 × 30 cm © Charles Minard, 1869.

Ces représentations s'appuient sur la collecte de données statistiques qui dans un second temps sont transcrites dans une forme visuelle. Dans l'exemple de la Figure 39, réalisée par Charles-Joseph Minard en 1861, le diagramme des flux reprend le réseau des voies d'eau et de fer, la largeur de la voie est associée au tonnage de marchandises transportées, le réseau est combiné à une représentation géographique. Celle-ci est composée du fond de carte de la France faisant ressortir les limites administratives du pays et les principales villes.

convoquées sont constituées de traces numériques et les parcours sont générés par des algorithmes de calcul des trajets. Ces deux dernières approches, réalisées à 150 ans d'écart, reposent toutes deux sur une rigueur mathématique, mais les domaines et les méthodologies sont radicalement différents. Si l'ingénieur des Ponts-et-Chaussées s'applique rassembler une information statistique, l'artiste et programmeur Eric Fisher fait appel à des algorithmes et des tirages aléatoires au sein d'amas de données. Dans le premier cas les données sont issues de collectes méthodiques et centralisées par des administrations étatiques, dans le second cas les données sont constituées de traces numériques déposées parfois à l'insu des producteurs eux-mêmes et l'accès est rendu public par des démarches d'ouverture des données.

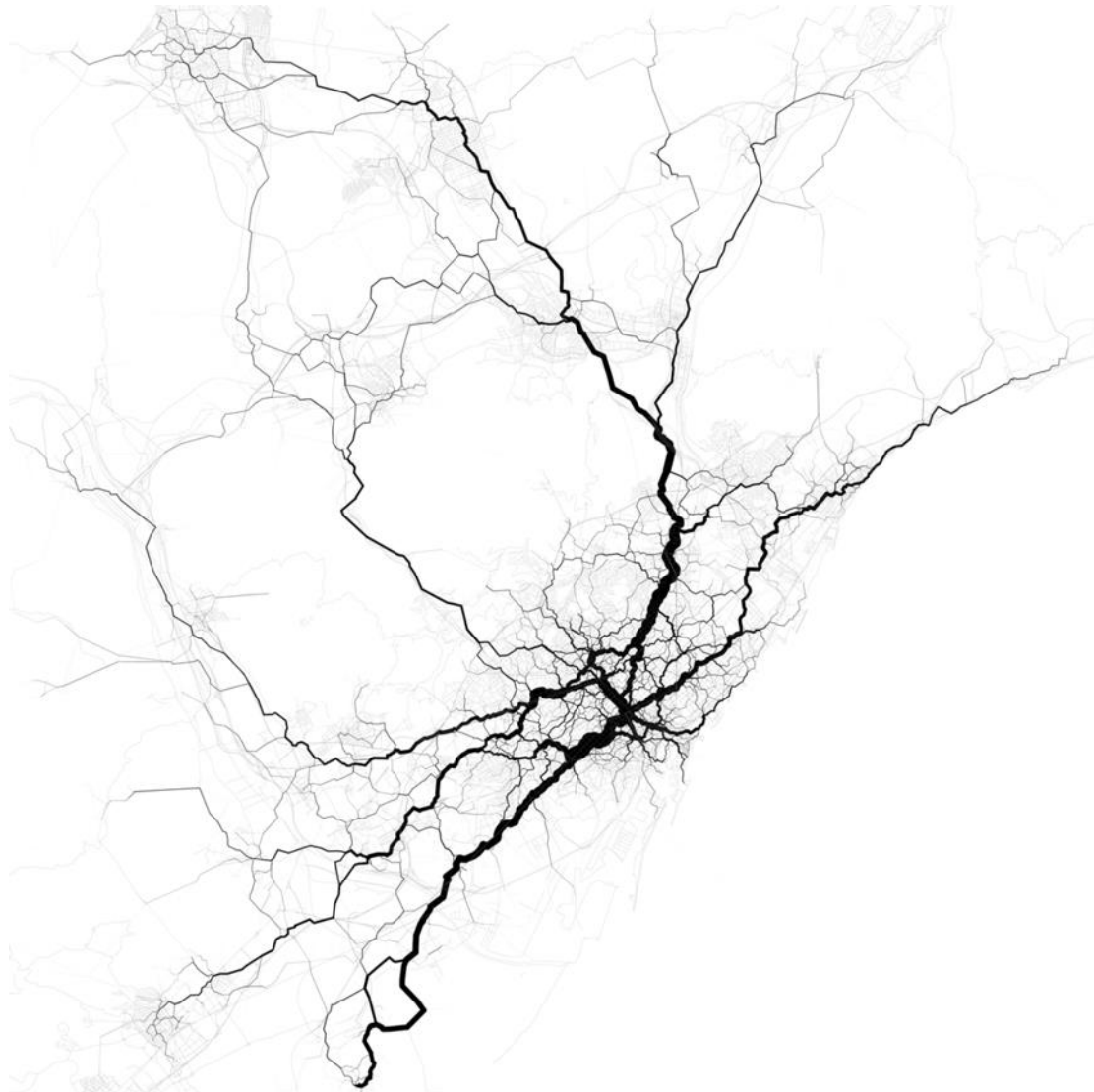


Figure 40. Carte de trajets à Barcelone. Réalisée à partir la construction aléatoire de 30 000 parcours reliant 10 000 tweet géolocalisés et choisis aléatoirement. © Eric Fisher, 2011. Data from the Twitter streaming API. Base map © OpenStreetMap, CC-BY-SA

3.4.5. Techniques de cartographie numérique

Web cartographie

Avec le développement de l'internet de nombreuses cartes sont conçues pour une consultation en ligne via des navigateurs internet pour périphériques fixes ou mobiles. L'Association des Géographes Américains (*Association of American Geographers*) a édité un manuel¹⁰⁰ décrivant les techniques de cartographie en relation avec les technologies de communication (DiBiase et al. 2016).

Les cartographies numériques en ligne s'appuient sur une architecture client-serveur et utilisent des services et fonctionnalités des systèmes d'information géographique en ligne. Les informations peuvent être issues de base de données interrogées en ligne ou peuvent être chargées sur le serveur. Des plateformes proposent des fonctionnalités et des interfaces d'affichage des informations et mettent à disposition des *Interfaces de Programmation d'Application* (API) pour traiter les données et offrir des fonctionnalités d'interaction.

C'est à partir de 2005 que Google a promu un service web permettant un affichage de cartes géo-référencées « tuilées » (*Web Tile Map Service* (WMTS)). Les tuiles correspondent à des images pré-calculées qui composent un damier pour remplir la zone de l'écran. L'image est fonction du niveau de zoom et de la position de la carte sur le planisphère. Cette technique rend possible la mise à jour de la carte de manière fluide et sans rechargement de la page grâce à une requête AJAX (*Asynchronous Javascript and XML*). Le *Pseudo-Mercator* ou *Web Mercator* (code EPSG:3857) correspond au système de projection utilisé pour l'affichage des informations en ligne. Les fonctionnalités d'interaction sont encodées en Javascript et intégrées dans une page HTML constituant l'*interface utilisateur* (UI). Celle-ci organise les informations, intègre les fonctionnalités d'interaction, et collecte les activités de l'utilisateur. Les plateformes de *web mapping* facilitent l'intégration d'informations géographiques existantes, permettent la définition des styles, mettent à disposition des composants d'interaction et offrent des services d'hébergement et de partage des cartes. Ces solutions intègrent également des fonctionnalités de réorganisation des affichages en fonction des types et tailles de périphériques, elles permettent la conception

¹⁰⁰ <https://gistbok.ucgis.org/bok-topics/web-mapping> (consulté le 18 octobre 2019)

d'applications dites adaptatives (*responsive design*). La Figure 41 montre une capture d'écran d'une cartographie interactive développée avec *Mapbox*¹⁰¹.



Figure 41. Capture écran application Mapbox, application développée par Ryan McCullough, <http://ryantm.io/buildings/>, consulté en mars 2020

L'analyse des expérimentations et réalisations conduites par l'agence *morphocode*¹⁰² permet d'identifier les principales étapes et enjeux d'un projet de cartographie interactive. Nous retrouvons des caractéristiques spécifiques à l'environnement web et d'autres principes issus des règles traditionnelles de la *graphique*.

- La première étape doit conduire à la définition du propos de la carte.
- La deuxième étape s'intéresse aux données disponibles, elles considèrent les formats de données, les modes de collecte, elle opère des tris et des réorganisations, elle identifie les types de variables (qualitative, quantitative, ordinale). L'usage de logiciels SIG peut être nécessaire pour manipuler ces données géographiques.
- La troisième étape porte sur la conception de la carte, elle passe par un choix de couleurs (couleurs individuelles, couleurs ordonnées, gradient de couleurs) et un choix de variables visuelles.
- La quatrième étape s'intéresse aux dimensions interactives de la carte, elle porte

¹⁰¹ *Mapbox est un exemple de service de wap mapping : <https://www.mapbox.com> (consulté le 17 octobre 2019)*

¹⁰² *<https://morphocode.com> (consulté le 17 octobre 2019)*

sur la définition des niveaux de zooms ou des styles des tuiles.

- La cinquième étape constitue un travail de conception de *l'expérience utilisateur* (UX), avec la définition et la programmation des fonctionnalités d'interaction, d'organisation et de hiérarchisation de l'information, d'adaptation de l'interface aux types de périphériques, de prise en compte des contraintes d'accessibilité ou de lisibilité.

Du SIG à la CAO :

Une autre approche se révèle pertinente, elle repose sur un travail de couplage des outils SIG et CAO. Dans leurs travaux sur les favelas, les auteurs (Lima Costa, Cardoso, et Freitas 2019) proposent un système d'information, intégrant différents outils et modes de stockage de l'information. Une base de données (de type PostgreSQL) centralise les informations urbaines disponibles. La base de données est interrogée et alimentée à la fois par un logiciel SIG (de type de *Qgis*¹⁰³) et par un modéleur paramétrique (de type *Rhinoceros* et *Grasshopper* à l'aide de l'extension *Slingshot*¹⁰⁴). Des traitements statistiques peuvent également être opérés sur les données stockées dans la base. Cet exemple illustre la mise en place d'un système d'information combinant plusieurs environnements logiciels et organisé autour d'une base de données.

Il est particulièrement intéressant d'exploiter les données urbaines ouvertes au sein des environnements paramétriques. Ainsi, par exemple, les données disponibles sur la plateforme de cartographie collaborative *OpenStreetMap*¹⁰⁵ peuvent être exportées et réintégrées dans l'environnement *Grasshopper*. Le modèle paramétrique permet l'intégration d'autres informations géolocalisées ou structurées, leurs traitements et la construction de représentations cartographiques ou interactives. La Figure 42 illustre cette démarche avec une analyse comparative d'un tissu urbain entre trois communes.

¹⁰³ Système d'information Géographique libre et Open Source. <https://www.qgis.org/fr/site/> consulté le 10 janvier 2020

¹⁰⁴ Slingshot est une extension de Grasshopper permettant d'interroger des bases de données à la l'aide de la construction de requêtes SQL. <https://www.food4rhino.com/app/slingshot> consulté le 10 janvier 2020

¹⁰⁵ <https://www.openstreetmap.org> consulté le 10 janvier 2020

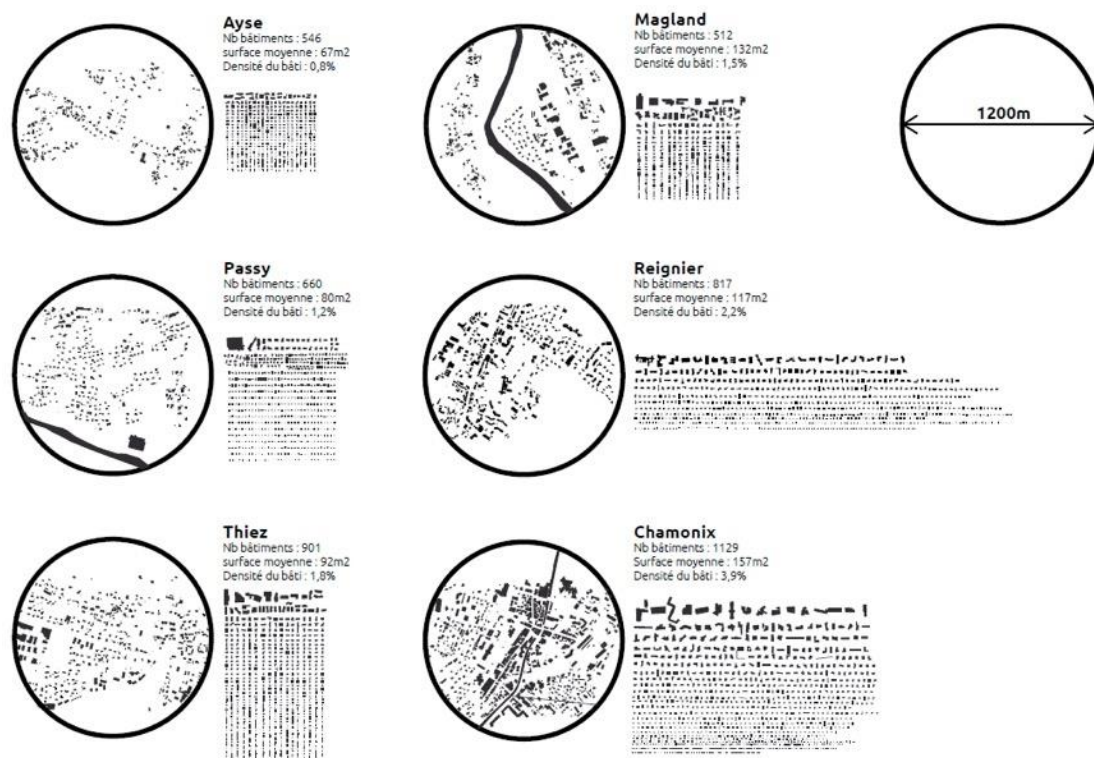


Figure 42. Exemple de traitement de données urbaines issues d'OpenStreetMap et importées dans Grasshopper, ENSAG, séminaire de Master, travaux de l'auteur, 2015

Inventaire des fichiers et des extensions grasshopper :

Depuis les développements des technologies et standard de l'internet plusieurs formats de données urbaines ont été définis, nous reprenons dans ce dernier paragraphe un inventaire des formats de fichiers de données urbaines (Figure 43) ainsi qu'une liste des extensions grasshopper facilitant l'importation et le traitement de ces données (Figure 44).

Nom du langage	Description
Virtual Reality Modeling Language (VRML)	Langage de description de scènes en 3 dimensions, c'est un langage d'affichage et de présentation des univers 3D, des fonctionnalités d'interaction sont disponibles. Il a été défini en 1995 par le « web 3D consortium ».
Extensible 3D (x3D)	Langage de description de scène 3D pour le web, il a été défini en 1998 par le web 3D consortium, pour succéder au VRML, en

	intégrant une syntaxe XML.
Keyhole Markup Language (KML)	Langage de description de scène en 3D et permettant l’affichage de données géographiques, il est encodé avec une structure XML. C’est le format de lecture des données dans Google Map® et Google Earth®. Depuis 2008, le format est normalisé par le « Open Geospatial Consortium »
Collaborative Design Activity (Collada)	Format d’échange pour les modèles 3D, il utilise une structuration XML
Geography Markup Language (GML)	Format d’échange des données géographiques, il utilise une structuration XML, il est développé comme un langage ouvert, normalisé par le « Open Geospatial Consortium ». En plus des descriptions géométriques, des informations géographiques, de la définition du système de projection, il permet de stocker les attributs des objets
City Geography Markup Language (CityGML)	Format d’échange des données urbaines et paysagères, il intègre les objets bâtiments, voix d’eau, routes, végétation (...), il est basé sur le format GML, il est normalisé par le « Open Geospatial Consortium ». Chaque description d’objet est associée à un <i>niveau de détails</i> (LOD) pour faciliter leurs usages en fonction des types d’applications. Les niveaux de détails vont de 0 à 4, de la définition de la topographie et des composantes géographiques, à la définition du bâtiment avec sa décomposition intérieure et ses équipements. Le format intègre une description des attributs des objets
Shapefile (SHP)	Format de fichier pour les systèmes d’information géographique, il a été initialement développé par l’ESRI pour son logiciel propriétaire, il s’est imposé comme un format d’échange entre logiciels. Il intègre les descriptions géométriques, géographiques et sémantiques des objets.
Geographique JSON	Format ouvert de données géographiques, il utilise la norme JSON (Javascript Object Notation) qui permet de représenter des

(GeoJSON)	données structurées, en reprenant les formats de description du javascript, mais de manière différente par rapport à la structure XML. Le langage est à l'initiative de développeurs mais n'est pas normalisé par les consortiums de standardisation. Il est utilisé par les bibliothèques libres en javascript, de type Leaflet ¹⁰⁶ et D3.js ¹⁰⁷ , particulièrement utilisées pour les applications en ligne.
Open Street Map XML (OSM)	Format de fichier d'échange structuré reprenant le formalisme XML. Le format est étroitement associé au projet Open Street Map de cartographie collaborative en ligne.

Figure 43. Inventaire des formats de données urbaines

Les récents développements en matière de modélisation paramétrique à l'aide de l'environnement de conception *Rhinoceros3D* et *Grasshopper* ont intégré les fonctions d'importation et de lecture des fichiers géographiques. Plusieurs extensions sont aujourd'hui disponibles pour manipuler ce type d'information, la Figure 44 présente un inventaire des bibliothèques disponibles à ce jour.

Nom du langage	Description
Elk ¹⁰⁸	Elk permet l'importation d'un fichier OSM (Open Street Map), il offre des fonctionnalités de tri et de sélection des informations en fonction des types d'éléments ¹⁰⁹ .
Meerkat Gis ¹¹⁰	L'extension Meerkat Gis permet l'importation du format de fichier Shapefile, Il offre des fonctionnalités de conversion des coordonnées GPS en coordonnées X,Y,Z.
@it ¹¹¹	L'extension @it permet la lecture des fichiers shp et osm.

