

Pratiques numériques émergentes en conception architecturale dans les bureaux de petite taille

Perceptions et usages de la modélisation paramétrique

Adeline Stals

Dissertation présentée en vue de l'obtention du titre de
Docteur en Art de bâtir et Urbanisme de l'Université de Liège



2019

Ce document présente les résultats originaux d'une recherche de thèse menée par :

Adeline STALS

Aspirante F.R.S.-FNRS
Architecte
Faculté d'Architecture
Université de Liège

Boulevard de la Constitution, 41
4020 Liège – Belgique
Adeline.stals@uliege.be

Composition du jury pour la soutenance de la thèse :

Promotrices	Sylvie JANCART – Chargée de cours, directrice du LNA – Faculté d'Architecture, ULiège ; Catherine ELSEN – Chargée de cours, chercheuse au LUCID – Faculté des Sciences Appliquées, ULiège
Président de jury	Pierre LECLERCQ – Professeur, directeur du LUCID – Faculté des Sciences Appliquées, ULiège
Membres du jury	Auréli DE BOISSIEU – Responsable BIM chez Grimshaw London, chercheuse associée au MAACC – ENSArchitecture Paris La Villette ; Mohammed-Anis GALLAS – Chargé de cours – Faculté d'Architecture et d'Urbanisme, UMons ; Gilles HALIN – Maître de conférences, HDR, directeur du CRAI – Université de Lorraine ; Philippe MOREL – Fondateur EZCT Architecture & Design Research, professeur associé - ENSArchitecture Paris- Malaquais.

Cette recherche a été financée par :

Fonds de la Recherche Scientifique – FNRS
Rue d'Egmont, 5
1000 Bruxelles – Belgique

Citation :

Stals, A. (2019). Pratiques numériques émergentes en conception architecturale dans les bureaux de petite taille – Perceptions et usages de la modélisation paramétrique. Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique, pp. XXX.

ABSTRACT

Cette thèse examine les usages et pratiques émergentes des outils de modélisation paramétrique dans le cas spécifique des bureaux d'architecture de petite taille. Elle cerne les stratégies et adaptations cognitives et organisationnelles déployées pour l'intégration de ces outils au sein des processus de conception architecturale observés.

De nombreuses recherches démontrent en effet à quel point le processus de conception architecturale et les productions qui en résultent sont influencés par les outils manipulés par les concepteurs et notamment les outils de modélisation paramétrique. Les grands bureaux, grâce à leurs diverses ressources, ont pu s'adapter et repousser les limites de leurs projets architecturaux. Peu d'études se concentrent par contre sur les stratégies et pratiques mises en place par les bureaux de petite taille, représentant pourtant la plus grande part du marché européen (99% des bureaux européens sont de moins de 10 personnes selon Architects' Council of Europe, 2019).

S'inscrivant dans ce contexte peu étudié, notre recherche puise ses données quantitatives et qualitatives dans diverses sources : une enquête ayant récolté près de 700 réponses ; des entretiens téléphoniques et des questionnaires et entretiens organisés au fil de journées de formation. Pour compléter l'examen des tendances observées, des entretiens rétrospectifs et des observations in situ ont été menés auprès d'architectes-experts de la modélisation paramétrique.

Les résultats établissent empiriquement l'état de l'art des pratiques numériques des architectes belges et s'intéressent plus particulièrement à l'état des connaissances paramétriques. Ils pointent ainsi les difficultés rencontrées par les novices pour l'implémentation de ces outils. Les résultats identifient ensuite la diversité des pratiques ainsi que les enjeux cognitifs et organisationnels liés à l'utilisation des outils de modélisation paramétrique dans les PME.

Finalement, la thèse discute les valeurs ajoutées de ses propositions théoriques et méthodologiques en positionnant tout d'abord les outils de modélisation paramétrique en regard de la théorie de la socio-matérialité. Elle met ensuite en évidence un changement majeur s'opérant dans l'approche cognitive du projet (par le processus et non plus exclusivement par l'objet), suggérant un usage itératif de l'outil oscillant entre support d'assistance à la conception et support d'assistance à la représentation. La thèse démontre enfin en quoi cette typologie d'outils constitue aujourd'hui un potentiel d'innovation et de différenciation pour les bureaux d'architecture de petite taille.