¹⁰⁶ Bibliothèque javascript libre de cartographie en ligne : <https://leafletjs.com> (consulté le 16 octobre 2019)

¹⁰⁷ Bibliothèque javascript libre permettant l'affichage de données sous forme graphique et interactive : <http://d3js.org> (consulté le 16 octobre 2019)

¹⁰⁸ <https://www.food4rhino.com/app/elk> (consulté le 11 octobre 2019)

¹⁰⁹ Le dictionnaire des éléments Open Street Map est consultable à l'adresse https://wiki.openstreetmap.org/wiki/FR:Éléments_cartographiques (consulté le 11 octobre 2019)

¹¹⁰ <https://www.food4rhino.com/app/meerkat-gis> (consulté le 11 octobre 2019)

¹¹¹ <https://www.food4rhino.com/app/it> (consulté le 11 octobre 2019)

Heron Shapefile ¹¹²	L'extension permet l'import des formats Shapefiles, USGS IMG/HGT Elevation, l'importation de données depuis des serveurs GIS en ligne ou la conversion de coordonnées.
OSMKit	OSMKit est un outil en cours de développement, il permet l'importation des fichiers OSM et SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), la visualisation des points au format GPX, la génération d'un fichier JOSM pour alimenter la plateforme OSM depuis un export de <i>Grasshopper</i> .
Urban Network Analysis Toolbox ¹¹³ (UNA)	UNA est une extension pour <i>Rhinoceros</i> , elle est développée par le laboratoire <i>City Form</i> du MIT. L'outil permet une analyse du réseau urbain en termes d'accessibilité et de connectivité (Sevtsuk et Kalvo 2016).
DeCoding Spaces ¹¹⁴	DeCoding Spaces est une extension <i>Grasshopper</i> qui offre des fonctionnalités de génération et d'analyse des réseaux viaires et hydrologiques.

Figure 44. Inventaire des extensions grasshopper pour le traitement des données urbaines

¹¹² <https://www.food4rhino.com/app/heron> (consulté le 15 mars 2020)

¹¹³ <https://www.food4rhino.com/app/urban-network-analysis-toolbox> (consulté le 11 octobre 2019)

¹¹⁴ <https://toolbox.decodingspaces.net/download-decodingspaces-toolbox/> (consulté le 15 mars 2020)

3.5 CONCLUSION

Dans ce volet, nous avons porté un regard sur les formes naissantes de visualisation et de cartographie. Nous avons brièvement rappelé l'importance qu'elles prennent dans une démarche de conception et nous avons identifié le contexte technique qui accompagne les activités de la géomatique depuis le début du XX^e siècle. Ces pratiques ont contribué à envisager la ville et le territoire en tant que métabolisme, et elles sont aujourd'hui étroitement associées à une pensée et à un usage des villes intelligentes. Les données et leurs productions massives sont enchevêtrées avec ces formes de représentations. Les unes contribuent à la généralisation des autres. Elles participent mutuellement à la *datafication* du réel, processus tout à la fois porteur de risques, avec des formes de « vérités rationalisantes », et de promesses. Ainsi nous avons identifié l'émergence d'*objet-quasi-sujet* dont l'existence pourrait conduire à la définition d'une écologie de l'artificiel. La distinction entre nature et culture se réduit et cette compréhension de notre système technique nous paraît être essentiel pour penser et concevoir les technologies.

Par ailleurs, les transformations d'une donnée en information, puis en connaissance, se révèlent être un enjeu pour les concepteurs. Les outils de visualisation de l'information constituent alors une médiation privilégiée de cette activité. Nous avons distingué la visualisation des données de leurs physicalisations et nous avons considéré des pratiques, certaines inscrites dans l'histoire et d'autres plus récentes, qui font de la donnée une matière de création. Finalement nous avons listé les concepts, méthodes et outils, qui peuvent accompagner ces démarches.

Ce volet traite des questions de fabrication numérique et de *robotique créative*, il porte un regard sur les rapports qu'entretiennent les activités du faire et les modalités de production qui mettent en œuvre des processus automatisés. Les techniques de fabrication numérique élargissent l'éventail des outils et des méthodes. La conception et la fabrication sont envisagées comme un seul processus, et le *flux informationnel* est examiné comme un vecteur de prise de forme, mettant en interaction continue, formes, structures et matériaux, au sein d'un dispositif de fabrication.

Dans un premier chapitre, nous présentons les relations qu'entretiennent *culture matérielle* et *culture numérique* en considérant un artisanat numérique qui fait exister un rapport sensible à la technique, et qui envisage la forme comme le résultat d'un processus dynamique rendu possible par des encodages. Des approches hybrides articulent expérimentations analogiques et simulations numériques, pour constituer des connaissances et établir des systèmes computationnels. Ces derniers associent *computation physique* et *computation numérique*. Le monde physique est considéré comme un système de traitement de l'information, il est complémentaire des systèmes numériques et c'est de leurs combinaisons qu'un renouvellement des discours sur les processus de conception émergerait.

Dans un deuxième chapitre, nous portons un regard historique sur les techniques de fabrication numérique, nous considérons la place de la robotique en architecture, en identifiant une trajectoire qui va de l'industrialisation aux processus de construction additive. Ainsi nous considérons les récents développements qui sont associés à la *fabrication adaptative*, à la *robotique en temps réel* ou à des *dispositifs cyber-physiques de construction*.

Dans un dernier chapitre, nous précisons les enjeux et les opportunités de la *robotique créative*. Nous les considérons d'un point de vue technique et scientifique, au regard des questions de formation et de compétence, ou encore en relation avec les processus d'innovation technologique. C'est principalement la construction d'un triptyque *machine, matière, modèle* qui nous permet d'examiner les caractéristiques de cette *robotique créative*.

4.1 CULTURE MATERIELLE ET CULTURE NUMERIQUE

4.1.1. *Science concrète et artisanat numérique*

Un rapport sensible à la technique

La démocratisation des outils numériques et la généralisation des espaces de fabrication numérique, de type *fab lab*, ont largement contribué à un renouveau des cultures matérielles. Cette culture du « faire » n'est pas sans rapport avec les premières expériences qui naissent dans les communautés contre-culturelles américaines des années 60. Michel Lallement (Lallement 2015) établit les étroites relations entre les premiers *hackerspace* de la baie de San Francisco, les publications du *Whole Earth Catalog*, ou les activités du *Chaos Computer Club* de Berlin, avec le mouvement contemporain des « makers ». Ces activités prennent place dans des tiers-lieux, mettant à disposition des locaux, des outils et rassemblant des membres passionnés. Les relations se fondent sur l'échange, le partage, l'apprentissage et la coopération. Une vision renouvelée de la société se constitue à travers d'une part l'accès à des moyens décentralisés de fabrication, rendant possible la production en petite série, et d'autre part la redéfinition du rapport au travail, associé à une pratique créative et libératoire plus qu'à une nécessité productive (Berrebi-Hoffmann, Bureau, et Lallement 2018). L'autonomie, l'expérimentation, le partage, la découverte et les pratiques amateurs sont au cœur de ces dynamiques.

Une pratique qualifiée par certains de « bricolage » se constitue dans la société et au sein des milieux créatifs, chez les artistes, designers ou architectes. Ce bricolage est considéré comme une méthodologie de recherche et de découverte, c'est une activité créative engagée dans l'action, une heuristique favorisant la découverte et l'exploration (Féto 2015). Il se constitue à travers la manipulation de la matière et des matériaux, mais également l'appropriation des machines et leurs programmations. Ce « bricolage numérique » se traduit par la modification, la transformation, la réutilisation ou l'écriture du code. Celui-ci devient une matière de création, malléable, ouverte aux opportunités, aux erreurs et aux « bugs ». Dans ces pratiques, le détournement représente une modalité opératoire de conception. La machine, ou l'appareil, recèle des possibilités esthétiques, et le designer explore ces potentiels dans un rapport ouvert et sensible à la technique, en opérant des détournements, en trouvant des modalités

intelligentes et sensibles de « faire avec ».

La figure de l'amateur ré-émerge et l'importance de l'appropriation et du détournement technologique se révèle être une des conditions fondamentales de la construction de notre société. Patrice Flichy (Flichy, 2010) décrit ces pratiques à l'ère du numérique en précisant les rapports de l'amateur à la culture, à la citoyenneté et à la connaissance à travers différentes formes d'accès, d'appropriation, d'interaction, de collaboration. La place de l'auteur ou la parole de l'expert-spécialiste sont renouvelées, les modalités de diffusion et l'élargissement des savoirs ainsi que des compétences contribuent à transformer les pratiques.

Les relations à la technique et aux technologies ne sont pas seulement performatives et fonctionnelles, les repères sont déplacés, les habitudes de production sont questionnées, un usage non-régulier des technologies permet cette appropriation. A mi-chemin entre technologie de pointe et « bidouillage », ces activités vont dans le sens d'une meilleure connaissance des objets techniques et font exister un rapport sensible à la technique.

Culture matérielle et artisanat numérique

Depuis quelques années la figure de l'artisan est renouvelée avec l'essor des pratiques numériques. Le savoir-faire artisanal repose sur la connaissance du matériau, de son comportement, de sa singularité et de ses défauts mis au jour au fil de l'élaboration de l'ouvrage. Tim Ingold développe cet étroit attachement de l'artisan à la matière qui se constitue dans une relation physique. L'activité du faire se réalise avec une matière active et l'artisan doit « unir ses forces » avec les forces matérielles qu'il manipule (Ingold 2017). La prise de forme est envisagée comme un processus, une morphogénèse, qui doit intégrer l'ensemble des champs de force, ceux présents dans le matériau, ceux émergeant du mouvement, ceux imposés à la matière. Simondon énonçait déjà, dans son ouvrage *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information* (Simondon 2005a), ce principe de convergence des forces. Il prend l'exemple de la fabrication de briques d'argile. Ingold le rappelle, la forme de la brique ne se lie pas comme le résultat imposé à la matière par le moule, mais plutôt comme la congruence de deux demi-chaînes de transformation (la construction du moule et la préparation de l'argile), complétée de la force du geste de l'ouvrier. Cet assemblage de forces opposées, constitue un champ de forces d'où la forme émerge en tant qu'état d'équilibre.

Cette compréhension du comportement dynamique de la matière, ainsi que l'appréhension de la forme comme le résultat d'un processus, sont au cœur des expérimentations en matière de fabrication numérique et particulièrement robotique. Les données constituent un continuum entre réalités numériques et matérielles, les algorithmes forment les moteurs de ces flux informationnels, les machines et les outils interagissent avec les matériaux. Le geste physique de l'artisan est remplacé par le mouvement de la machine, la connaissance constituée par l'interaction avec le matériau se réalise à l'aide de numérisations et de captations.

Nous l'avons dit, cette culture matérielle prend place dans un contexte de généralisation des ateliers de fabrication numérique, de type *fab lab*. L'outil privilégié de cet artisan 2.0 se compose d'ordinateurs, de machines, de bras robotisés ou de coffrets d'équipement mécatronique. La machine accompagne un phénomène d'émancipation et non plus d'aliénation. Les techniques de fabrication numérique rapprochent les mondes physiques et numériques, la description numérique de l'objet permet son partage au sein d'une communauté, sa fabrication et sa reproductibilité. Ce modèle est promu par les initiatives du *Massachusetts Institute of Technology* de Boston (MIT) et de Neil Gershenfeld (Gershenfeld 2007). Antoine Picon rappelle que nombreux sont les auteurs qui relient ces démarches à une forme de « ruskinisme numérique » (Picon 2017). La prégnance de l'articulation des cultures matérielles et numériques explique cette référence au mouvement *Arts & Craft*. De plus le mouvement des *fab labs* s'accompagne d'une critique du système productif, il envisage des modes décentralisés de fabrication, en redonnant une autonomie productive et créative au concepteur-artisan. Ce discours résonne avec les préoccupations sociales de la fin du XIX^e siècle de John Ruskin ou de William Morris. L'autonomie et l'implication dans la réalisation de la totalité de l'ouvrage, constituent les conditions de satisfaction et d'épanouissement de l'ouvrier ou de l'artisan. Les discours sur l'usage des techniques numériques pourraient alors converger avec les analyses récentes sur la valeur et le sens du travail, sur l'importance du rapprochement entre la pensée et le faire, formulations exprimées notamment par Matthew Crawford dans son *Eloge du carburateur* (Crawford et Saint-Upéry 2016).

Par ailleurs, il faut rappeler les critiques faites au modèle des *fab lab*, et Erwen Chardonnet met en garde contre les discours évangélistes et les formes néolibérales des « fab lab MIT » qui pourraient conduire à une nouvelle « exploitation de type économie de l'atelier » (Chardonnet 2012). Les implications politiques et sociales

du système technique et des discours qui l'accompagnent, les enjeux d'émancipation et d'autonomie créative, ne se réalisent pas à travers le seul accès aux outils. L'appropriation, le détournement, les mises en perspective historiques et culturelles se révéleraient essentiels.

Ainsi savoir-faire manuel, dextérité et expériences sont encodés pour guider la machine. L'artisanat traditionnel pourrait alors se transformer et se réinventer dans un contexte de fabrication numérique, non seulement dans une perspective d'automatisation des gestes, mais plutôt d'exploration, d'invention et de réexamen des procédés. Cette conversion devrait se réaliser en donnant une épaisseur et une signification culturelle aux dispositifs construits.

4.1.2. Matière et computation

Des expérimentations analogiques aux expérimentations numériques

Ces pratiques, qui tissent des relations entre computation et matière, apparaissent dès la fin des années 1960. Ron Resch, au sein du Computer Science Department de l'université de Utah aux États-Unis, développe des travaux mêlant géométrie spatiale, méthodes computationnelles, fabrication numérique et logiciels d'animation. En appliquant des méthodes artisanales basées sur l'expérimentation, et en exploitant les outils numériques, il constitue une connaissance nouvelle sur la géométrie complexe. Considéré comme un des premiers « design hacker », les travaux de Ron Resch préfigurent une synthèse entre conception et computation (Witt et Pertigkiozoglou 2019). En s'appuyant sur les enseignements de Josef Albers, dispensés au Bauhaus puis au Black Mountain College, notamment autour du pliage structurel en papier, et en prolongeant les démarches de Buckminster Fuller sur les structures géodésiques, Ron Resch déploie une recherche basée sur la compréhension des comportements de la matière et sur l'identification de phénomènes sensibles, à travers la manipulation et l'expérimentation. L'enjeu vise à identifier le potentiel du matériau avant d'envisager sa transformation en produit. À partir d'hypothèses empiriques, il élabore des principes et des règles de transformations géométriques, dont certaines séquences sont réalisées à l'aide des outils informatiques. Il explore ainsi le pavage des surfaces et identifie des motifs géométriques spécifiques permettant de couvrir des surfaces complexes (Figure 45). Il transpose ses méthodes analogiques de recherche, faites de manipulations et

d'observations physiques, dans des environnements numériques en exploitant les outils de calcul, de simulation et d'animation. Il établit également des relations avec les procédés de fabrication, en générant directement depuis la modélisation géométrique les instructions de découpes, réalisées à l'aide d'une machine à commande numérique, ainsi que la numérotation des pièces permettant la fabrication. Le projet de sculpture monumentale en forme d'œuf pour la ville de Vegreville, Alberta, dénommé *Vegreville Pysanka*, sert de prétexte et de support à ces recherches (Figure 46).

Depuis les années 2000, l'usage des techniques de fabrication numérique établit une relation directe entre le monde des bits et l'univers physique des atomes. Le designer et l'architecte retrouvent une place dans le processus de fabrication et de construction. Ce ne sont pas les seules capacités d'automatisation ou d'optimisation qui sont au centre des préoccupations, mais plutôt les nouvelles possibilités qu'offrent ces techniques. La mise au point de dispositifs est rendue possible à travers la conception et l'expérimentation du procédé de fabrication et de construction. Le comportement de la matière, le procédé de prise de forme, deviennent des leviers de conception. L'intégration de ces paramètres s'opèrent dans des modélisations numériques traitant les flux d'information.

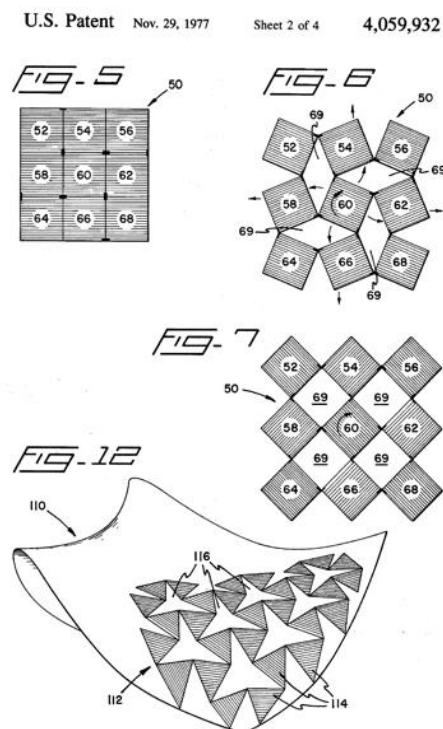


Figure 45. Extrait du brevet de Ron Resch, "Self-supported structural unit having a 3-Dimensional Surface", US Patent, 197, illustration d'un motif de pavage de surface

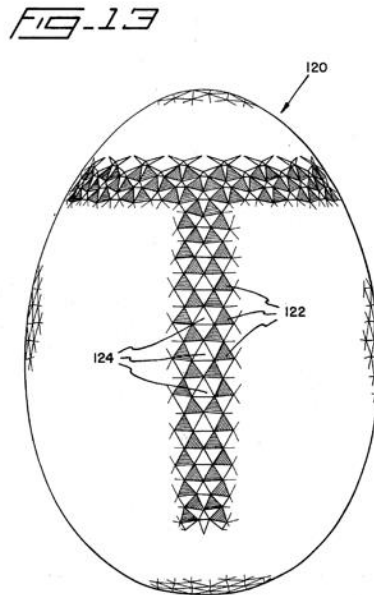


Figure 46. Extrait du brevet de Ron Resch, "Self-supported structural unit having a 3-Dimensional Surface", US Patent, 1977, illustration du pavage d'une surface en forme d'œuf

Tectonique informée : Une conception centrée sur les matériaux

Un processus de conception centrée sur les matériaux est caractérisé par cette approche computationnelle, intégrant et améliorant la prise en compte des interactions entre la structure, le matériau et la forme, tout en considérant les modalités de fabrication du dispositif (Oxman 2014). L'auteur propose la notion de *tectonique informée* pour désigner ces postures qui ouvrent la voie à de nouvelles matérialités. Si les relations entre forme, matériau et structure ne sont pas nouvelles en architecture, c'est leurs médiations numériques qui apparaissent transformantes. La notion de tectonique retrouve une actualité à la fin du XX^e siècle (Frampton 2001; Chupin et al. 2005). La tectonique renvoie à l'étude de la forme construite des objets architecturaux, elle est liée à l'expression d'une dimension artistique de la construction. La tectonique recouvre

les dimensions matérielles, constructives et tactiles de l'architecture, elle est considérée comme l'expression des efforts qui donnent forme au projet, elle élève la construction au niveau de la forme artistique. En 2004, l'ouvrage de Neil Leach (Leach, Turnbull, et Williams 2004) confère aux technologies numériques une place centrale. Les enjeux de structure et les processus de prise de forme sont explorés à travers la mise en œuvre d'algorithmes, de modélisations paramétriques ou associatives.

La dimension symbolique de l'architecture est également réexaminée avec un renouveau de l'ornementation (Moussavi et Kubo 2006; Picon 2013a; 2017). Une importance est donnée à l'enveloppe architecturale qui constitue une peau, une interface plus moins sensible et dynamique. Ces surfaces font l'objet de traitements, elles intègrent des motifs et des textures, elles se constituent de pavages qui deviennent parfois des éléments de structure. Cette ornementation retranscrit la complexité et les ambiguïtés de notre époque en se révélant en tant que marqueurs culturels, politiques et techniques. Ainsi, les ordres structurels et architectoniques s'appréhendent à l'aide de la compréhension des processus de conception, de production et d'assemblage qui les ont engendrés.

La notion de matérialité renvoie à nos capacités à matérialiser, à rendre concret et réel un artefact. Le matériau et la matière sont au centre des activités de construction. Cependant, cette matière est polysémique, elle s'entend également dans une dimension immatérielle à travers la prise en compte des conditions, des effets, des performances qui représentent autant de vecteurs de conception. Par ailleurs, la matérialité induit une relation sensible aux choses, elle fait référence aux relations émotionnelles que nous entretenons avec les objets, aux rapports tactiles qu'évoquent ou portent en eux les artefacts de notre environnement. La matérialité s'appréhende dans son contexte culturel, lui-même sous influence de l'état des conditions techniques de son époque. Nous percevons et comprenons le monde à travers nos instruments techniques, et nous nous trouvons immergés dans un réel construit, compris et perçu à travers notre culture, nos sciences, nos techniques et nos arts. Tous nos instruments nous appareillent le monde, ils construisent le régime d'expérience auquel ils donnent accès. Les conditions technologiques d'une époque deviennent alors les marqueurs des modes de compréhension et de production des artefacts. Par extension, l'état des connaissances scientifiques, techniques et philosophiques contribue à influencer notre perception dans une dynamique phénoménotechnique.

La *tectonique informée* prend place dans ce contexte, elle est associée aux modalités de conception et fabrication numériques, dans lequel le dispositif en conception intègre les contraintes structurelles et les comportements du matériau au sein de boucles de simulation assurant à la forme une performance, et dont la réalisation peut se traduire dans un code interprétable par des machines à commande numérique. Le potentiel de la matière est un paramètre de conception et celle-ci peut faire l'objet de mise au point sur mesure. Les techniques d'impression 3D à *gradient de fonction*, par exemple, rendent possibles la définition des qualités de la matière. Son niveau de résistance ou son degré d'opacité peuvent être définis pour ensuite se matérialiser par fabrication additive. C'est la nécessaire explicitation des descriptions, imposée par l'instrumentation numérique, qui constitue une information à travers la transcription des connaissances sous forme de code. Ce code constitue une information consubstantielle du dispositif et informe sa facture aussi bien au cours de son processus de conception que de fabrication.

Système matériel : agrégation des capacités de computation matérielle et numérique

Depuis quelques années, plusieurs travaux associent les processus naturels et algorithmiques en considérant le potentiel computationnel, ou calculatoire, du monde physique (Picon 2018). Si la computation est définie comme un processus de traitement de l'information, celui-ci n'est pas limité aux machines calculantes, mais il est ici opéré par des dispositifs analogiques et matériels (Dierichs et Menges 2010; Menges 2012). Pour illustrer cette approche, nous faisons une analogie avec les sciences de la terre. Celles-ci savent bien que la terre et les éléments qui la composent constituent une mine d'informations, ils sont des systèmes d'informations, qui enregistrent les événements qu'ils subissent. Les fossiles, la glace profonde, les concrétions géologiques ou encore les troncs d'arbres, sont autant de supports de stockage des traces et des événements, des forces et des phénomènes (Jeandel 2017). La nature est observée, décryptée ou écoutée.

En architecture, un modèle analogique ou une maquette, peuvent aussi être considérés comme des dispositifs traitant de manière continue une information et assurant ainsi son adaptation, sa prise de forme, au contact du jeu des forces et des efforts présents dans le dispositif. L'information n'est pas explicitée dans une forme mathématique ou algorithmique, mais un flux d'entrant et de sortant est traité par le système physique.

Ce système peut faire l'objet d'observations ou de mesures pour constituer une connaissance de son comportement. Des opérations de simulation numérique peuvent parallèlement compléter cette compréhension. La *computation matérielle*¹¹⁵ et la *computation numérique* constituent alors un modèle computationnel associant le numérique et l'analogique dans ce que les auteurs dénomment un *système matériel* (Menges 2012). Un *système matériel* est ainsi un modèle computationnel intégrant les capacités de computation d'une part du dispositif physique et d'autre part du dispositif numérique.

Cette définition permet aux auteurs d'explicitier la distinction entre les notions d'expérimentation et de simulation. L'expérimentation relève d'un processus propre aux manipulations analogiques, d'où peuvent émerger des caractéristiques généralisables. Tandis que la simulation renvoie à une instrumentation numérique dont le modèle du comportement étudié est établi et a fait l'objet d'une généralisation mathématique. La *computation matérielle* permet de produire de manière analogique une information, une connaissance, sur le comportement général du dispositif. La computation numérique, à travers la simulation, offre une connaissance exacte d'une question spécifique relative au comportement de la matière. C'est la combinaison de ces deux approches qui pourrait renouveler les discours théoriques et méthodologiques sur les processus de conception et de matérialisation. C'est en opérant une synthèse des connaissances produites par l'expérimentation analogique, c'est-à-dire l'observation de la computation physique, et par la simulation numérique, que de nouveaux outils et de nouvelles techniques pourraient être explorés (Dierichs, Karola et Menges 2015).

4.2 LA FABRICATION NUMERIQUE

Après avoir analysé les étroites relations entre le monde physique et le monde numérique à travers un prisme culturel, nous proposons de considérer ces relations sous l'angle des techniques et des machines.

¹¹⁵ Traduction de l'expression « material computation »

4.2.1. Brève histoire des techniques de fabrication numérique

De la photosculpture à la photo-polymérisation :

Depuis la renaissance le système de notation est au centre des processus de construction. Le dessin représente l'objet pensé et l'objet à construire, il est le media notationnel qui sert de support à la transmission, à la compréhension et à la construction. Progressivement les dispositifs techniques de mesure, de cartographie, de relevé et de transcription se complexifient. En considérant plus spécifiquement les techniques d'impression 3D, un premier procédé vient modifier les pratiques et les savoir-faire. En 1860 François Willème met au point un procédé de *sculpture photographique* ou *photosculpture*. Celui-ci permet de réaliser des sculptures de bustes à l'aide d'une série de photographies du sujet. Les profils successifs sont redimensionnés à l'aide d'un pantographe, puis assemblés en trois dimensions pour reconstituer les limites de la forme volumétrique. Ce procédé fera l'objet d'un dépôt de brevet déposé en 1864 (Willème 1864, Figure 47). En 1892, J.E. Blanther propose un procédé pour réaliser des cartes en 3 dimensions à partir d'un relevé topographique des courbes de niveaux. Ces courbes sont ensuite utilisées pour la découpe de plaques de cire qui peuvent être empilées pour constituer le relief souhaité (Blanther 1892, Figure 48). Cette technique se retrouve dans les procédés de fabrication additive couche à couche. En 1951, O.J. Munz prolonge cette méthode et met au point une technique de reconstitution d'un objet 3D, par exposition successive à la lumière d'un liquide photosensible. Couche après couche, l'émulsion se solidifie en fonction d'un masque de lumière constitué par la succession des photos des coupes de l'objet à reconstituer (Munz 1951, Figure 49). Un dernier exemple de système technique de matérialisation en 3 dimensions se trouve dans le *Dispositif pour réaliser des pièces industrielles* mis au point en 1984 par Jean-Claude André, Alain Le Mehauté et Olivier De Witte pour la société Alcatel (André, Le Méhauté, et De Witte 1986, Figure 50). Le principe repose sur une solidification d'un liquide par polymérisation à l'aide du déplacement d'un faisceau laser à la surface du liquide. Le liquide est stocké dans un bac et le niveau de celui-ci évolue pour assurer une solidification progressive couche à couche. Le laser se déplace le long de deux axes, le déplacement est contrôlé par des moteurs, les positions sont déterminées par les trajectoires décrites dans un fichier. Ici le lien est fait avec les techniques de stockage et de description numériques des objets ainsi qu'avec le pilotage

des trajectoires des outils à l'aide des commandes numériques (CN). A partir de cette période de nombreuses techniques se développent en mettant en œuvre une variété de matériaux.

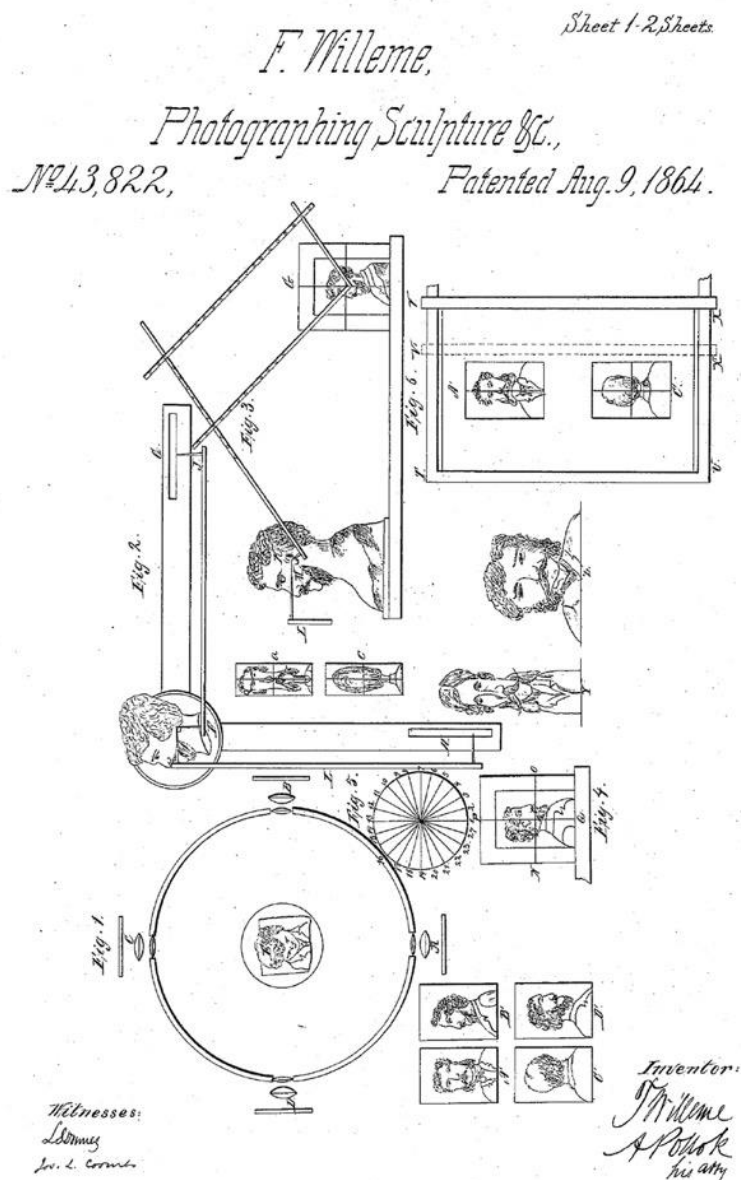


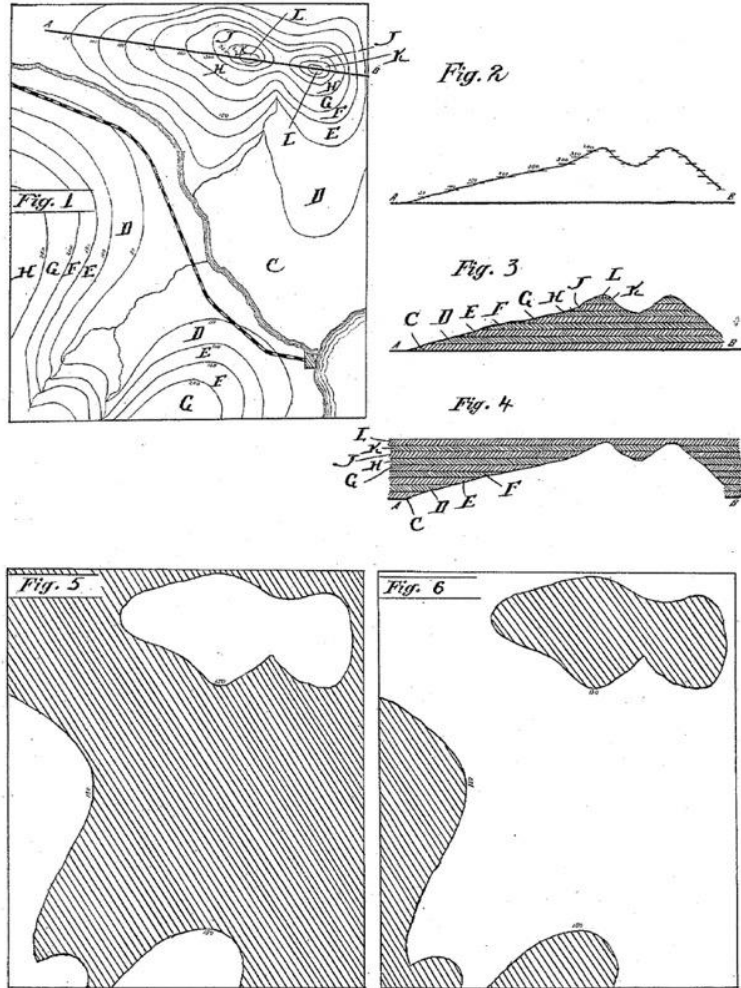
Figure 47. Brevet de François Willème sur le procédé de photosculpture, US Patent 43 822, 9 août 1864

(No Model.)

J. E. BLANTHER.
MANUFACTURE OF CONTOUR RELIEF MAPS.

No. 473.901.

Patented May 3, 1892.



Witnesses:
Celeste P. Chapman
David J. Johnson.

Inventor:
Joseph E. Blather
by Paul W. Baker,
Attorney.

Figure 48. Brevet de J.E. Blather, sur le procédé de réalisation de cartes en 3 dimensions, US Patent 473 901, 3 mai 1892

Dec. 25, 1956

O. J. MUNZ

2,775,758

PHOTO-GLYPH RECORDING

Filed May 25, 1951

2 Sheets-Sheet 1

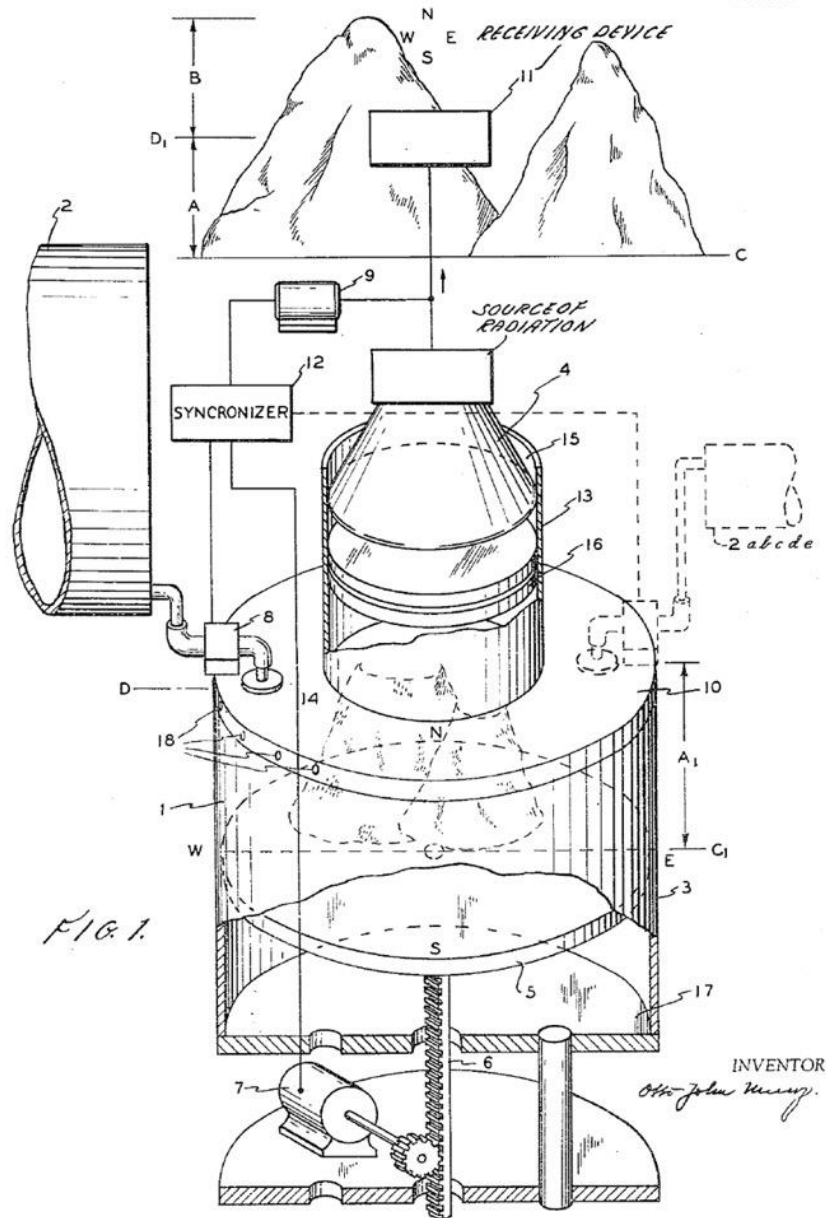


Figure 49. Brevet de O.J. Munz, premier procédé de matérialiation photosensible par couche, US Patent 2 775 768, 25 mai 1951

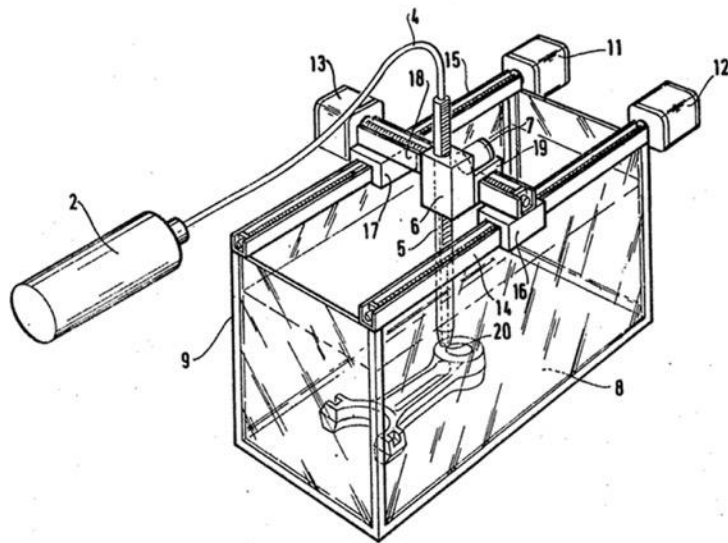


FIG.2

2/4

2567668

Figure 50. Illustration du dispositif pour réaliser un modèle de pièce industrielle, brevet déposé à l'INPI par André, Le Méhauté et De Witte