Mots clés : conception architecturale, modélisation paramétrique, adaptation cognitive, changement organisationnel, PME, pratiques émergentes

ABSTRACT

This thesis examines the use and emerging practices of parametric modeling tools in the specific case of small architectural offices. It identifies the cognitive and organizational strategies and adaptations deployed for the integration of these tools into the architectural design processes.

Indeed, numerous studies show to what extent the tools manipulated by designers, particularly parametric modelling tools, influence the architectural design process and the resulting productions. Large offices, thanks to their resources, have been able to adapt and push the limits of their architectural projects. However, few studies focus on the strategies and practices implemented by offices of smaller sizes, which nevertheless represent the largest part of the European market (99% of European offices are constituted of less than 10 people according to Architects' Council of Europe, 2019).

In this underexplored context, our research is based on quantitative and qualitative data from various sources: a survey that collected nearly 700 respondents; interviews by telephone; and surveys and discussions organized over a series of training days. To complete the examination of the observed trends, retrospective interviews and in situ observations were conducted with expert architects of parametric modelling.

The results empirically establish the state of the art of digital practices of Belgian architects and focus more particularly on the state of parametric knowledge. They thus point out the difficulties encountered by novices in implementing these tools. The results then identify the diversity of practices as well as the cognitive and organizational challenges related to the use of parametric modeling tools in SMEs.

Finally, the thesis discusses the added values of its theoretical and methodological proposals by first positioning parametric modelling tools in relation to the theory of socio-materiality. It then highlights a major change in the cognitive approach to the project (by the process and no longer exclusively by the object), making it possible to suggest an iterative use of the tool oscillating between design and representation support. The thesis finally demonstrates how this typology of tools nowadays constitutes a potential of innovation and differentiation for small architectural offices.

Keywords: architectural design, parametric modeling, cognitive adaptation, organizational change, SME, emerging practices

REMERCIEMENTS

L'aboutissement de cette thèse est le fruit d'un travail collectif que je dois à de nombreuses personnes car au-delà de l'ouvrage, la thèse est un parcours humain. Je tiens tout particulièrement à remercier :

Sylvie Jancart et Catherine Elsen, promotrices de cette thèse sans qui cette recherche n'aurait à la fois probablement pas commencé et n'aurait pu aboutir. Je les remercie toutes les deux pour leur encadrement attentif à la fois sur le plan scientifique, en m'inculquant les principes d'une méthodologie rigoureuse, et sur le plan personnel, en encourageant par ailleurs mon épanouissement. Elles ont formé un duo remarquable rempli de bienveillance, faisant preuve d'un appui inconditionnel dans toutes les épreuves (et c'est dire si il y en a eu !). J'ai apprécié apprendre et grandir à vos côtés ;

Mon comité d'accompagnement de doctorat, Aurélie de Boissieu, Anis Gallas et Marie Roosen, qui ont pu m'éclairer et me guider durant ce parcours de thèse ;

Pierre Leclercq, qui me fait l'honneur de présider le jury de la défense de thèse ;

Les membres de mon jury de thèse : Aurélie de Boissieu, Anis Gallas, Gilles Halin et Philippe Morel que je remercie pour l'expertise qu'ils apportent à la thèse et le temps qu'ils m'ont consacré, pour certains, depuis longtemps, en me conseillant et m'encourageant dans ma démarche post-doctorale notamment ;

Tous les architectes qui ont pris le temps de répondre à mes questions et notamment Antoine Maes qui s'est plié au jeu de la recherche, sortant de sa zone de confort pour finalement, je pense, y trouver un peu de plaisir ;

Olivier Lisein, pour son aide et ses conseils ;

Valérie Danthine, sans qui mes connaissances littéraires auraient été moins fructueuses ;

Toute l'équipe du LNA qui grandit petit à petit et dont je suis fière d'être l'une des pionnières ;

Guillaume, pour avoir ouvert la voie du doctorat dans notre Faculté et m'avoir transmis son savoir et sa passion pour la recherche ;

Gwendoline, pour son écoute et sa bonne humeur quotidienne ;

Thomas, pour avoir compris rapidement le remède absolu à mes baisses de motivation, la tarte ;

De façon plus personnelle, je souhaite remercier ma famille et mes amis proches, pour leur patience et leur soutien permanent dans cette aventure psychologique qu'est la thèse, et tout particulièrement ma maman, pour son dévouement hors du commun pendant et au-delà du doctorat ;

Jeremy, pour avoir été le pilier infaillible de ce parcours. Merci de m'avoir aidée et supportée en toutes circonstances.