CAM¹¹⁶/CAD¹¹⁷

Dans les années d'après-guerre, les industries automobile et aéronautique font face à des besoins croissants de production. Les ingénieurs Parsons et Stulen mettent au point, pour le compte de l'U.S. Air Force, une technique permettant de contrôler avec précision la position d'une fraiseuse le long d'un axe à l'aide de données numériques stockées sous forme de cartes perforées (Naboni et Paoletti 2014). Rapidement ce principe de contrôle des machines à outils est amélioré et appliqué à des déplacements le long de 3 axes. La difficulté de générer facilement des instructions de déplacement des outils à partir de représentations géométriques, sera facilitée par les travaux qui débutent avec le projet *Sketchpad* dans le cadre de la thèse de Ivan Sutherland en 1963. Nous avons vu précédemment l'apport de Paul de Casteljau et Pierre Bézier dans le domaine de la formalisation mathématique des courbes et leurs descriptions au sein d'un environnement numérique. Ce dernier met également au point un format d'échange,

¹¹⁶ Acronyme de *Computer Assisted Manufacturing* ou *Fabrication Assistée par Ordinateur* (FAO)

¹¹⁷ Acronyme de *Computer Assisted Design* ou *Conception Assistée par Ordinateur* (CAO)

dénoté *Unisurf*, qui facilite le transfert des informations géométriques vers les machines à commandes numériques. Patrick Hanratty, en 1957, en tant qu'ingénieur pour General Electric, développe *Pronto*, un langage de programmation des machines à commandes numériques et en 1961, le système *DAC*¹¹⁸ (*Design Automated by Computer*) est mis au point (Jackson 2018). Ces langages et ces outils, associés aux premiers ordinateurs fournis par IBM, rencontreront un certain succès au sein de l'industrie aéronautique et automobile mais ils seront peu utilisés par les acteurs du secteur de la construction. Mitchell explique ce désintérêt par un manque de connaissance du potentiel de ces outils ainsi que par des raisons économiques (W. J. Mitchell 1979). Au fil des années différents logiciels et langages¹¹⁹ seront mis au point par les laboratoires et avec le support des gouvernements de différents pays, puis progressivement remplacés par des outils que nous connaissons encore comme le logiciel *CATIA*¹²⁰ de Dassault Système ou par les logiciels d'Autodesk. Le G-code, développé dans les années 1950, est toujours largement utilisé, il est le langage de programmation privilégié des impression 3D. Le Figure 51 montre l'extrait d'un fichier Gcode, il est composé d'une série d'instructions spécifiant les trajectoires et vitesses de l'outils. Les langages de programmation de la robotique reprennent ces principes en enrichissant les types de déplacements, avec des notions d'approches ou d'interpolation par exemple.

¹¹⁸ Le système *DAC* sera rapidement renommé *DAC-1* (*Design Augmented by Computer*)

¹¹⁹ Mitchell (W. J. Mitchell 1979) propose dans une liste des programmes développés sur la période 60-76

¹²⁰ Acronyme de *Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée*

```

UM2_connecteur4.gcode x
1 ;FLAVOR:UltiGCode
2 ;TIME:28208
3 ;MATERIAL:80470
4 ;MATERIAL2:0
5 ;NOZZLE_DIAMETER:0.4
6 ;Generated with Cura_SteamEngine 3.4.1
7 M82 ;absolute extrusion mode
8
9 G92 E0
10 G10
11 ;LAYER_COUNT:128
12 ;LAYER:0
13 M107
14 G0 F3600 X65.71 Y65.544 Z0.3
15 ;TYPE:SKIRT
16 G11
17 G1 F1800 X66.041 Y65.278 E0.05096
18 G1 X66.927 Y64.66 E0.18059
19 G1 X67.364 Y64.405 E0.2413
20 G1 X67.874 Y64.209 E0.30686
21 G1 X68.751 Y63.957 E0.41636
22 G1 X69.247 Y63.857 E0.47708
23 G1 X69.635 Y63.833 E0.52373
24 G1 X153.335 Y63.831 E10.56773
25 G1 X153.839 Y63.871 E10.6284
26 G1 X154.227 Y63.958 E10.67612
27 G1 X155.181 Y64.235 E10.79532
28 G1 X155.654 Y64.414 E10.85601
29 G1 X155.898 Y64.542 E10.88908
30 G1 X156.362 Y64.812 E10.9535
31 G1 X156.867 Y65.176 E11.0282
32 G1 X157.276 Y65.536 E11.09358
33 G1 X157.715 Y66.009 E11.17102
34 G1 X158.128 Y66.560 E11.25524

```

Figure 51. Extrait d'un fichier Gcode

4.2.2. *Stratégies et techniques de fabrication numérique*

Les stratégies de fabrication numérique constituent habituellement trois grandes familles de procédés. L'une mettant en œuvre des logiques soustractives, l'autre des processus additifs, la dernière s'intéresse aux techniques de mise en forme, de moulage ou d'assemblage. Ces stratégies s'appuient sur une variété de techniques, chacune présentant des avantages en termes d'économie d'échelle, de précision et permettant la mise en œuvre de matériaux variés. Nous proposons ici un tour d'horizon de ces techniques pour finalement identifier des méthodes de fabrication robotisée mobilisant l'une ou l'autre de ces stratégies.

Stratégie soustractive

La fabrication soustractive repose sur un principe d'enlèvement de matière à partir d'un matériau semi-fini, fourni sous forme d'un bloc, d'un panneau, d'une plaque ou d'une feuille plus ou moins fine. Une variété de techniques d'usinage permet de percer, de fraiser, de raboter ou encore de réaliser un enlèvement de matière par tournage (Kula

et Ternaux 2012). L'extraction de la matière peut être réalisée de manière mécanique, électrochimique ou à l'aide de faisceau à haute énergie. L'automatisation de ces machines à commande numérique ¹²¹ s'est progressivement généralisée depuis les années 1970 et le secteur de la construction mobilise aujourd'hui quotidiennement ces techniques. Les surfaces de travail, la précision, la vitesse des coupes, représentent autant de paramètres qui doivent être déterminés en fonction des travaux à réaliser et des matériaux utilisés.

Les découpes laser, jet d'eau, plasmas, ou encore à oxygène, sont utilisées sur des matériaux de type plastique, mousse, bois, métal, acier, aluminium, cuivre, pierre, verre, céramique ou béton. Ici les matériaux prennent habituellement la forme de plaques, panneaux ou feuilles, et la position de l'outil de découpe le long d'une trajectoire en deux dimensions est déterminée suivant des axes X et Y. Ces techniques sont qualifiées de fabrication 2D (Kolarevic 2005), et c'est par l'assemblage ou l'installation de ces panneaux sur une ossature qu'une mise en espace est rendue possible.

L'usage d'un fil chaud permet la coupe de blocs de mousse et l'inclinaison du fil le long d'une trajectoire de déplacement, parfois en 3 dimensions, permet la réalisation formes géométriques plus complexes. Cette découpe est utilisée pour produire par exemple des fonds de coffrage dont certaines des surfaces peuvent être courbes et constituer des surfaces réglées. Elle peut également être le support à des expérimentations en matière de construction par stéréotomie (Figure 52).

Les fraiseuses numériques permettent un enlèvement de matière à partir d'un panneau ou d'un bloc. Les fraises peuvent être positionnées le long de 3 axes, X,Y et Z, un quatrième axe peut équiper la machine pour réaliser des pièces en révolution, un cinquième axe peut enrichir les fonctionnalités d'orientation de l'outil.

¹²¹ Computer Numerical Control (CNC)



Figure 52. Découpe au fil chaud d'un voussoir dans un bloc de mousse, les Grands Ateliers, ENSAG, travaux de l'auteur, octobre 2019

Stratégie additive

Les méthodes de fabrication additive s'opposent, dans leurs principes, aux précédentes et s'adosent à une logique d'ajout de matière ou de matériaux. L'association professionnelle américaine de standardisation ASMT¹²² a établi en 2009 un référentiel des terminologies du domaine (The American Society for Material and Testing 2009). La fabrication additive est définie comme un processus d'assemblage de matériaux, à

¹²² American Society for Material and Testing

partir de données décrivant un modèle en 3 dimensions, et habituellement réalisé par le dépôt de matière couche par couche. La fabrication additive est initialement utilisée dans les phases de prototypage pour assurer des validations fonctionnelles, visuelles, des principes d'assemblage, ou comme intermédiaire de médiation. Plus récemment des applications en fabrication directe voient le jour. Les techniques de fabrication additive sont nombreuses et se déclinent à différentes échelles. L'inventaire de ces techniques dépasse le cadre de ce mémoire, celles-ci peuvent mettre en œuvre une variété de matériaux, des dérivés polymères au métal en passant par l'argile ou encore des matières vivantes, les processus de solidification peuvent être assurés par la chaleur, la lumière ou encore l'ajout d'adjuvant. La micro-fabrication permet la réalisation de pièces avec des dimensions au micromètre, la nano-fabrication est à l'échelle nanométrique.

L'impression 3D à gradient de fonction offre un bon exemple des possibilités de paramétrage des matériaux, elles sont permises par les techniques de fabrication additives. Le prototypage rapide de *matériaux à gradient de fonctions* représente une technique et une méthode de conception et de fabrication émergente qui autorise la définition des propriétés du matériau de manière graduelle au sein du volume de la pièce (Grigoriadis 2016). Le matériau est réalisé à l'aide de technique additive multi-matériaux. Les techniques de modélisation paramétrique et de *fabrication de forme libre solide* (*Solid FreeForm Fabrication*¹²³) rendent possible la conception et la fabrication de composants dont les caractéristiques sont contrôlées. Il est possible de définir et mixer les quantités et les qualités des matériaux pour contrôler son comportement structurel ou ses propriétés d'ambiance et pour maîtriser l'utilisation optimale de la matière. Les outils classiques de modélisation numérique sont généralement basés sur un principe de description surfacique des solides. Cette approche permet de visualiser les surfaces extérieures des objets, l'expression de représentation par les frontières¹²⁴ est utilisée. Cependant ce type de description ne permet pas de spécifier la composition interne du matériau. Ainsi les approches privilégiant une discrétisation du solide sont préférées. L'objet est alors décomposé en unités élémentaires appelées *voxel*. De récents développements informatiques proposent des outils dédiés à ces modes de fabrication avec par exemple le logiciel

¹²³ Solid Freeform Fabrication fait référence à une technique de fabrication couche à couche, c'est-à-dire de fabrication additive.

¹²⁴ L'expression anglo-saxonne est « Boundary Representation » avec l'acronyme B-REP communément employé.

Monolith¹²⁵ (Payne et Michalatos 2016). Cette technique de paramétrage des propriétés multifonctionnelles du matériau a été employée pour réaliser un *béton aux fonctions graduées* (Payne et Michalatos 2016). Une application se traduit par la réalisation d'une paroi en améliorant son coefficient de résistance thermique tout en préservant ses qualités structurelles. Une autre expérimentation porte sur la fabrication d'une poutre au sein de laquelle la matière est distribuée dans les zones soumises aux efforts et dont la porosité varie le long de la structure. Un gain de poids et de matière est ainsi opéré.

Par ailleurs d'autres travaux portent des *impressions 3D en grandeur*, ils permettent d'assembler des matériaux pour créer des constructions à l'échelle du corps humain. Cette construction additive peut se réaliser par une extrusion à froid de matériaux visqueux, de type béton ou argile. Le projet *Matrice*¹²⁶ illustre ces recherches, il impliquait le laboratoire LACTH de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture et de Paysage de Lille. Ces constructions peuvent également se constituer par l'empilement robotisé de briques, avec par exemple de projet *Programmed Wall* (Gramazio, Kohler, et Willmann 2014) ou bien par tissage de fibres avec les projets *Fibrous tectonics* (Menges et Knippers 2018). L'usage des techniques de soudure est également un moyen de construction pour des structures de quelques mètres, le dispositif *Butterfly Screen* (Wit 2018) le montre. Les structures par assemblage robotisé de pièces de bois ou tiges de métal, projet *Mesh Mould* (Hack et al. 2017), relèvent également de cette catégorie de construction.

Stratégie de mise en forme

Les processus de mise en forme sont également appliqués à des matériaux semi-finis, ils portent sur la déformation ou la transformation des caractéristiques géométriques du matériau sous l'effet de forces mécaniques, de chaleur ou encore de la vapeur (Kula et Ternaux 2012). Les transformations des qualités structurelles du matériau par pliage ou emboutissage numériques sont explorées dans l'installation *Stressed Skins* (Nicholas 2018) ou dans les travaux sur le pliage courbe de feuilles métalliques (Saunders et Epps 2016).

¹²⁵ <http://www.monolith.zone> consulté le 23 janvier 2020

¹²⁶ <http://www.matrice-impression3d.fr> consulté le 22 janvier 2020

4.2.3. La place de la robotique en architecture

Il est important de rappeler que l'architecture entretient des relations avec les techniques d'automatisation de la construction. Nous considérons ici le moment de la révolution industrielle et de l'après-guerre comme des périodes propices à ces expérimentations, avant de regarder comment cette thématique est renouvelée dans une période contemporaine.

Industrialisation et automatisation de la construction

Avec la révolution industrielle, l'apparition de nouveaux matériaux, les besoins de reconstruction imposés par les deux guerres et la croissance des populations, les techniques de constructions se transforment au début du XX^e siècle. La rationalisation et l'industrialisation des processus de construction sont au cœur des préoccupations de l'architecture moderne. Les méthodes d'industrialisation de masse sont appliquées au secteur de la construction, la préfabrication des éléments de structure est réalisée en atelier ou sur site, la conception des éléments intègre des contraintes d'assemblage et de montage en cherchant des économies de temps et une rationalisation des processus. Avec les chocs pétroliers des années 70 et le début des crises sociales des villes européennes, les paradigmes se transforment, les approches fondées sur la croissance, le progrès et la prospérité sont remplacées par des stratégies écologiques et économiques. Cependant les villes du Japon et d'Asie ne sont pas confrontées aux mêmes évolutions, ainsi les acteurs et les gouvernements de ces régions étendent les logiques d'automatisation de la construction (Bock et Langenberg 2014). Misawa Homes met en place des chaînes de montage d'unités d'habitation préfabriquées, les entreprises Shimizu ou Kajima développent des robots spécialisés dans l'exécution de tâches comme la peinture des façades ou le ponçage des dalles. Dans les années 1980, les entreprises Obayashi, Shimizu, Taisei ou Takenaka déploient des systèmes de construction à grande échelle, permettant l'assemblage et la construction de l'ensemble des éléments de structure pour des bâtiments de grande hauteur. Ces systèmes fonctionnent à la manière d'usines verticales se déplaçant le long de l'édifice au fur et à mesure de son avancement (Bock 2008). Le manque de main d'œuvre qualifiée, la réalisation de tâches présentant des niveaux importants de pénibilité ou de risques, la réalisation d'opérations engendrant des nuisances sont parmi les principaux arguments

qui justifient ces approches. De nombreux projets démonstrateurs ont été réalisés, mais ces démarches n'ont pas fait l'objet d'une généralisation. Les difficultés techniques, le manque de standardisation de l'ensemble des chaînes d'approvisionnement, le manque de transparence et de maîtrise des coûts, l'absence de personnel qualifié, le manque d'intégration avec les phases et les acteurs de la conception, la difficulté d'assurer la réalisation de dispositifs personnalisés sont quelques-uns des freins qui expliquent cette désillusion.

Le renouveau de la robotique en architecture

Depuis une vingtaine d'année, l'usage de la robotique dans le domaine de l'architecture connaît un regain d'intérêt, et quatre domaines d'application sont identifiés (Daas 2018). Le premier s'intéresse à la robotique dans une perspective de conception, la machine et sa logique de mise en œuvre sont constitutifs du processus de conception, ils informent le travail d'exploration en permettant de tester des hypothèses, de prototyper des solutions et d'identifier des potentialités. Le second domaine d'application considère la robotique dans une perspective de fabrication, en la rapprochant des protocoles industriels et en l'association aux logiques de personnalisation de masse des pièces manufacturées. Le troisième domaine d'application porte sur l'usage de la robotique durant les phases de construction des édifices. Cette robotique de chantier se traduit par la mise au point de différents dispositifs nécessitant une robotique collaborative capable d'assurer une co-activité des humaines et des machines. Le procédé de construction BatiPrint© développé récemment par l'université de Nantes illustre cette dimension (Figure 53). Un procédé de construction additive sur chantier est mis au point. Ce procédé consiste dans la pose de deux couches de mousse qui sont utilisées comme coffrage d'un béton. Le béton assure le rôle porteur de la cloison, la mousse est conservée pour garantir l'isolation du mur. Le système robotique est composé d'un bras industriel installé sur un véhicule autonome, l'ensemble se déplace le long des murs de l'édifice. Le dernier domaine d'application porte sur l'intégration des machines à l'édifice, le bâtiment lui-même devient une machine capable de s'adapter, de se transformer ou d'assurer différentes opérations de maintenance ou de logistique. Les propositions utopiques de Cédric Price, avec le projet *Fun Palace* (Mathews et Aureli 2004) ou les expérimentations de Kas Oosterhuis avec le projet *Muscle NSA* (Oosterhuis 2015) sont des exemples d'une

architecture qui se confond avec des dispositifs robotisés.



Figure 53. Procédé de fabrication additive Batiprint, Nantes, septembre 2017

En lien avec les questions d'intégration de la robotique à la conception, ou dans une perspective de fabrication industrielle, dès le début des années 2000, l'équipe de Gramazio et Kolher, hébergée à l'École Polytechniques de Zurich, expérimente l'usage de la robotique pour l'architecture. Leurs travaux explorent les étroites relations entre les données, les algorithmes, les matériaux et la programmation des machines. Ces recherches mettent le processus de matérialisation au centre des démarches (Gramazio, Kohler, et Willmann 2014). Les stratégies de fabrication et les procédés de construction sont informés directement par des données de conception, des mises en œuvre non standard sont rendues possibles et contribuent au renouvellement du vocabulaire

architectural. Les auteurs proposent le terme de *matérialité numérique* pour caractériser les dimensions concrètes et physiques que l'architecture robotisée révèle (Gramazio et Kohler 2008). Ces procédés sont expérimentés dans des logiques constructives déterministes, à travers l'empilement de briques, l'assemblage de modules ou encore la découpe de voussoirs en mousse (Figure 54). Les dispositifs conçus font l'objet de modélisations et de simulations, la programmation de la machine s'intègre dans une chaîne numérique et l'interopérabilité des langages et des logiciels s'avère de plus en plus facile. D'autres recherches explorent des procédures non-déterministes, dans lesquelles le comportement du matériau ne peut pas être anticipé. La réalité physique de l'objet en construction fait alors l'objet d'une captation, et celle-ci vient informer le système dans une logique de *fabrication adaptative*, de *fabrication en temps réel* ou de *robotique interactive*.



Figure 54. Réalisation de structures par stéréotomie, découpe robotisée de voussoirs, Les Grands Ateliers, ENSAG et ENSAL, travaux de l'auteur, janvier 2018

4.2.4. Construction cyber-physique

Industrie 4.0 et personnalisation de masse

La première révolution industrielle caractérise une période de transformation socio-organisationnelle à travers un renouvellement des techniques de fabrication et de production. La mécanisation, l'usage de l'énergie hydraulique et des machines à vapeur

participent à cette transformation de la société. Durant le XIX^e et le début du XX^e siècle, les volumes de production augmentent de manière exponentielle. La maîtrise de l'électricité, le moteur à explosion, le développement de la chimie, de la sidérurgie et des transports, ouvrent la voie à une production de masse, c'est la deuxième révolution industrielle. La troisième révolution industrielle s'articule avec la mise au point des premiers ordinateurs, le perfectionnement des techniques d'automatisation et l'installation des machines à commandes numériques dans les ateliers et les usines. Le début de XXI^e siècle se caractérise par une généralisation des technologies numériques et une quatrième révolution industrielle voit le jour avec la mise au point de systèmes cyber-physiques de production. Cette transformation s'explique par une maturité technologique, intégrant simultanément les techniques de réalité virtuelle, l'usage des outils de simulation, les techniques de fabrication additive, le développement de l'internet des objets ou encore l'usage des méga-données. Les évolutions technologiques, avec le développement des capacités de calcul et de stockage, ainsi que l'accessibilité économique de ces techniques participent à une dynamique de transformation et de renouvellement des systèmes de production industrielle. Ces perspectives prennent également place dans un débat associant transitions socio-organisationnelles, modification des modèles économiques et sociétaux, prise en compte des urgences climatiques et des besoins d'égalité, refondation des systèmes productifs avec des perspectives de relocalisation, de circuit court, de personnalisation de masse ou encore de production décentralisée.

Fabrication adaptative et construction cyber-physique

Nous avons vu précédemment que ces moyens ouvrent des perspectives pour l'architecture. La *fabrication adaptative* ou la *robotique interactive* combinent des procédés de fabrication associant un ensemble de capteurs pour constituer une connaissance de l'état de la matière en temps réel et ainsi proposer une boucle rétroactive d'adaptation du processus de matérialisation (Bechthold 2018). Ces dispositifs de fabrication constituent des systèmes cyber-physiques de production, mêlant étroitement et en temps réel des programmations déterminées de pilotage de la machine, avec des informations de réajustement des trajectoires en fonction d'évènements ou de comportements indéterminés des conditions physiques (Menges 2015).

4.3 ENJEUX ET OPPORTUNITES DE LA ROBOTIQUE CREATIVE

Nous avons évoqué comment la congruence d'évolutions techniques et culturelles conduit à la transformation des pratiques. Ces transitions s'accompagnent de peurs, de doutes, d'interrogations, elles sont contraintes par des limites techniques, économiques ou politiques, mais ouvrent également la voie à des améliorations et des progrès. La Commission Européenne a identifié 6 technologies prometteuses en termes de potentiel d'innovation, elles sont regroupées sous la terminologie de *Technologies Clés Génériques*¹²⁷ (KET). Les *systèmes de production et de fabrication avancés* constituent l'une de ces catégories, et trois feuilles de route sont présentées¹²⁸. La première s'intéresse aux *technologies pour les usines du futur* (FoF), elle intègre des domaines prioritaires comme les procédés de fabrication ou les systèmes de production intelligents et adaptatifs. La deuxième traite des *technologies en faveur des bâtiments économes en énergie* (EeB), avec notamment le développement et le déploiement de technologies de construction durables. Les programmes s'adressent à l'ensemble des acteurs de la construction, de la conception à la fin de vie, en considérant le contexte et l'adaptation aux contraintes locales, les équipements et la structure de l'édifice, les procédés de construction et les performances énergétiques, ainsi que l'intégration dans la ville et dans l'environnement.

Dans les paragraphes qui suivent nous proposons de définir la notion de *robotique créative*, puis d'identifier brièvement les enjeux techniques et scientifiques, l'importance de la formation, ainsi qu'une délimitation des processus d'innovation qui accompagnent le développement de ces méthodes.

4.3.1. *La robotique créative*

Le cycle machine - matière - modèle

La *robotique créative* s'intéresse à l'usage et aux potentiels des techniques de fabrication robotique dans le contexte des disciplines de la création que sont l'architecture, l'art et le design. Nous envisageons ces expérimentations dans une perspective de réinterprétation des savoir-faire, de renouvellement des procédés de

¹²⁷ Key Enabling Technologies

¹²⁸ <https://www.horizon2020.gouv.fr/cid72768/ket-systemes-production.html> consulté le 27 janvier 2020

matérialisation, de détournement et d'appropriation de ces systèmes techniques. L'expérimentation représente une modalité privilégiée d'acquisition et de constitution de connaissance dans le domaine. Les interrelations entre les réalités physiques et numériques caractérisent le système computationnel que la *robotique créative* explore. Ces interactions se constituent à l'aide d'un flux informationnel bidirectionnel allant du modèle de conception à la matière. Les définitions précédentes autour de la fabrication adaptative ou en temps réel, de la modélisation informée par la matière ou des systèmes matériels agrégeant computation physique et numérique, constituent des approches en prise avec cette thématique de la robotique créative. L'ensemble de ces travaux met en relation trois composantes principales au sein d'une boucle d'interactions que nous nommons *cycle machine-matière-modèle* (Figure 55).

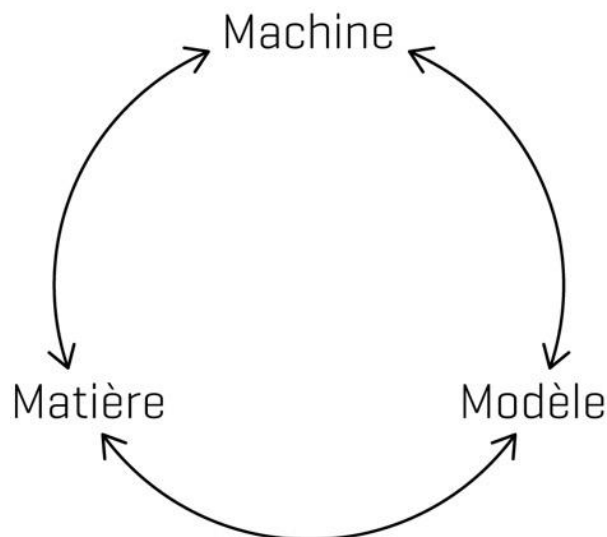


Figure 55. Cycle Machine-Matière-Modèle

Machine : une diversité des systèmes

Elle est la composante qui opère des actions ou des mesures à l'aide d'actionneurs et de capteurs. Le bras industriel constitue un outil privilégié et polyvalent pour ces démarches, il permet de réaliser diverses tâches qui vont du dépôt de matière, à l'empilement de modules, en passant par l'usinage. Le bras industriel peut être installé sur une plateforme mobile, éventuellement autonome, pour élargir les zones possibles d'intervention. D'autres machines sont utilisées, elles sont de type et de taille variés. Dans le domaine de la construction additive, et pour répondre à des contraintes de

dimensions des objets à réaliser, 3 autres typologies de machines ont été identifiées (Labonnote et al. 2016). Les portiques sont parmi les premiers systèmes expérimentés, ils reproduisent une imprimante 3D classique à une taille supérieure. L'outil, porté par un système d'axes, peut se déplacer dans les trois directions d'un repère cartésien. Cependant le dispositif devient particulièrement encombrant, difficile à installer et à déplacer dès que les questions portent sur des objets en grandeur. Le système par câbles facilite le déploiement à grande échelle, il est plus léger et plus économique à mettre en œuvre. L'outil est fixé à l'extrémité de trois câbles qui permettent de contrôler sa position dans l'espace. La fabrication à l'aide d'essaims de petits robots représente une troisième stratégie. Ces robots peuvent être des drones, comme dans le projet *Flight assembled architecture* présenté au FRAC Centre (Gramazio Kohler Architects 2011), ou une série de petits robots, dédiés à la réalisation de tâches spécifiques, à la manière du projet *Minibuilders* réalisé par Sasa Jokic and Petr Novikov (Institute of Advanced Architecture of Catalunya, s. d.). D'autres expériences combinent plusieurs machines et mettent en place des procédures de collaboration entre robots. Le pavillon ICD/ITKE 2016-2017 révèle une structure en porte à faux réalisée par tressage de fibres de carbone et mise en œuvre à l'aide de deux bras industriels associés à un drone. Les robots sont installés aux extrémités de la structure et le drone assure le transfert du ruban de carbone d'une machine à la seconde (Felbrich et al. 2017).

Certaines approches s'inscrivent dans une démarche de modification et transformation de systèmes existants avec une coloration « bricolage ». Ainsi le projet *FAB Bots*, conduit par Marta Malé-Alemany, de 2009 à 2011 au sein de différentes écoles d'architecture, a abouti à la réalisation de plusieurs systèmes de matérialisation, adossés à des stratégies de fabrication par dépôt de matière ou par tissage (Malé Alemany 2009; Malé Alemany et Portel 2014). L'objectif des recherches portait notamment sur la conception et le détournement de machines robotisées, il nécessitait une familiarisation avec les techniques du « physical computing » et de la mécatronique. Les recherches ont permis de mettre au point divers procédés. *Fluid cast* est une technique d'impression 3D d'un matériau à changement de phase par pulvérisation dans un liquide, *Dreamweaver* détourne une machine à tricoter pour réaliser les structures tissées habitables, ou encore *NGPS (Non Gravitational Printing System)* s'inspire de la gastronomie moléculaire pour solidifier des dépôts de matière molle dans un mélange

d'eau et d'alginate. Un dernier exemple est le *Solar Sinter Project*¹²⁹, réalisé par Markus Kayser. La machine est autonome, elle fonctionne à l'aide de l'énergie solaire captée par des panneaux photovoltaïques, elle est capable de solidifier la silice du sable à l'aide de la concentration du rayon solaire traversant une lentille de Fresnel. Au cours du processus le rayon lumineux est concentré et déplacé à la surface d'un lit de sable. Couches après couches, la silice du sable se cristallise pour donner forme à un objet.

Matière : variété des typologies et enjeux écologiques

Une grande variété de matériaux sont mis en œuvre à l'aide des procédés numériques. Avec les techniques soustractives, ce sont le bois, la pierre, le marbre ou diverses mousses qui sont usinés, fraisés ou poncés par des centres d'usinage ou des bras industriels équipés d'outils de coupe ou de taille. Les logiques de construction par stéréotomie sont revisitées avec l'usage de la robotique (Feringa et Søndergaard 2014). A l'occasion de plusieurs rencontres, le principe de construction d'une arche funiculaire par empilement de voussoirs en mousse, découpés à l'aide d'un fil chaud installé sur un bras industriel, a été expérimenté au sein de notre laboratoire (Figure 56). Avec les méthodes additives, c'est une multitude de matériaux qui sont mis en œuvre. Leurs états avant dépôt peuvent être solides, c'est la réalisation de structures par empilement, tissage ou assemblage de modules de différentes natures. Ils peuvent être visqueux, avec des principes de dépôt par extrusion de la matière et solidification au contact d'adjuvants ou du milieu ambiant, ces extrusions à froid sont réalisées en béton, en argile ou en sable. La matière peut être sous forme de poudre, c'est l'impression par frittage et fusion, ou liquide avec solidification par la lumière.

Les enjeux de recyclage, l'incorporation de matière recyclée, de mise en œuvre de matériaux respectueux de l'environnement ainsi que les questions d'optimisation et d'économie de matière, sont au centre de ces travaux. Le projet *Architectural Hypar System* (AHS), soutenu par le programme *Printarch*¹³⁰, porté par la société SNBR et conduit par Giuseppe Fallacara, visait la fabrication additive de modules de pierre reconstituée à partir des boues issues du sciage des blocs de marbre (Marin, Furet, et Fallacara 2019). Ainsi le projet instaure un cycle de production respectueux en utilisant dans son processus de fabrication une matière première secondaire.

¹²⁹ <https://vimeo.com/25401444> consulté le 27 janvier 2020

¹³⁰ <http://www.printarch.net> consulté en janvier 2020



Figure 56. Arche funiculaire, construction par stéréotomie, Les Grands Ateliers, ENSAG, travaux de l'auteur, octobre 2019

Modèle : Généralisation des technologies numériques et continuum informationnel

Ces approches s'appuient sur une instrumentation numérique qui inscrit une forme de continuum entre les moments de la conception et ceux de la fabrication. Une modélisation intégrée est mise en place, elle permet la définition géométrique, elle inclut des algorithmes de simulation et d'optimisation, elle génère plus ou moins directement le langage de programmation des machines. Le modèle peut également se trouver informé des conditions de fabrication et peut ainsi modifier les opérations de production. Le modèle constitue la description mathématique et géométrique, il traite

le flux informationnel à la fois pour définir la morphologie à réaliser, pour programmer la machine et adapter son comportement en fonction des réalités de prise de forme de la matière. Ces modélisations sont réalisées à l'aide des outils paramétriques qui intègrent des fonctionnalités de simulation et de génération du code de pilotage des machines. L'identification des conditions de fabrication peut se faire à l'aide de capteurs variés, reconnaissance d'image, mesures de distance ou de température, retour d'effort. Ces équipements, installés au sein de la cellule de production, envoient des informations au système. Elles sont traitées, parfois directement dans l'environnement de modélisation, pour adapter une vitesse ou redéfinir une trajectoire. Il apparaît essentiel de déterminer ce flux informationnel, sa structure et son contenu, pour mettre en place son traitement. Les questions numériques ne portent plus sur une interopérabilité des formats de description, mais plutôt sur la mise en place d'un flux informationnel. Celui-ci est composé de valeurs et d'instructions, qui sont traitées, interprétées ou captées par le dispositif cyber-physique de fabrication. Ces modélisations et programmations peuvent aujourd'hui être réalisées directement au sein des outils de modélisation des architectes et des designers.

4.3.2. Enjeux techniques et scientifiques

Chacun des composants du cycle *machine-matière-modèle* porte des enjeux techniques et scientifiques. Les considérations autour de la machine et du système cyber-physique de fabrication visent la mise au point de nouveaux procédés, plus efficaces, tenant compte des impacts environnementaux, facilitant les modes de collaboration entre les machines et avec les humains. Les recherches dans le domaine du génie des matériaux sont nombreuses, elles portent sur la mise au point de nouveaux matériaux dans une démarche d'écoconception, respectueuse de l'environnement, intégrant des matières premières secondaires, présentant de meilleures propriétés. Les matériaux multifonctionnels, à gradient de fonctions par exemple, font l'objet de travaux et de mises au point. Les nouveaux usages des matériaux traditionnels intéressent également les concepteurs, dans une perspective d'exploration créative et de renouvellement des possibles. Le modèle numérique définit et traite le flux informationnel, sa facilité d'utilisation et d'appropriation doit-être prolongée. Le développement de nouveaux algorithmes est permanent, ils sont plus rapides, plus performants, ils permettent des modélisations prédictives des comportements, ils intègrent parfois l'intelligence artificielle. L'ouverture des protocoles et des langages ainsi que les dynamiques de

partages de codes et de bibliothèques représentent des moteurs importants de développement. Le code devient la description partagée entre les domaines et les expertises, il représente un nouveau mode notationnel de description. L'usage de cet encodage devient efficient lorsqu'il est mobilisé tout au long des processus de conception et de fabrication et qu'il s'inscrit dans un continuum numérique. Le potentiel de transformation des technologies numériques se révèle dans leurs généralisations, c'est-à-dire leurs usages par l'ensemble des acteurs.

Les procédés de numérisation du réel vont du relevé à la fabrication, en passant par les phases de conception et en exploitant une connaissance encodée. La *photomodélisation* représente une première technique de numérisation de l'existant, elle permet la reconstruction d'un modèle numérique 3D d'un édifice à partir d'une série de photographies (De Luca 2009). Le relevé laser constitue une seconde approche (Figure 57), celui-ci constitue un nuage de points référencés dans l'espace, ces points sont maillés pour permettre la reconstruction des surfaces. Ces techniques ont été appliquées à la réalisation d'éléments de structure faites de pièces de bois mises au rebus pour cause de défaut de régularité, la dimension non standard et le potentiel écologique de l'usage de matière première secondaire se révèlent prometteurs. En 2012, cette approche est expérimentée, au sein du laboratoire MAP-CRAI, avec la réalisation d'un dôme par assemblage de branches non-régulières (Monier, Duchanois, et Bignon 2012). En 2017, le projet *Tree Fork Truss* (Self et Vercruyse 2017) explore le potentiel de ces relevés lasers dans la construction d'une charpente. A partir du scan d'un ensemble de grumes, les fourches des arbres sont isolées et assemblées dans une modélisation 3D. L'irrégularité des morphologies devient un paramètre, une contrainte de conception. La composition est validée en termes de comportement structurel, la découpe des assemblages des fourches deux à deux est réalisée par un bras robotisé.

Ces approches ouvrent la voie à de nouvelles matérialités, de nouvelles spatialités, qui sont parfois accompagnées d'un renouveau de l'ornementation. Elles permettent d'envisager le paradigme de la personnalisation de masse avec une possible individualisation des composants de l'édifice. Elles accompagnent un renouvellement des discours sur les méthodes et processus de conception et de fabrication.



Figure 57. Vue d'un relevé 3D des berges de Seine, ENSAPVS, studio Yann Blanche, avril 2017 (image reproduite avec la permission de l'auteur).