TABLE DES MATIÈRES

PREAMBULE	15
CHAPITRE 1. INTRODUCTION.....	17
1. Contexte et problématique de la recherche	18
2. Proposition d'un cadre et réduction du champ de recherche	21
3. Plan de la thèse	26
CHAPITRE 2. ETAT DE L'ART	29
1. Processus de conception	30
1.1. Principales communautés de recherche s'intéressant au processus de conception	30
1.2. Spécificités du processus de conception en architecture	39
1.3. Spécificités du processus de conception en architecture numérique	47
1.4. Outils en architecture	53
1.4.1. Rôle des médias	54
1.4.2. Typologie d'outils de soutien à la conception	55
1.5. Représentations externes en architecture	65
1.5.1. La conception vue comme une construction de représentations	66
1.5.2. Distinction des types de représentations	67
1.5.3. Impact des outils numériques sur les représentations en architecture	72
2. Développement des outils de modélisation paramétrique	76
2.1. Historique du développement du paramétrique en architecture	76
2.2. Confusion des termes	78
2.3. Fonctionnement des modeleurs paramétriques du point de vue informatique	83
2.4. Caractérisation du paramétrique à partir des discours existants	90
2.4.1. Contexte d'étude du paramétrique	91
2.4.2. Démarche conceptuelle et cognition	99
2.4.3. Recherche morphologique	105
2.4.4. Compétences	107

2.4.5. Flux de travail	110
3. Théorie des organisations	113
3.1. Lien entre technologie et organisation	113
3.2. Structure organisationnelle des bureaux	115
3.3. Change management	120
4. Schéma récapitulatif	126
CHAPITRE 3. MÉTHODOLOGIE	129
1. Questions de recherche	130
2. Paradigme scientifique	132
3. Articulation et retranscription des corpus analysés	136
3.1. Articulation des corpus analysés	136
3.2. Retranscription	138
4. Les questionnaires	141
4.1. Méthode générale	141
4.2. Méthode appliquée : le questionnaire en ligne	143
4.3. Méthodologie appliquée aux formations continues BIM	146
5. Les entretiens	152
5.1. Méthode générale	152
5.2. Méthode appliquée : les entretiens téléphoniques	155
5.3. Méthode appliquée : les entretiens rétrospectifs	159
6. Les observations <i>in situ</i>	162
6.1. Méthode générale	162
6.2. Application à nos cas d'étude	165
6.2.1. Grille d'observation	168
6.2.2. Séquençage	172
CHAPITRE 4. RÉSULTATS	175
1. Etat des pratiques numériques et paramétriques en Belgique	176
1.1. Echantillon du questionnaire en ligne	176

1.2.	Usage des outils numériques en Belgique	179
1.3.	Intérêt et compréhension des outils paramétriques	187
1.4.	Le numérique, entre défis pratiques et a priori	194
2.	Perceptions a priori et facteurs d'influence de la modélisation paramétrique.....	196
2.1.	Recueil des perceptions a priori via des entretiens téléphoniques	196
2.2.	Identification des facteurs influençant l'utilisation de la modélisation paramétrique	205
3.	Appréhension de la modélisation paramétrique au terme d'une journée de formation.....	217
4.	Diversité des pratiques paramétriques	227
4.1.	Description des contextes professionnels sollicités	229
4.1.1.	<i>Bureau SUBSTRA</i>	231
4.1.2.	<i>Bureau LASSA</i>	236
4.1.3.	<i>Bureau Bolutions</i>	243
4.1.4.	<i>Atelier AADD</i>	246
4.1.5.	<i>Bureau A2M</i>	249
4.2.	La représentation au cœur d'un remaniement de la pratique architecturale	265
4.2.1.	<i>Méthodologie de structuration du passage entre représentation mentale et représentation externe</i>	266
4.2.2.	<i>Représentation technique du projet</i>	268
4.2.3.	<i>Type de représentation</i>	269
4.2.4.	<i>Représentation vs conception</i>	270
4.3.	Une recherche formelle par le processus plutôt que l'outil	272
CHAPITRE 5. DISCUSSION		277
1.	Préambule à la discussion.....	278
2.	Les outils de modélisation paramétrique vus par la théorie de la socio-matérialité.....	282
3.	Une approche par le processus.....	284

4. Itération entre outil d'assistance à la conception et outil d'assistance à la représentation	289
5. Vers une recherche formelle libérée.....	295
6. La maîtrise du processus comme facteur différenciant.....	300
7. Le métier d'architecte à l'aube d'un remaniement par l'expertise.....	303
7.1. La culture numérique comme vecteur de dépassement	304
7.2. Diversité des situations observées pour un panorama des pratiques paramétriques en architecture	305
7.2.1. <i>Les experts de la conception hors du champ de l'usage du paramétrique</i>	307
7.2.2. <i>Les novices dans la pratique paramétrique</i>	308
7.2.3. <i>Un système de contraintes au-delà des postures</i>	309
7.2.4. <i>Au-delà des compétences, la place dans le processus : le cas des dessinateurs</i>	313
7.2.5. <i>La montée en compétences jusqu'à l'architecte expert</i>	314
7.3. Vers une généricité de l'architecture ?	316
CHAPITRE 6. CONCLUSIONS.....	319
1. Pratiques numériques émergentes en conception architecturale dans les bureaux d'architecture de petite taille	320
2. Limites de la recherche.....	324
3. Perspectives de recherche.....	327
TABLE DES FIGURES ET DES TABLES.....	331
BIBLIOGRAPHIE.....	335
ANNEXES	348

PREAMBULE

Mon profil d'architecte s'est complété en 2013 d'un séjour Erasmus d'un an à l'ENSA de Marseille (France), cursus au sein duquel j'ai pu développer de nouvelles compétences, notamment dans le domaine des technologies numériques au service de la conception architecturale. Cette expérience à l'étranger a éveillé en moi un intérêt pour la culture numérique et la nécessité de l'étendre davantage. L'engouement pour ce domaine en pleine expansion s'est poursuivi tout au long de ma dernière année d'architecture à l'Université de Liège. C'est finalement avec le soutien de Sylvie Jancart et de Catherine Elsen, et soutenue financièrement par le Fonds de la Recherche Scientifique (FNRS), que j'ai entamé mes travaux de recherche doctorale.

Ma volonté de dédier cette recherche aux PME vient essentiellement de mon attachement pour les bureaux de petite taille qui font face à de nombreux changements et dont les appréhensions vis-à-vis de la transformation digitale sont multiples. Cet aspect personnel est surtout renforcé par un constat important : 99% des bureaux européens sont composés de moins de 10 personnes et 71% d'entre eux, d'une seule personne (Architects' Council of Europe, 2019). Ils conçoivent pourtant les environnements bâtis qui nous entourent et qui donnent naissance aux spatialités dans lesquelles nous évoluons. En cela, le travail de ces architectes est remarquable et essentiel pour construire le monde de demain.

Il aurait été plus confortable, durant ces quatre années, de renoncer à questionner un terrain inhabituel, et de se laisser porter par l'attrait de cas d'étude plus démonstratifs, de se reposer sur les modèles de conception déjà établis sans les reconsidérer. Le résultat proposé aurait pu paraître convaincant mais cette attitude aurait cependant, une nouvelle fois, nié l'état des pratiques réellement implantées sur notre territoire.

Mon expérience professionnelle en bureau a par ailleurs confirmé qu'il est temps de prendre à bras le corps un enjeu sociétal auquel le monde de

l'architecture fait face, communément nommé la transformation digitale. En effet, de nombreuses disciplines ont pris le pli du numérique, franchissant le pas il y a quelques dizaines d'années déjà.

La fracture numérique se creuse et l'impact des technologies numériques sur l'architecture ne se limite plus aujourd'hui à la généralisation de l'ordinateur dans les bureaux d'architecture. Il s'agit d'une mutation de beaucoup plus grande ampleur qui peut s'assimiler à un changement culturel profond (Picon & Razavi, 2011), voire paradigmatique. C'est l'organisation du travail et l'évolution du métier qui sont en jeu.