4.3.3. Enjeux de formation

Dans un contexte de transition numérique, la formation de l'ensemble des acteurs des chaînes de valeurs est une priorité. Elle adresse à la fois les formations initiales, notamment au sein des écoles d'architecture, et les formations continues. Agence d'architecture, bureau d'étude ou encore atelier de fabrication assistent à une évolution des compétences, des savoir-faire, des méthodes et des outils. L'intégration de ces thématiques dans les programmes de formation assure la constitution d'une culture commune entre les acteurs de l'acte de construire. En rapprochant l'architecte de l'activité de fabrication et de construction, ces techniques participent à une prise de conscience des contraintes et des modalités de réalisation. Elles facilitent la prise en compte, dès les phases amont de la conception, des réalités de la construction. Ces modes et processus constructifs, nous l'avons vu, deviennent par extension des vecteurs de création et de conception. L'accessibilité des techniques de modélisation et de la robotique doit être facilitée pour assurer leur appropriation (Braumann, Stumm, et Brell-Cokcan 2018) et éviter l'écueil d'une trop forte technicisation. Nous proposons d'aborder ces compréhensions à travers la confrontation au cycle *machine-matière-modèle*.

4.3.4. Processus d'innovation technologique

L'usage de ces techniques représente des opportunités économiques pour les acteurs de la construction ou pour de nouvelles entités proposant des services ou des procédés spécifiques. Elles sont un vecteur d'innovation. Une analyse de leur impact économique dépasse le cadre de ce mémoire. Nous privilégions ici l'identification des processus d'innovation qui accompagnent cette transition numérique et auxquels nous avons été confrontés à l'occasion de récents programmes de recherche. Dans cette perspective nous précisons les définitions de la terminologie fréquemment utilisée dans les domaines de la recherche et de l'innovation.

Les phases d'évolution du système technique

Attardons-nous sur les termes qui constituent les activités d'invention et d'innovation et qui distinguent les phases constitutives de l'évolution d'un système technique.

- *L'invention*, pour Hughes (Hughes 1987), se situe en amont des phases de développement, elle est souvent brutale et annonce un nouveau système technique. « Le propre de l'invention [technique] est de se matérialiser brutalement » (Leroi-Gourhan, 2013), elle s'appuie sur le génie inventif d'un individu ou d'un groupe. Elle est un « acte d'intelligence qui coïncide avec le sens de la tendance ». Pour se réaliser l'invention s'inscrit dans un processus qui mobilise des opérateurs et des opérations variés. Pour Simondon (Simondon 2005b), l'invention « est essentiellement un remaniement de structures et de fonctions par enchaînement dans le temps ».
- *La créativité*, pour Simondon, est portée par un individu ou un petit groupe, qui produisent beaucoup d'idées en « levant le frein qu'est l'esprit critique (...), la quantité est ici nécessaire, alors que la qualité est primordiale pour l'invention » (Simondon 2005b).
- *La découverte*, pour Simondon, reflète l'état des connaissances à un moment déterminé (Simondon 2005b).
- *Le développement*, pour Hughes, s'appuie sur une invention et procède à son adaptation à différentes conditions à travers l'intégration de paramètres fonctionnels.

- *L'innovation*, pour Hughes, caractérise le système de valorisation de l'invention à travers son intégration à un système technico-économique (Hughes 1987).
- Le *transfert technologique*, pour Hughes, renvoie à l'adaptation d'un système à une situation différente. Le transfert peut intervenir à différents moments du processus d'évolution (Hughes 1987).

Ces différentes activités constituent le processus de Recherche-Développement-Innovation (RDI). Celles-ci s'enchaînent de manière séquentielle ou s'imbriquent de façon itérative pour progressivement concrétiser une solution technologique.

La recherche et développement (RD)

Des distinctions sont habituellement réalisées pour qualifier les types d'activités de RD, le *Manuel de Frascati* (OCDE 2003) en dénombre 3 :

- « La recherche fondamentale consiste en des travaux expérimentaux ou théoriques entrepris principalement en vue d'acquérir de nouvelles connaissances sur les fondements des phénomènes et des faits observables, sans envisager une application ou une utilisation particulière » (OCDE 2003).
- « La recherche appliquée consiste également en des travaux originaux entrepris en vue d'acquérir des connaissances nouvelles. Cependant, elle est surtout dirigée vers un but ou un objectif pratique déterminé » (OCDE 2003).
- « Le développement expérimental consiste en des travaux systématiques fondés sur des connaissances existantes obtenues par la recherche et/ou l'expérience pratique, en vue de lancer la fabrication de nouveaux matériaux, produits ou dispositifs, d'établir de nouveaux procédés, systèmes et services ou d'améliorer considérablement ceux qui existent déjà » (OCDE 2003).

Cette typologie induit une approche séquentielle des activités allant de la recherche fondamentale à un développement expérimental. L'OCDE, dans la troisième édition du *Manuel d'Oslo* (OECD / Eurostat 2005), donne la définition de la recherche et développement expérimentale suivante : « La recherche et le développement expérimental englobent les travaux de création entrepris de façon systématique en vue d'accroître la somme des connaissances, y compris la connaissance de l'homme, de la culture et de la société, ainsi que l'utilisation de cette somme de connaissances pour de

nouvelles applications » (OECD / Eurostat 2005). Cette définition élargit le périmètre des activités et intègre des travaux qui ne relèvent pas exclusivement d'une connaissance technologique mais peuvent concerner les humanités (connaissance de l'homme, de la culture, de la société).

La *recherche finalisée*, telle que définie par le *Rapport de propositions et avis du Conseil stratégique de la recherche* (Conseil stratégique de la recherche 2015), fait référence à une activité scientifique qui prend comme point de départ des questions de société, elle est susceptible d'apporter une analyse sur les problèmes posés par les transformations et mutations de nos sociétés.

Une définition de l'innovation

La RD trouve dans l'innovation son prolongement. L'innovation s'entend comme la mise en relation de l'invention avec son milieu à travers l'intégration des contraintes de l'économie marchande. Le *Manuel d'Oslo* (OECD / Eurostat 2005) donne à l'innovation la définition suivante : « Une innovation est la mise en œuvre d'un produit (bien ou service) ou d'un procédé nouveau ou sensiblement amélioré, d'une nouvelle méthode de commercialisation ou d'une nouvelle méthode organisationnelle dans les pratiques de l'entreprise, l'organisation du lieu de travail ou les relations extérieures » (OECD / Eurostat 2005). Le *Manuel d'Oslo* insiste sur le rôle de la collaboration externe dans les processus d'innovation.

Les processus d'innovation : vers une innovation collaborative

A partir de ces délimitations, nous nous proposons d'identifier les modèles et les processus émergents qui caractérisent les pratiques de la période contemporaine, en partant des approches dites *Technology Push* et en allant jusqu'au démarche collaborative qui caractérise le *modèle économique et industriel contributif*.

Le modèle *technology push*, caractéristique d'une approche descendante, a représenté pendant une grande partie du XX^e siècle le modèle dominant de l'innovation. Ce modèle considère l'innovation comme étant directement issue d'un progrès technique ou technologique. Dans cette perspective plusieurs catégories d'innovation sont communément identifiées. Les *innovations incrémentales* représentent des innovations continues de petite ampleur. Les *innovations radicales* constituent des événements de

grande ampleur survenant ponctuellement. Les *changements de paradigmes technologiques* modifient en profondeur les organisations socio-économiques et les systèmes techniques. *L'innovation de rupture (disruptive)* caractérise principalement des modèles qui engendrent de nouvelles pratiques à partir de solutions plus économiques. Cette approche « par le haut » est symétrique d'un modèle qualifié de *market pull* ou *demand pull*, dans lequel l'utilisateur final prend une place centrale. Progressivement ces deux modèles sont combinés et conduisent à constituer des approches en réseaux ou des modèles ouverts de l'innovation, c'est-à-dire des processus *d'innovation ascendante*.

Ces démarches contributives s'appuient sur le partage d'informations, de connaissances et l'inscription des processus dans un réseau d'acteurs. La constitution d'écosystème de l'innovation, aux échelles régionales et nationales, apparaît comme une des conditions propices à l'émergence rapide de solutions innovantes. Les échanges entre les acteurs (concepteur, usager, scientifique, industriel, institutionnel, ...) prennent une place grandissante. De nouveaux modèles émergent. *L'innovation frugale* cherche à répondre à des besoins de la manière la plus simple possible. *L'innovation par intrapreneuriat* porte sur la stimulation de l'entrepreneuriat au sein de l'organisation. *L'innovation par optimisation algorithmique* s'intéresse à l'automatisation des activités. *L'innovation par l'usage* passe par la compréhension et l'observation des pratiques. *L'innovation open source* mobilise des approches collaboratives et ouvertes des processus et des solutions. *L'innovation par crowdsourcing* se caractérise par l'externalisation des idées ou des contenus auprès d'une grande quantité d'individus. *L'innovation sociale* vise à apporter de nouvelles réponses à des problèmes sociaux.

Cette *innovation collaborative*, ou *conjointe*, correspond à un processus d'innovation caractérisé par le partage d'information, d'idées, de connaissance, d'expertises ou d'opportunités. Elle passe par la mise en place de relations partenariales au sein d'un groupe d'acteurs. Les *alliances* autour de projet, le *crowdsourcing* ou l'*open source* constituent des exemples d'innovation collaborative. Nous retiendrons ici que l'innovation collaborative est multiforme, qu'elle intègre une optique de valorisation et d'intégration des connaissances externes et qu'elle passe par une mise en commun des connaissances et une co-construction des savoirs. Ainsi l'inscription des processus dans des dynamiques plus ouvertes et qui intègrent souvent des approches et des compétences transdisciplinaires constitue les modèles émergents de la RDI.

4.4 CONCLUSION

Dans ce volet nous avons illustré les étroites relations entre les cultures matérielles et les cultures numériques. Celles-ci se sont renforcées avec la démocratisation des *fab lab* ou des *kacker spaces*, des pratiques amateurs et des formes de bricolage qui leurs sont associées. Ces démarches contribuent à l'acceptation des techniques. Nous avons rappelé que les pratiques d'expérimentation et de simulation se complètent et se nourrissent dans une perspective d'intégration complémentaire des connaissances produites de manière analogique ou numérique. Les mondes numériques aussi bien que physiques constituent des systèmes d'information favorisant la construction de connaissance. Les notions de *tectonique* et de *matérialité* sont revisitées avec l'usage des techniques numériques, et le *continuum conception-fabrication* caractérise cette redéfinition.

Nous avons également porté un regard plus détaillé sur les techniques de fabrication automatisée et principalement celles associées aux logiques additives, en partant de la photosculpture et en allant jusqu'aux processus de *fabrication adaptative* ou de construction cyber-physique. La place de la robotique en architecture a été identifiée et nous avons proposé le triptyque *machine, matière, modèle* pour caractériser les approches de la robotique créative et rappeler les enjeux et opportunités qui lui sont associés.

5 CONCLUSION

Nous avons tenté d'identifier les différentes formes d'intégration des réalités physiques et numériques, en caractérisant les pratiques de conception numérique qui mobilisent des données comme vecteur de projet, en identifiant différentes modalités d'encodage, en révélant des applications hybrides. Dans ce contexte, l'activité de conception se caractérise par une pensée systémique, une activité de *méta-conception*, qui peut passer par des phases de matérialisation et de prototypage de dispositifs cyber-physiques intégrant la notion d'information de façon consubstantielle.

Nous avons précisé la notion de *continuum numérique*, celui-ci se constitue à travers les *flux informationnels* qui informent les modélisations, les représentations visuelles, et les processus de fabrication. De plus ces flux prennent de l'importance avec les démarches d'ouverture des données publiques et les maillages de capteurs qui appareillent nos édifices, nos villes ou nos équipements personnels.

Nous avons délimité le concept *d'information*, celui-ci naît avec les premiers encodages, et se renforce avec les travaux de la cybernétique. L'*information* est alors *signal*, support des communications et des interactions, au sein d'une machine ou d'un système naturel, elle permet de donner *forme* en tant qu'intermédiaire de transcription. Par ailleurs, l'information participe à la constitution de connaissances lorsque les données deviennent interprétables, quand des singularités émergent des représentations, quand la donnée est traitée pour produire une signification.

L'existence et l'usage de ces *flux informationnels* sont étroitement associés à la généralisation des techniques numériques, celles-ci sont présentes à tous les moments de la conception et de la fabrication, elles sont utilisées par tous les acteurs du projet. Si l'intégration en continu de ces flux n'est pas complètement réalisée, son potentiel annonce le renouvellement des méthodes et des processus. Ainsi la compréhension de ses fonctionnements et l'importance de sa structuration sont au cœur des processus d'instrumentation numérique. Nous avons noté le basculement des problématiques d'interopérabilité, précédemment adossées à des échanges de fichiers dans des formats partagés, vers la mise en place d'un flux de données transmises de manière continue entre des processus de traitement. Ces flux et leurs usages se déclinent à toutes les échelles, ils participent aux activités de modélisation et de simulation, ils constituent des rapprochements avec les procédés de fabrication, ils contribuent à la production de

néo-cartographies diagrammatiques, ils sont au cœur des dispositifs cyber-physiques. Et si ces techniques auraient pu entraîner un éloignement des mondes physiques et numériques, il est remarquable de considérer comment ces deux réalités s'articulent et se combinent. Le fait de considérer des *systèmes matériels* en tant que *dispositifs computationnels*, dont les interprétations permettent d'enrichir et de compléter les productions numériques, révèle la richesse de ces complémentarités. Par ailleurs, les dispositifs cyber-physiques constituent des artefacts hybrides et composites intégrant consubstantiellement ces deux réalités. Ici les distinctions traditionnelles entre nature et culture, vivant et artificiel, se brouillent. La limite entre le vivant et l'artifice est imprécise. La fleur qui croit dans un environnement contrôlé, est une production de la nature, mais elle est étroitement dépendante d'un milieu régulateur artificiel. Les artefacts opèrent des fonctions jusqu'ici réservées au vivant, les *objets-quasi-sujets* sont interactifs et présentent des formes d'autonomie, ils intègrent une « marge d'indétermination qui les rend sensible aux informations extérieures¹³¹ ». Ce processus de cybernétisation qui débute au milieu du XX^e siècle et l'évolution rapide des technologies numériques aboutissent à une technicisation des environnements sociaux, cognitifs et physiques. Une *écologie générale* qui permet de reconsidérer le rapport entre nature et technique et les couplages entre agents humains et non-humains émerge de l'hybridation des réalités physiques et numériques. Notre compréhension du monde s'adosse à une perception phénoménotechnique et une relation *espace-temps-information* se renforce.

Cette *naturalisation*¹³² se constitue en partie avec la *vectorisation* du monde. Les mises en algorithme, les quantifications et les *datafications* établissent nos réalités. L'appropriation consciente, critique et créative des technologies par les concepteurs nous paraît essentiel. Ces derniers doivent aiguïser une pensée critique qui passe par la compréhension des dynamiques socio-techniques auxquelles ils participent, par une lecture des trajectoires historiques et une appropriation créative des outils qui ouvre la voie à des détournements inventifs. Cette approche nous paraît nécessaire pour nous permettre d'appréhender les transformations à l'œuvre.

¹³¹ Citation de simondon tirée de (Simondon 2012)

¹³² Expression empruntée au titre de l'exposition « Naturaliser l'architecture: ArchiLab » (Brayer et Migayrou 2013)

6 REFERENCES

1. Alexander, Christopher. 1978. *A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction*. Oxford University Press Inc.
2. André, Jean-Claude, Alain Le Méhauté, et Olivier De Witte. 1986. Dispositif pour réaliser un modèle de pièces industrielles. INPI 2 567 668, issued 17 janvier 1986.
3. Antonioli, Manola. 2016. « Ezio Manzini : Vers une écologie des environnements artificiels ». In *Datalogie*, édité par Olaf Avenati et Pierre-Antoine Chardel, 246-55. Loco.
4. Auber, David, et Michel Beaudouin-Lafon. 2017. « Visualisation de données massives ». In *Les big data à découvert*, édité par M. Bouzeghoub et Rémy Mosseri. Paris: CNRS éditions.
5. Badariotti, Dominique, Arnaud Banos, et Diego Moreno. 2007. « Conception d'un automate cellulaire non stationnaire à base de graphe pour modéliser la structure spatiale urbaine: le modèle Remus ». *Cybergeo*, octobre. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.10993>.
6. Barrès, Patrick. 2007. « L'espace architectural en pli. Pratique du lieu et du flux ». *Communication et organisation [en ligne]*, n° 32 (décembre): 52-63.
7. Batty, Michael. 2009. « A Digital Breeder for Designing Cities ». *Architectural Design* 79 (4): 46-49. <https://doi.org/10.1002/ad.916>.
8. ———. 2012. « Smart Cities, Big Data ». *Environment and Planning Volume 39, Planning and Design*: 191-93.
9. ———. 2013. « Big Data, Smart Cities and City Planning ». *Dialogues in Human Geography* Vol 3, Issue 3 (décembre): 274-79. <https://doi.org/10.1177%2F2043820613513390>.
10. Bechthold, Martin. 2018. « Real-Time Robotics ». In *Towards a Robotic Architecture*, 114-25. Novato, CA: Applied Research and Design Publishing.
11. Beirão, José. 2012. « CityMaker: Designing Grammars for Urban Design ». *A+BE: Architecture and the Built Environment* 2. <https://doi.org/10.7480/abe.2012.5>.
12. Benrós, Deborah, Jose Duarte, et Sean Hanna. 2012. « A New Palladian Shape Grammar ». *International Journal of Architectural Computing* 10 (décembre): 521-40. <https://doi.org/10.1260/1478-0771.10.4.521>.
13. Berrebi-Hoffmann, Isabelle, Marie-Christine Bureau, et Michel Lallement. 2018. *Makers: Enquête sur les laboratoires du changement social*.
14. Berry, David M., Yves Cïtton, et Anthony Masure. 2015. « Subjectivités computationnelles ». *Multitudes* 59 (2): 196. <https://doi.org/10.3917/mult.059.0196>.
15. Bertin, Jacques. 1967. *Sémiologie Graphique. Les Diagrammes - Les Réseaux - Les Cartes*. Mouton.
16. ———. 1977. *La graphique et le traitement graphique de l'information*. Vol. Collection Nouvelle Bibliothèque Scientifique. Flammarion.
17. ———. 2013. *Sémiologie graphique: les diagrammes, les réseaux, les cartes*. Paris: Éd. EHESS.
18. Bihanic, David. 2018. *Data design: Les données comme matériau de création*. Alternatives.
19. Blather, J.E. 1892. Manufacture of contour relief maps. US 473 901, issued 3 mai 1892.
20. Bock, Thomas. 2008. « Construction Automation and Robotics ». In *Robotics and Automation in Construction*, édité par Carlos Balaguer et Mohamed Abderrahim. Rijeka: IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/5861>.