Deux attitudes franches, ayant un impact sociétal considérable, découlent du développement de ces outils numériques et nourrissent notre questionnement : dans un sens, les morphologies ont tendance à se simplifier, se multiplier au gré des « copiés-collés » jusqu'à se ressembler avec notamment l'apparition de ce qui est ordinairement reconnu comme de l'habitat *clef-sur-porte*; dans l'autre sens, certains architectes tirent parti du numérique pour s'affranchir des codes esthétiques traditionnels et proposer des morphologies innovantes, voire extravagantes. N'y a-t-il pas, dans cette divergence, une distance entre les technologies disponibles et les pratiques qui mériterait d'être étudiée?

Pour aider les PME à faire face à ces défis, je tente d'identifier au travers de cette recherche les enjeux auxquels les petits bureaux d'architecture risquent de se confronter lorsqu'ils intègrent de nouvelles technologies dans leurs pratiques et, en particulier, les outils de modélisation paramétrique.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est de préciser au lecteur les balises contextuelles et ainsi de cadrer le *pourquoi* de la thèse. Nous établissons de cette manière les bases pour questionner et cerner les enjeux des pratiques paramétriques émergentes dans les bureaux d'architecture de petite taille. Ce chapitre tient tout d'abord à présenter le contexte global de la recherche en explicitant les enjeux sociétaux découlant du développement des technologies numériques en architecture. Nous identifions ensuite le cadre de la recherche afin d'étudier un terrain appréhendable. Nous parcourons enfin, au travers du plan de la thèse, le parcours mis en œuvre pour répondre à la problématique soulevée.

1. Contexte et problématique de la recherche

Nous assistons depuis plus d'une quarantaine d'années à la transformation des pratiques en conception architecturale, en raison du développement et de la démocratisation de l'informatique et de son intégration dans les sphères professionnelles et privées. Les architectes sont confrontés à des changements numériques majeurs, allant du Dessin Assisté par Ordinateur (DAO), à la Conception Assistée par Ordinateur (CAO), puis à la modélisation paramétrique, à la conception générative, aux pratiques BIM et autres technologies de pointe. Toutefois, l'adoption de ces technologies reste un défi pour la profession en raison des modifications qu'elles occasionnent, qui touchent à la fois la pratique architecturale, le rapport au contexte ou encore les rôles des architectes et des professionnels qui y sont associés (Deutsch, 2019).

Si nous considérons l'étude qu'a menée l'historien Mario Carpo sur l'évolution de la différence entre représentation et conception, notamment au travers de son livre « *Architecture in the Age of Printing* » (2001), l'apparition de l'ordinateur dans la pratique de l'architecte représente, à bien des égards, un bouleversement majeur, presque une révolution tant il transforme non seulement la représentation mais aussi la conception voire la fabrication de l'architecture.

Carpo toujours, dans son ouvrage « *The Digital Turn in Architecture 1992-2012* » (2013), compile par ailleurs certains écrits de référence portant sur l'évolution du numérique en architecture, notamment les écrits d'Eisenman (1992), Lynn (1993, 2000), ou encore Schumaker (2009). Analysant ces écrits, l'auteur les reconnaît comme avant-gardistes, en décalage avec les pratiques réellement observées chez la plupart des architectes. Dans l'introduction de l'ouvrage qui lui succède, « *The second digital turn – Design beyond intelligence* », Carpo précise d'ailleurs que « les architectes ont tendance à tarder à s'adapter aux changements technologiques » (2017, p.1, traduction personnelle), observant que cette forme d'inertie est déjà à l'œuvre à l'époque vitruvienne.