21. Bock, Thomas, et Silke Langenberg, éd. 2014. « Changing Building Sites. Industrialisation and Automation of the Building Process ». In *Made by Robots: Challenging Architecture at a Larger Scale*, 88-99. Architectural Design Profile 229. London: Wiley.
22. Boissieu, Aurélie de. 2013. « Modélisation paramétrique en conception architecturale : Caractérisation des opérations cognitives de conception pour une pédagogie ». <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29966.51521>.
23. Bottazzi, Roberto. 2018. *Digital Architecture Beyond Computers: Fragments of a Cultural History of Computational Design*. Bloomsbury Academic.
24. Bowring, Jacky, et Simon Swaffiel. 2009. « Diagrams in Landscape Architecture ». In *The Diagrams of architecture*, édité par Mark Garcia, 142-51. John Wiley & Sons Ltd.
25. Braumann, Johannes, Sven Stumm, et Sigrid Brell-Cokcan. 2018. « Accessible Robotics ». In *Towards a Robotic Architecture*, 154-65. Novato, CA: Applied Research and Design Publishing.
26. Brayer, Marie-Ange, et Frédéric Migayrou, éd. 2013. *Naturaliser l'architecture: ArchiLab*. Orléans: Ed. HYX.
27. Breton, Philippe. 1990. *Une histoire de l'informatique*. Seuil.
28. Buci-Glucksmann, Christine. 2008. *Philosophie de l'ornement: d'Orient en Occident*. Collection débats. Paris: Galilée.
29. Buckminster Fuller, Richard. 1971. « The World Game: integrative resource utilization planning tool » World Game Series : Document one.
30. Cache, Bernard. 1997. *Terre meuble*. Ressources. Orléans: Editions HYX.
31. Caldas, Luisa G. 2001. « An Evolution-Based Generative Design System : Using Adaptation to Shape Architectural Form ». London: Bartlett Graduate School, University College London.
32. Cardon, Dominique, Jean-Philippe Cointet, et Antoine Mazières. 2018. « La revanche des neurones: L'invention des machines inductives et la controverse de l'intelligence artificielle ». *Réseaux* n° 211 (5): 173. <https://doi.org/10.3917/res.211.0173>.
33. Carpo, Mario. 2011. *The alphabet and the algorithm*. Writing architecture. Cambridge, Mass: MIT Press.
34. ———. 2013a. *The digital turn in architecture 1992-2012*. AD Reader. Wiley.
35. ———. 2013b. *Notations and Nature : From Artisan Mannerism to Computational Making*. Conférence dans le cadre de la 9eme exposition ArchiLab : Naturaliser l'architecture. <https://vimeo.com/86102570>.
36. Celnik, Olivier, Eric Lebègue, et Guersendre Nagy. 2015. *BIM et maquette numérique pour l'architecture, le bâtiment et la construction*.
37. Chardonnet, Ewen. 2012. « Fabrication numérique et économie de l'atelier ». In *Artisans numériques*, 101-9. Script. HYX. https://www.editions-hyx.com/sites/default/files/public/media/artisans_numeriques_hyx-access.pdf.
38. Chazal, Gérard. 2013. *Philosophie de la machine: néo-mécanisme et post-humanisme*. Collection Écritures. Dijon: Éditions Universitaires de Dijon.
39. Chu, Karl. 2006. « Metaphysics of Genetic Architecture and Computation ». *Architectural Design* 76 (4): 38-45. <https://doi.org/10.1002/ad.292>.
40. ———. 2015. X phylum / Catastrophe machine Entretien réalisé par Greg Lynn. Publication électronique. Centre Canadien de l'Architecture. <https://books.apple.com/fr/book/karl-chu-x-phylum-catastrophe-machine/id1002168906>.
41. Chupin, Jean-Pierre, Cyrille Simonnet, Kenneth Frampton, Réjean Legault, et Collectif. 2005. *Le projet tectonique*. Infolio.

42. Coates, Paul. 1996. « The use of cellular automata to explore bottom up architectonics rules ». In . Vol. 14.
43. ———. 2010. *Programming Architecture*. Routledge.
44. Coates, Paul, Terence Broughton, et Helen Jackson. 1999. « Exploring three-dimensional design worlds using Lindenmayer Systems and genetic programming ». In *Evolutionary Design by Computers*, édité par Peter J. Bentley, 323-41. Morgan Kaufmann.
45. Collectif. 1997. *Internationale Situationniste*. Fayard.
46. Combette, Philippe, et Alain Foucaran. 2017. « Les capteurs de données ». In *Les big data à découvert*, édité par M. Bouzeghoub et Rémy Mosseri. Paris: CNRS éditions.
47. Conseil stratégique de la recherche. 2015. « Stratégie nationale de recherche. Rapport de propositions et avis du Conseil stratégique de la recherche ». Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche. <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid86746/strategie-nationale-de-recherche-rapport-de-propositions.html>.
48. Corner, James. 1999. « The Agency of Mapping ; Speculation, Critique and Ivention ». In *Mappings*, édité par Denis Cosgrove, 213-52. London: Reaktion Books.
49. Correia, Ricardo Mendes, et Maria Guerreiro. 2019. « The Roots of 4IR in Architecture - A military drawing machine used for space perception in architecture ». In *Architecture in the Age of the 4th Industrial Revolution*, édité par JP Sousa, JP Xavier, et G Castro Henriques, 1:397-406. Porto, Portugal.
50. Coulais, Jean-François. 2015. *Images virtuelles et horizons du regard: Visibilités calculées dans l'histoire des représentations*. Genève: MétisPresses.
51. Crawford, Matthew B, et Marc Saint-Upéry. 2016. *Éloge du carburateur: essai sur le sens et la valeur du travail*. Paris: La Découverte.
52. Crosnier, Hervé Le. 2015. *En communs : Une introduction aux communs de la connaissance*. C&F Editions.
53. Daas, Mahesh. 2018. « Being Thinking Doing Becoming : Framing Robotics in Architecture ». In *Towards a Robotics Architecture*. Novato, CA: Applied Research and Design Publishing.
54. Dalsgaard, Peter. 2017. « Instruments of Inquiry: Understanding the Nature and Role of Tools in Design ». *International Journal of Design* 11 (1). <http://www.ijdesign.org/index.php/IJDesign/article/view/2275>.
55. Dangermond, Jack. 2014. « Creating our future ». *ArcNews*.
56. Dantas, H, J Sousa, et H Melo. 2019. « The Importance of City Information Modeling (CIM) for Cities' Sustainability ». *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 225: 012074. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012074>.
57. Dao, Quoc-Hy. 2005. « Le rôle des systèmes d'information géographique pour le développement urbain durable ». In *Enjeux du développement urbain durable: transformations urbaines, gestion des ressources et gouvernance*, édité par Antonio Da Cunha, Peter Knoepfel, Jean-Philippe Leresche, et Stéphane Nahrath, 123-56. Lausanne: Presses Polytechniques et Univ. Romandes. <http://archive-ouverte.unige.ch/unige:74870>.
58. Dardot, Pierre, et Christian Laval. 2015. *Commun essai sur la révolution au XXIe siècle*. Paris: Découverte. <http://banq.pretnumerique.ca/accueil/isbn/9782707188205>.
59. Dawkins, Richard. 1986. *The Blind Watchmaker*.
60. De Luca, Livio. 2009. *La photomodélisation architecturale: relevé, modélisation, représentation d'édifices à partir de photographies*. Paris: Eyrolles.
61. Deleuze, Gilles. 1988. *Le pli*. Editions de Minuit.
62. Desbois, Henri. 2016. « La seule chose qui compte ... » In *Datalogie*, édité par Olaf Avenati et Pierre-Antoine Chardel. Loco.

63. DiBiase, D, M DeMers, A Johnson, K Kemp, A Luck, B Plewe, et E Wentz. 2016. « Web mapping and visualizations ». In *The geographic information science & technology body of knowledge*, Association of American Geographers.
64. Dierichs, Karola, Achim, et Achim Menges. 2015. « Granular Morphologies. Programming Material Behaviour with Designed Aggregates ». In *Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational*, 86-91. Architectural Design Profile 237. London: Wiley.
65. Dierichs, Karola, et Achim Menges. 2010. « Material Computation in Architectural Aggregate Systems ». In , Proceedings of the 30th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture:372-78.
66. Douay, Nicolas. 2016. « Planifier à l'heure du numérique ». Paris: Université Paris-Sorbonne.
67. Dragicevic, Pierre, Yvonne Jansen, et Andrew Vande Moere. 2019. « Data Physicalization ». In , in press.
68. Ermine, Jean-Louis, Mahmoud Mouradi, et Stéphane Brunel. 2012. « Une chaîne de valeur de la connaissance ». *Management international* 16: 29-40.
69. Eveno, Emmanuel. 2017. « Big data et gouvernance urbaine ». In *Les big data à découvert*, édité par M. Bouzeghoub et Rémy Mosseri. Paris: CNRS éditions.
70. Felbrich, Benjamin, Nikolas Frueh, Marshall Prado, Saman Saffarian, James Solly, Lauren Vasey, Jan Knippers, et Achim Menges. 2017. « Multi-Machine Fabrication: An Integrative Design Process Utilising an Autonomous UAV and Industrial Robots for the Fabrication of Long Span Composite Structures ». In *Disciplines & disruption*, 248-59. Cambridge.
71. Feringa, Jelle, et Asbjørn Søndergaard. 2014. « Fabricating Architectural Volume: Stereotomic Investigations in Robotic Craft ». In *Fabricate: Negotiating Design & Making*, édité par Fabio Gramazio, Matthias Kohler, et Silke Langenberg, 207-16. Zurich: gta-Verl.
72. Fétro, Sophie. 2015. « Bricolages en design. Inventer des rapports non réguliers à la technique ». *Techniques & Culture* Essais de Bricologie. Ethnologie de l'art et du design contemporains (N°64): 152-67.
73. Field, K. 2017. « Cartograms ». In *The Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge*, édité par John P. Wilson.
74. Fink, Theresa, et Reinhard Koenig. 2019. « Integrated parametric urban design in Grasshopper / Rhinoceros 3D, Demonstrated on a Master plan in Vienna ». In *Architecture in the Age of the 4th Industrial Revolution*, édité par JP Sousa, JP Xavier, et G Castro Henriques, 3:313-22.
75. Fish, Carolyn S. 2018. « Spatiotemporal Representation ». In *The Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge*, édité par John P. Wilson.
76. Fotheringham, A. Stewart. 1998. « Trends in quantitative methods II: stressing the computational ». *Progress in Human Geography* 22 (2): 283-92. <https://doi.org/doi.org/10.1191/030913298670827726>.
77. Frampton, Kenneth. 2001. *Studies in Tectonic Culture*. New Ed. The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture. MIT Press.
78. Frankhauser, Pierre. 1990. « Aspects fractals des structures urbaines ». *Espace géographique* 19 (1): 45-69. <https://doi.org/10.3406/spgeo.1990.2943>.
79. Frechin, Jean-Louis. 2008. « Interfaces : un rôle pour le design ». In *Le design de nos existences : A l'époque de l'innovation ascendante*, 254-60. Mille et une Nuits.
80. Fredricksson, Sylvia. 2015. « Du design d'information à la visualisation de données : Un enjeu de transmission de sens auprès de la société civile ». *I2D - Information, données & documents* Vol 52: page 36.
81. Friedman, Yona. 1971. *Pour l'architecture scientifique*. art-action-architecture. Paris: Pierre Belfond.

82. Fun, Siew Leng, Kees Christiaanse, Stephen Cairns, Aurel von Richthofen, Dietmar Leyk, Katja Knecht, Yufan Miao, et Reinhard König. 2018. *Urban Elements. Advanced Studies in Urban Design*. Édité par Aurel von Richthofen. Singapore: Future Cities Laboratory (FCL); Urban Redevelopment Authority. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000270354>.
83. Garber, Richard, éd. 2017. « Introduction ». In *Workflows: Expanding Architecture's Territory in the Design and Delivery of Buildings*. Architectural Design Profile, no 247. Oxford: John Wiley & Sons.
84. Garcia, Mark. 2009. « Introduction ». In *The Diagrams of Architecture*, édité par Mark Garcia, 18-45. John Wiley & Sons Ltd.
85. Gausa, Manuel. 1997. « Temps dynamiques-ordre <in>formel : trajectoires <in>disciplinés ». *Quaderns Spirales* (222).
86. Gero, John S., et Vladimir Kasakov. 1996. « Evolving building blocks for design using genetic engineering: A formal approach ». In *Advances in Formal Design Methods for CAD*, édité par John S. Gero, 31-50. London: Chapman and Hall.
87. Gershenfeld, Neil A. 2007. *Fab: The Coming Revolution on Your Desktop - from Personal Computers to Personal Fabrication*. Paperback publ. New York, NY: Basic Books.
88. Gleick, James. 2015. *L'information - L'histoire La théorie Le déluge*. Cassini.
89. Goulthorpe, Mark. 2015. Hyposurface Entretien réalisé par Greg Lynn. Publication électronique. Centre Canadien de l'Architecture. <https://books.apple.com/fr/book/mark-goulthorpe-hyposurface/id948385060>.
90. Gramazio, Fabio, et Matthias Kohler. 2008. *Digital Materiality in Architecture*. Lars Muller Publishers.
91. Gramazio, Fabio, Matthias Kohler, et Jan Willmann, éd. 2014. *The robotic touch: how robots change architecture*. Zurich: Park Books.
92. Gramazio Kohler Architects. 2011. « Flight Assembled Architecture ». 2011. <http://www.gramaziokohler.com/web/e/projekte/209.html>.
93. Grigoriadis, Kostas, éd. 2016. *Mixed matters: a multi-material design compendium*. Berlin: Jovis.
94. Hack, Norman Peter, Timothy Wangler, Jaime Mata-Falcón, Kathrin Dörfler, Nitish Kumar, Alexander Walzer, Konrad Graser, et al. 2017. « Mesh mould : an on site, robotically fabricated, function formwork ». In .
95. Hajer, Maarten, et Tom Dassen. 2014. *Smart about Cities: Visualising the Challenge for 21st Century Urbanism*. nai010 publishers.
96. Halpern, Orit. 2017. « L'architecture comme machine : la ville intelligente déconstruite ». In *Quand le Numérique Marque-t-il l'Architecture ?*, édité par Andrew Goodhouse, 464. Centre Canadien d'Architecture, Sternberg Press.
97. Harding, John, et Cecilie Brandt-Olsen. 2018. « Biomorpher: Interactive evolution for parametric design ». *International Journal of Architectural Computing* 16 (2): 144-63. <https://doi.org/10.1177/1478077118778579>.
98. Harding, John E., et Paul Shepherd. 2017. « Meta-Parametric Design ». *Design Studies* 52: 73-95. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2016.09.005>.
99. Hensel, Michael, Achim Menges, et Michael Weinstock. 2010. *Emergent Technologies and Design: Towards a Biological Paradigm for Architecture*. Routledge.
100. Hersey, George L., et Richard Freedman. 1992. *Possible Palladian villas: plus a few instructively impossible ones*. Cambridge, Mass: MIT Press.
101. Hillier, Bill, et Julienne Hanson. 2005. *The Social Logic of Space*. Repr. Cambridge: Cambridge Univ. Press.

102. Hoberman, Chuck, et Craig Schwitter. 2011. « Adaptive Structures, Building for performance and sustainability ». In , 11 : Integration through Computation:56-59.
103. Holland, John H. 1992. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. 1st MIT Press ed. Complex adaptive systems. Cambridge, Mass: MIT Press.
104. Hughes, Thomas P. 1987. « The Evolution of Large Technological System ». In *The Social Construction of Technological Systems: New Directions in the Sociology and History of Technology*, 400. MIT Press.
105. Ingold, Tim. 2017. *Faire: anthropologie, archéologie, art et architecture*. Traduit par Hervé Gosselin et Hicham-Stéphane Afeissa.
106. Institute of Advanced Architecture of Catalunya. s. d. « Minibuilder: Small Robots Printing Big Structures Accessed »: <http://robots.iaac.net>.
107. Jackson, Davina. 2018. *Data Cities - How Satellites Are Transforming Architecture and Design*. Lund Humphries.
108. Jansen, Yvonne, Pierre Dragicevic, Petra Isenberg, Jason Alexander, Abhijit Karnik, Johan Kildal, Sriram Subramanian, et Kasper Hornbæk. 2015. « Opportunities and Challenges for Data Physicalization ». In .
109. Jeandel, Catherine. 2017. « La Terre : un système d'information ». In *Les big data à découvert*, édité par M. Bouzeghoub et Rémy Mosseri. Paris: CNRS éditions.
110. Karsenty, Jean-Paul. 2016. « Big Data (mégadonnées): Une introduction ». In *Datalogie*, édité par Olaf Avenati et Pierre-Antoine Chardel. Loco.
111. Koenig, Reinhard, Yufan Miao, Katja Knecht, Peter Bus, et Chang Mei-Chih. 2017. « Interactive Urban Synthesis Computational Methods for Fast Prototyping of Urban Design Proposals ». In . Vol. Future Trajectories of Computation in Design.
112. Kolarevic, Branko. 2005. *Architecture in the Digital Age : Design and Manufacturing*. Taylor & Francis.
113. ———. 2008. « Post-Digital Architecture: Towards Integrative Design ». In , What Matters(s)?149-56.
114. ———. 2014. « Computing the performative ». In *Theories of the Digital in Architecture*, édité par Rivka Oxman et Robert Oxman, 103-11. New York: Routledge.
115. Kosa, John, Forest H. Bennett III, David Andre, et Martin A. Keane. 1999. « The design of analogue circuits by means of genetic programming ». In *Evolutionary design by computers*, édité par Peter J. Bentley, 365-85. Morgan Kaufmann.
116. Kula, Daniel, et Elodie Ternaux. 2012. *Materiology*. 2^e éd. Birkhäuser.
117. Labonnote, Nathalie, Anders Rønquist, Bendik Manum, et Petra Rüter. 2016. « Additive Construction: State-of-the-Art, Challenges and Opportunities ». *Automation in Construction* 72 (décembre): 347-66. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.026>.
118. Lallement, Michel. 2015. *L'Âge du faire. Hacking, travail, anarchie*. Le Seuil.
119. Lauriault, Tracey P., et Jeremy Wood. 2009. « GPS Tracings - Personal Cartographies ». *The Cartographic Journal Art & Cartography Special Issue* (novembre): 360-65. <https://doi.org/10.1179/000870409X12549997389628>.
120. Leach, Neil, David Turnbull, et Chris Williams. 2004. *Digital Tectonics*. 1^{re} éd. Academy Press.
121. Lima Costa, Mariana, Daniel Cardoso, et Clarissa Freitas. 2019. « Informal settlements and city information modeling, Producing data to inform land use regulation in Fortaleza-Brazil ». In *Architecture in the Age of the 4th Industrial Revolution*, édité par JP Sousa, JP Xavier, et G Castro Henriques, 3:323-32.