Antoine Picon (2010), quant à lui, se penche sur l'impact du numérique et qualifie ainsi de « disruptions » certains changements entraînés par les technologies numériques en architecture. Il observe notamment une divergence entre la cohérence forme-structure, recherchée auparavant via des

processus expérimentaux d'auto-façonnage, et les premières utilisations du numérique favorisant davantage le développement de la forme au détriment de la logique structurelle. Le développement de l'outil informatique entraîne également selon l'auteur une dissociation entre forme et tectonique (Picon, 2010). L'évolution simultanée des outils de fabrication numérique ouvre en effet la porte à l'émergence de nouveaux matériaux de construction, à la préfabrication personnalisée, rendant parfois confuse la distinction entre structures, peaux et matériaux, éléments primaires et secondaires du bâti (Couwenbergh, 2015). De plus, lorsque le concepteur dessine des formes sur l'écran, il éprouve parfois des difficultés à les mettre en rapport avec les implications matérielles et structurelles que celles-ci auront sur la construction concrète de l'édifice projeté. Les nouveaux processus numériques entraînent par ailleurs d'autres formes de complexités, du point de vue de la communication et du transfert du projet vers le réel (Bagneris, 2009). Ce « défaut de communication » génère des incompréhensions à l'interface des savoirs et des difficultés de synergie entre les multiples disciplines nécessaires pour aboutir à la réalisation d'un projet architectural.

En Europe, et plus précisément en Belgique, l'ampleur et la diversité de ces impacts sont tels que les architectes se sentent souvent mal informés, voire désarçonnés. La pertinence de se pencher sur le terrain spécifique des bureaux d'architecture de petite taille, représentatif et pourtant largement négligé, n'est plus à démontrer. Picon ouvrait déjà à cet égard, il y a près de dix ans, des pistes de réflexion laissées jusqu'ici inexplorées:

« Qu'en est-il, par exemple, des conséquences quotidiennes des outils numériques dans les petites et moyennes agences, là où ils semblent relever moins d'un champ de création que d'un puissant levier de normalisation d'une profession déjà fragile ? » (entretien avec Chabard, 2012, p.3)

Il y a bien lieu de s'interroger lorsqu'une technologie est perçue comme difficilement accessible, voire inadaptée, tant le clivage numérique qui en découle peut avoir des conséquences irrémédiables sur le tissu économique concerné. Assiste-t-on à un phénomène de paupérisation de certains architectes ? Faut-il réinterroger les modèles économiques ? Comment aider les architectes, et particulièrement ceux actifs dans les structures les plus fragiles, à passer le cap et rester compétitifs ? Ces questions sont d'autant plus pertinentes lorsque l'on tient compte des conjonctures actuelles. La diversité et la vitesse de développement sans précédent des technologies (réalité virtuelle,

intelligence artificielle, fabrication digitale, automatisation, robotique,...) laissent peu de temps et de moyens aux architectes pour s'adapter. Dans cette thèse, nous envisageons ces questions au travers d'un cas concret : les architectes belges, qui plus est travaillant dans des bureaux de petite taille, qui s'inscrivent dans la mouvance de la modélisation paramétrique et qui font face à cette vague technologique. Quelles sont les ressources à leur disposition ? Leurs cultures et pratiques numériques, la taille et l'organisation de leurs bureaux, leurs capacités d'adaptation, leurs stratégies, leurs différents niveaux d'expertise influencent-ils leur capacité à acquérir et s'approprier une technologie ?

La compréhension des perceptions et des phénomènes influençant l'acceptabilité puis l'intégration des technologies est essentielle, et fait pourtant l'objet de peu d'attentions. Les recherches actuelles abordant la transition numérique sont principalement centrées sur le développement d'outils et non pas sur la compréhension des phénomènes d'adoption et des appréhensions qui sont formulées. La co-existence des deux visées scientifiques est pourtant essentielle si on veut éviter le développement de technologies trop éloignées des besoins du terrain, peu appropriées et par là peu pérennes. Par ailleurs, les changements numériques en architecture ont été étudiés parfois sans porter une attention particulière aux conséquences éventuelles de l'échantillon sélectionné, et sans le remettre en question.

De nombreuses recherches sont donc encore à mener pour comprendre la transition numérique et accompagner au mieux les architectes au fil de cette transition. Notre thèse apporte quelques réponses en ce sens, en révélant les enjeux des technologies numériques en regard de la pratique actuelle. Elle cerne les adaptations cognitives et organisationnelles déployées par certains architectes de PME au 21^e siècle dans un pays européen comme la Belgique, permettant ainsi à d'autres architectes d'évoluer plus sereinement dans un paysage similaire, en constante évolution.

2. Proposition d'un cadre et réduction du champ de recherche

Les architectes sont perpétuellement confrontés à des défis liés à la nécessité d'intégrer à leurs conceptions de plus en plus d'informations, et ce dès le début du processus. En réponse à ces défis, de nouveaux outils toujours plus performants ne cessent de leur être proposés, amplifiant une vague technologique qui parfois les stimule, parfois les dépasse, en fonction essentiellement de leur culture numérique et du contexte (socio-économique, structurel, organisationnel) dans lequel ils opèrent au quotidien.

Les outils de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) actuellement sur le marché sont efficaces, parfois même puissants mais ne satisfont pas, ou plus, tous les architectes. Force est de constater qu'une partie des concepteurs, notamment ceux faisant partie de grandes agences aux ressources financières généreuses, a effectivement progressivement délaissé cette génération d'outils pour leur en préférer d'autres. Profitant des moyens à leur disposition, ces concepteurs ont trouvé le moyen de contourner certains niveaux de complexité des logiciels en les adaptant, voire en s'emparant d'une nouvelle typologie d'outils dérivés d'autres secteurs tels que l'aéronautique, l'automobile ou l'aérospatiale. Parmi eux, on retrouve les outils dits de modélisation paramétrique, qui semblent davantage répondre à leurs besoins et à leurs ambitions sociétales.

Les outils de modélisation paramétrique sont également des outils de conception assistée par ordinateur, mais qui permettent aux architectes de concevoir des artefacts à l'aide de paramètres. Ce type de modélisation, basé le plus souvent sur de la programmation visuelle, est une approche complètement différente de la conception telle que proposée jusqu'ici par les outils de CAO qualifiés dans cette thèse de « traditionnels ». Elle offre la possibilité de prendre en considération une multitude de paramètres susceptibles d'influencer la conception, et ainsi d'explorer différentes possibilités morphologiques avec rapidité et flexibilité.

Depuis bientôt une trentaine d'années, les chercheurs étudient les enjeux associés à l'utilisation d'outils de modélisation paramétrique, ainsi que leurs impacts sur le processus de conception. Ces chercheurs font état de l'intérêt croissant de ces outils pour les architectes, compte tenu des nouvelles perspectives qu'ils ouvrent en termes de flux de travail et de diversité des

morphologies. Ces recherches se basent cependant essentiellement sur des pratiques stables, implantées depuis plusieurs années dans de grands bureaux d'architecture de renommée internationale, ou sur des contextes expérimentaux aux conditions contrôlées (pédagogiques par exemple). Ce faisant, une frontière semble demeurer entre les mondes de la recherche et de la pratique, notamment en architecture. Il faut reconnaître qu'à l'heure actuelle, les théories développées ne semblent pas toujours percoler dans la pratique professionnelle de la majeure partie des bureaux d'architecture de petite taille, dont l'utilisation des technologies en général, et du paramétrique en particulier, reste souvent modeste.

La majorité des architectes issus de petites et moyennes entreprises (PMEs), peine en effet toujours à faire face à la rapide transformation digitale (Carpo, 2017), au vu de leurs moyens limités et de la faible attention qui leur est allouée. Les attitudes de ces « architectes du quotidien », auxquels nous nous identifions, évoluent donc lentement, certains d'entre eux étant pourtant tout à fait conscients que l'introduction d'outils numériques puissants dans le processus de conception pourrait permettre plus que la simple représentation et le traitement des informations. Ces architectes, en fonction de leur capacité d'action, sont prêts à explorer comment ces outils pourraient contribuer au développement de morphologies innovantes, mieux adaptées à leurs attentes et à leur créativité (Terzidis, 2004 ; Alessia Riccobono & Pellitteri, 2014). Cependant, l'utilisation de ces outils dans les contextes qui sont les leurs nécessite l'élaboration de stratégies spécifiques.

Si les outils de modélisation paramétrique ont redynamisé la recherche conceptuelle des bureaux d'architecture de grande renommée, qu'en est-il des pratiques numériques des bureaux d'architecture de petite taille, peu étudiés alors qu'ils constituent la plus large proportion d'acteurs impliqués au quotidien dans la pratique professionnelle de la conception architecturale ?