122. Lima, Manuel. 2011. *Visual complexity: mapping patterns of information*. New York: Princeton Architectural Press.
123. ———. 2014. *The book of trees: visualizing branches of knowledge*. First edition. New York: Princeton Architectural Press.
124. Llach, Daniel Cardoso. 2015. *Builders of the vision: software and the imagination of design*. New York, NY: Routledge.
125. Lynn, Greg. 1998. *Folds, bodies & blobs: collected essays*. Books-by-architects. Bruxelles: La Lettre volée.
126. ———. 1999. *Animate form*. New York: Princeton Architectural Press.
127. ———, éd. 2004. *Folding in architecture*. Rev. ed. Architectural design. Chichester, West Sussex ; Hoboken, NJ: Wiley-Academy.
128. ———. 2017. « Devenir natif du numérique : des notes sur une sélection d'artéfacts de l'architecture numérique de la fin du XXe siècle ». In *Quand le numérique marque-t-il l'architecture ?*, édité par Andrew Goodhouse, 281-334. Centre Canadien d'Architecture, Sternberg Press.
129. Malé Alemany, Marta. 2009. « Machinic Controm : design experiments with customized CNC machines ». In . Vol. *The Design and Fabrication of Innovative Forms in a Continuum*.
130. Malé Alemany, Marta, et Jordy Portel. 2014. « FAB Bots: Research in Additive Manufacturing for Architecture ». In *Fabricate: Negotiating Design & Making*, édité par Fabio Gramazio, Matthias Kohler, et Silke Langenberg, 207-16. Zurich: gta-Verl.
131. Maniaque Benton, Caroline. 2014. *Go west! des architectes au pays de la contre-culture*. Marseille: Parenthèses.
132. Maniaque-Benton, Caroline. 2016. *Whole Earth Field Guide*. The MIT Press.
133. Manovich, Lev. 2010. « What is Visualization? » *Poetess Archive Journal* Visualizing the Archive Vol 2, No 1 (décembre).
134. Manzini, Ezio. 1992. *Artefacts: vers une nouvelle écologie de l'environnement artificiel*. Les essais / Centre Georges Pompidou. Paris: Ed. du Centre Pompidou.
135. Marin, Philippe. 2010. « Exploration des Mécanismes Evolutionnaires appliqués à la conception architecturale ». Nancy: Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL).
136. Marin, Philippe, et Jean-Claude Bignon. 2013. « Metaconception, Evolutionary Tooling of the Creative Design Process ». *ELSA - Environment, Land, Society* Vol. 3 : III-IV.
137. Marin, Philippe, Jean-Claude Bignon, et Hervé Lequay. 2009. « Paramètres environnementaux et mécanismes de conception évolutionnaire. » In . Vol. *Conception numérique et approches environnementales*. Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy: Presse Universitaire de Lorraine.
138. Marin, Philippe, et Yann Blanchi. 2016. « Modélisation architecturale assistée par des données : données, information, paramètre, connaissance ». In . Vol. *Le temps de la conception*. Ecole d'Architecture de Grenoble.
139. Marin, Philippe, et José Antonio Cuba Segura. 2014. « Outils, méthodes et acteurs : analyse des limites à l'utilisation de la maquette numérique ». In , édité par Jean-Claude Bignon, Gilles Halin, et Sylvain Kubicki. Vol. *Interaction(s) des Maquettes Numériques*. Presse Universitaire de Nancy.
140. Marin, Philippe, Benoit Furet, et Guiseppa Fallacara. 2019. « Printarch : processus de recherche innovation en matière d'impression 3D en grandeur ». In . Ecole des Ponts ParisTech.
141. Marin, Philippe, Marian Janda, et Yann Blanchi. 2014. « Les principes de la SmartCity support d'une activité projectuelle et d'une contextualisation subjective ». In , édité par Jean-

- Claude Bignon, Gilles Halin, et Sylvain Kubicki. Vol. Interaction(s) des Maquettes Numériques. Presse Universitaire de Nancy.
142. Marin, Philippe, et Agnieska Karolak. 2017. « Data et Territoire ». *Local Contemporain* N°9, Paysages Singuliers, Paysage Pluriel.
 143. Marin, Philippe, Xavier Marsault, Renato Saleri, Gilles Duchanois, et Jean-Claude Bignon. 2012. « L'éco-Conception Générative : Une illustration de la pensée complexe ». In . Vol. Complexité des modèles de l'architecture numérique. Presse Universitaire de Lorraine.
 144. Mathews, Stanley, et Pier Vittorio Aureli. 2004. *Potteries thinkbelt & Fun Palace*. Editions B2. Territoires.
 145. McGrath, Brian. 2009. « Inhabiting the Forest of Symbols ». In *The Diagrams of Architecture*, édité par Mark Garcia, 152-61. John Wiley & Sons Ltd.
 146. Meier, Alexis. 2019. *Peter Eisenman. Machine critique de l'architecture*. Gallion: Infolio Editions.
 147. Menges, Achim. 2012. *Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design Architectural Design*. John Wiley & Sons.
 148. ———. 2015. « The New Cyber-Physical Making in Architecture: Computational Construction ». *Architectural Design* 85 (5): 28-33. <https://doi.org/10.1002/ad.1950>.
 149. Menges, Achim, et Jan Knippers. 2018. « Fibrous Tectonics ». In *Towards a Robotic Architecture*, 64-75. Novato, CA: Applied Research and Design Publishing.
 150. Migayrou, Frédérique. 2003. *Architectures non standard*. Editions du Centre Pompidou.
 151. Miller, Harvey, et Michael F. Goodchild. 2015. « Data-driven geography ». *GeoJournal*, 449-61. <https://doi.org/10.1007/s10708-014-9602-6>.
 152. Minard, Joseph. s. d. *La statistique*. Bibliothèque numérique patrimoniale des ponts et chaussées. Consulté le 21 juin 2018. https://patrimoine.enpc.fr/document/ENPC01_8_3474_C171.
 153. Mitchell, Melanie. 1996. *An introduction to genetic algorithms*. Complex adaptive systems. Cambridge, Mass: MIT Press.
 154. Mitchell, William J. 1977. *Computer-aided architectural design*. New York: Petrocelli/Charter.
 155. ———. 1979. *Computer-aided architectural design*. New York: Van Nostrand Reinhold.
 156. Monchaux, Nicholas De. 2016. « The Map and the Territory ». In *Local code*, 155-77. Princeton Architectural Press.
 157. Monier, Vincent, Gilles Duchanois, et Jean-Claude Bignon. 2012. « Génération de structures non-standards au moyen d'éléments natifs irréguliers en bois. Elaboration d'un outil numérique de conception architecturale ». In *SCAN 2012 : Séminaire de Conception Architecturale Numérique*. Paris, France. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01052704>.
 158. Morel, Philippe. 2020. « Deep learning, arbres et réseaux neuronaux ». In *Neurones, les intelligences simulées: mutations, créations*, édité par Frédéric Migayrou.
 159. Mostafavi, Mohsen, et Gareth Doherty. 2015. *Ecological Urbanism*. 4th Revised edition. Lars Muller Publishers.
 160. Moussavi, Farshid, et Michael Kubo. 2006. *The Function of Ornament*. Actar.
 161. Munz, O. J. 1951. Photo-glyph recording. US 2 775 768, issued 25 mai 1951.
 162. MVRDV. 1999. *Metacity Datatown*. 010 PUBLISHERS.
 163. Naboni, Roberto, et Ingrid Paoletti. 2014. *Advanced Customization in Architectural Design and Construction*. 2015° éd. Springer.
 164. Negroponte, Nicholas. 1975. *Soft architecture machines*. Cambridge, Mass: The MIT Press.

165. Nes, Akkelies, et Claudia Yamu. 2018. « Space Syntax: a method to measure urban space related to social, economic and cognitive factors ». In *The Virtual and the Real in Planning and Urban Design: Perspectives, Practices and Applications*, édité par Claudia Yamu, Alenka Poplin, Oswald Devisch, et Gert de Roo, 1^{re} éd., 136-50. Routledge, Francis and Taylor.
166. Neurath, Otto, Damien Suboticki, Matthew Eve, et Christopher Burke. 2018. *Des hiéroglyphiques à l'Isotype: une autobiographie visuelle*.
167. Nicholas, Paul. 2018. « Fabricatoin for Differentiation ». In *Towards a Robotic Architecture*, 77-87. Novato, CA: Applied Research and Design Publishing.
168. OCDE. 2003. *Manuel de Frascati 2002*. La mesure des activités scientifiques et technologiques. Éditions OCDE. <https://doi.org/10.1787/9789264299047-fr>.
169. OECD / Eurostat. 2005. « Manuel d'Oslo ». <http://dx.doi.org/10.1787/9789264013124-fr>.
170. Oosterhuis, Kas. 2015. Muscle NSA Entretien réalisé par Greg Lynn. Publication électronique. Centre Canadien de l'Architecture. <https://books.apple.com/fr/book/kas-oosterhuis-nsa-muscle/id930110184>.
171. Oxman, Rivka. 2006. « Theory and design in the first digital age ». *Design Studies* 27 (3): 229-65. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.002>.
172. ———, éd. 2014. « Informed tectonics in material-based design ». In *Theories of the Digital in Architecture*, 1^{re} éd., 227-49. London ; New York: Routledge, Taylor & Francis Group.
173. Paquenseguy, Françoise. 2016. « A qui profite le chiffre? Les portails métropolitains open data ». In *Datalogie*, édité par Olaf Avenati et Pierre-Antoine Chardel, 126-35. Loco.
174. Paquot, Thierry. 2010. « Le jeu de cartes des situationnistes ». *CFC*, n° 204 (juin): page 51-55.
175. Park, Hyoung-June. 2008. « Parametric Variations of Palladio's Villa Rotonda ». *International Journal of Architectural Computing* 6-n° 2: 145-69.
176. Payne, Andrew, et Panagiotis Michalatos, éd. 2016. « Monolith. Continuity and differentiation within volumetric models ». In *Mixed matters: a multi-material design compendium*, 30-39. Berlin: Jovis.
177. Picon, Antoine. 1997. « Buckminster Fuller. Une utopie américaine ». *Les Cahiers de la recherche architecturale et urbaine*.
178. ———. 2013a. *Ornament: The Politics of Architecture and Subjectivity - AD Primer (Architectural Design Primer)*. John Wiley & Sons.
179. ———. 2013b. *Smart Cities : Théorie et critique d'un idéal auto-réalisateur*. Editions B2.
180. ———. 2015. *Smart Cities: A Spatialised Intelligence*. Wiley.
181. ———. 2017. *L'ornement architectural: entre subjectivité et politique*.
182. ———. 2018. *La matérialité de l'architecture*. Marseille: Parenthèses.
183. Poinet, Paul. 2020. « Enhancing Collaborative Practices in Architecture, Engineering and Construction through Multi-Scalar Modelling Methodologies ». PhD Thesis. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25478.73280>.
184. Poinet, Paul, Martin Tamke, Mette Thomsen, Fabian Scheurer, et Al Fisher. 2018. « Schema-Based Workflows and Inter-Scalar Search Interfaces for Building Design ». In .
185. Ponte, Alessandra. 2019. « Mapping in the age of electronic shadows ». In *Instabilities and Potentialities: Notes on the Nature of Knowledge in Digital Architecture*, édité par Schandler Ahrens et Aaron Sprecher, 150-62. Routledge.
186. Queysanne, Bruno. 2002. *Alberti et Raphaël - Descriptio urbis Romae ou comment faire le portrait de Rome*. Paris: Ed. de la Villette.

187. Ratti, Carlo, et Matthew Claudel. 2016. *The city of tomorrow : Sensors, networks, hackers, and the future of urban life*. Yale University Press. The Future Series.
188. Reades, Jonathan, Jonathan Reades, Francesco Calabrese, Andres Sevtsuk, et Carlo Ratti. 2007. « Cellular Census: Explorations in Urban Data Collection ». *IEEE Pervasive computing* Vol. 6 (3): pages 30-38.
189. Rifkin, Jeremy. 2012. *La troisième révolution industrielle*. Les liens qui libèrent éditions.
190. Ruiz-Geli, Enric. 2015. Villa nurbs Entretien réalisé par Greg Lynn. Publication électronique. Centre Canadien de l'Architecture. <https://books.apple.com/fr/book/kas-oosterhuis-nsa-muscle/id930110184>.
191. Sadin, Eric. 2015. *La vie algorithmique : Critique de la raison numérique*. L'ECHAPPEE EDITIONS.
192. Saunders, Andrew, et Gregory Epps. 2016. « Robotic Lattice Smock ». In *Robotic fabrication in architecture, art and design 2016*, édité par Dagmar Reinhardt, Rob Saunders, et Jane Burry. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26378-6_6.
193. Schulz, Daniel, Felix Reiter, Alexander Metche, et Liss C Werner. 2018. « Data flow, a GIS based interactive planning tool for educational facilities ». In *Computing for a better tomorrow*, édité par A Kepczynska-Walczak et S Bialkowski, 1:497-506. Lodz, Poland.
194. Schumacher, Patrick. 2009. « Parametricism - A New Global Style for Architecture and Urban Design ». Édité par Neil Leach et Helen Castle. *AD Architectural Design* Vol 79, Issue 4 : Digital Cities (août).
195. Self, Martin, et Emmanuel Vercruyse. 2017. « Infinite Variatations, Radical Strategies ». In , édité par Achim Menges, Bob Sheil, Ruairi Glynn, et Marilena Skavara, 30-35. London: UCL Press.
196. Sevtsuk, Andres, et Raul Kalvo. 2016. « Urban Network Analysis toolbox for Rhinoceros3D », *Planning and Technology Today*, , n° 112: 4-5.
197. Simondon, Gilbert. 2005a. *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*. Krisis. Grenoble: Millon.
198. ———. 2005b. *L'invention dans les techniques: cours et conférences*. Édité par Jean-Yves Chateau. Traces écrites. Paris: Seuil.
199. ———. 2012. *Du mode d'existence des objets techniques*. Édité par Nathalie Simondon. Nouv. éd. rev. et Corr. Philosophie. Paris: Aubier.
200. ———. 2014. *Sur la technique (1953-1983)*. 1re édition. Paris: Presses universitaires de France.
201. Stiny, G, et W J Mitchell. 1978. « The Palladian Grammar ». *Environment and Planning B: Planning and Design* 5 (1): 5-18. <https://doi.org/10.1068/b050005>.
202. Stiny, George. 2006. *Shape: Talking about Seeing and Doing*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
203. Tang, Ming, et Jonathon Anderson. 2011. « Information Urbanism: Parametric urbanism in junction with GIS data processing & fabrication ». In .
204. The American Society for Material and Testing. 2009. « Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies ». ASTM International.
205. Thomsen, Mette Ramsgaard. 2016. « Complex Modelling - Questioning the infrastructures of information modelling ». In , édité par Aulikki Herneoja, Toni Österlund, et Piia Markkanen, Volume 1, Complexity & Simplicity:33-42. University of Oulu.
206. Townsend, Alastair. 2014. « On the Spline: A Brief History of the Computational Curve ». *International journal of interior architecture + spatial design* Issue 3.
207. Triclot, Mathieu. 2008. *Le moment cybernétique : La constitution de la notion d'information*. Editions Champ Vallon.

208. Tufte, Edward R. 2001. *The Visual Display of Quantitative Information*. 2nd edition. Graphics Press.
209. Turing, A. M. 1950. « Computing Machinery and Intelligence ». *Mind* LIX (236): 433-60. <https://doi.org/10.1093/mind/LIX.236.433>.
210. Turner, Fred. 2013. *Aux sources de l'utopie numérique : De la contre culture à la cyberculture*. C&F Editions.
211. Valentyna, Dymytrova, et Françoise Paquienséguy. 2017. « La réutilisation et les réutilisateurs des données ouvertes en France: une approche centrée sur les usagers ». *Revue Internationale des Gouvernements Ouverts* 5 (0).
212. Varenne, Franck, et Marc Silberstein. 2013. *Modéliser & simuler : Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation Tome 1 Volume 1*. Editions Matériologiques.
213. Vollaire, Louis. 1997. « Le design d'information ». *Communication et langages* n°112: pp-35-50. <https://doi.org/10.3406/colan.1997.2761>.
214. Wachter, Serge. 2010. *La ville interactive : L'architecture et l'urbanisme au risque du numérique et de l'écologie*. L'Harmattan.
215. Waters, Nigel. 2017. « GIS : History ». In *The International Encyclopedia of Geography*, édité par Douglas Richardson, Noel Castree, Michael F. Goodchild, Audrey Kobayashi, Liu Weidong, et Richard A. Marston. John Wiley & Sons.
216. Weibel, Weilbel. 2018. « Ramon Llull : Poet and pioneer of digital philosophy ». In *Dialogos - Ramon Llull's Method of thought and artistic practice*, édité par Amador Vega, Peter Weibel, et Siegfried Zielinski, 95-127. ZKM.
217. White, T. 2017. « Symbolization and the Visual Variables ». In *The Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge*. John P. Wilson.
218. Wiener, Norbert. 2014. *La Cybernétique. Information et régulation dans le vivant et la machine*. Le Seuil.
219. Willème, François. 1864. Photographing sculpture. 43822, issued aout 1864. <https://patents.google.com/patent/US43822A/en?q=US43822>.
220. Wit, Andrew John. 2017. « L'animal machinique : les réseaux autonomes et la computation comportementale ». In *Quand le Numérique Marque-t-il l'Architecture ?*, édité par Andrew Goodhouse, 215-78. Centre Canadien d'Architecture, Sternberg Press.
221. ———. 2018. « Bridging Mountains. Joris Laarman ». In *Towards a Robotic Architecture*, 178-89. Novato, CA: Applied Research and Design Publishing.
222. Witt, Andrew, et Eliza Pertigkiozoglou. 2019. *Computation as design : Ron Resch and the New Media of Geometry*. Publication électronique.
223. Wurman, Richard Saul. 1976. *Cities : Comparisons of form and scale*. The MIT Press.
224. Yoh, Shoei. 2015. Sports complex, galaxy toyama, Odawara gymnasium Entretien réalisé par Greg Lynn et Fabrizio Gallanti. Publication électronique. Centre Candadien de l'Architecture. <https://books.apple.com/fr/book/sports-complex-galaxy-toyama-odawara-gymnasium/id878258650>.
225. Zardini, M., H. Russell, G. Borasi, et A. Bobbette. 2007. *Désolé plus d'essence : l'innovation architecturale en réponse à la crise pétrolière de 1973*. Centre Canadien d'Architecture.
- 226.