Nous précisons ainsi un cadre appréhendable pour notre projet de recherche et portons notre étude sur l'émergence de pratiques spécifiques en PME, liées à l'utilisation d'outils de modélisation paramétrique à programmation visuelle (tels que Grasshopper©). Interrogeant le terrain à un moment clé de la transition numérique, la thèse articule connaissances fines des pratiques émergentes et résultats méthodologiques qui ont un intérêt plus large pour toute recherche qui questionne les pratiques émergentes à la

lumière de l'apparition de nouvelles technologies, quelles que soient ces pratiques (paramétriques ou non paramétriques; paramétriques stables ou non stables) et quelles que soient ces technologies.

Tandis que certaines approches scientifiques questionnent les enjeux théoriques et paradigmatiques des techniques et technologies, nous nous éloignons volontairement de cette littérature et préférons nous focaliser sur des écrits et apports dont la portée fait davantage écho au quotidien d'architectes inscrits dans de petites agences. C'est pourquoi, les enjeux de culture numérique et de socio-matérialité retiennent davantage notre attention. Ceci justifie pourquoi nous nous attardons plus sur les notions de *représentation* et de *modélisation*, que sur la notion de *modèle*, résultante des deux premières mais ne jouant pas un rôle particulier dans les phénomènes que nous étudions.

Notre proposition est dès lors de construire un projet de recherche original, ancré dans la pratique réelle de la majorité des architectes. Nous fondons les bases théoriques de notre étude sur trois thématiques centrales :

- A. Le processus de conception numérique : nous nous intéressons au contexte numérique en pleine évolution dans lequel est venue s'inscrire la pratique paramétrique en architecture. En cela, il convient d'abord de cerner les pratiques numériques établies actuellement dans les bureaux d'architecture;
- B. L'émergence de la modélisation paramétrique : nous questionnons les opportunités et les enjeux soulevés par les chercheurs dans la littérature et les confrontons aux perceptions des architectes et aux pratiques paramétriques existantes dans les PME belges;
- C. L'impact d'une technologie sur les représentations mentales et les mécanismes organisationnels : nous étudions les pratiques émergentes liées à l'intégration d'une technologie spécifique, et comment ces pratiques émergentes font appel à des besoins organisationnels, des compétences et des moyens humains qui peuvent aller jusqu'à questionner les fondamentaux d'un métier.

Notre recherche a débuté par une première exploration du domaine de la conception architecturale, interrogeant 13.000 architectes belges. Les questionnaires, diffusés par mail et mis à disposition via une plateforme en ligne, ont permis d'identifier les usages actuels des outils ainsi que les contraintes perçues par les répondants (plus de 700 réponses d'architectes professionnels, dont 572 réponses analysées). L'étude révèle la précarité de la communauté en matière de maturité numérique, particulièrement en ce qui concerne la quasi-totalité des petits bureaux d'architecture.

Cette vaste étude poursuit plusieurs autres objectifs :

- Se familiariser avec le contexte architectural dans lequel les pratiques numériques s'insèrent;
- Dresser un panorama des pratiques réelles des architectes belges et de l'utilisation des outils numériques : leurs intérêts, les complexités vécues en regard de la diversité de la conception architecturale;
- Poser un pré-diagnostic des connaissances en matière d'outils de modélisation paramétrique;
- Formuler des hypothèses quant à l'appropriation très modeste du paramétrique et ainsi mettre en place les terrains d'étude pour poursuivre les recherches.

Les constats liés à ce premier terrain d'étude sont esquissés à ce stade du manuscrit car ils ont facilité la réduction du champ de l'étude et ont joué un rôle structurant pour l'ensemble du projet de thèse, soutenant de nombreux choix méthodologiques. Ils justifient en effet empiriquement pourquoi il est nécessaire aujourd'hui de recentrer la recherche sur les pratiques des petits bureaux d'architecture et leurs besoins concrets, situés.

D'une pratique « en plein développement » selon la littérature, nous avons en réalité été confrontés à la rareté du terrain. En effet, les pratiques paramétriques, qui plus est dans des petites structures, sont timides notamment en Belgique. Cette rareté a fait naître la volonté d'identifier les facteurs influençant l'intégration de cette typologie d'outils et d'identifier ainsi un système de contraintes. Nous nous sommes également appuyés sur l'étude des représentations afin de comprendre les récurrences dans les appréhensions exprimées *a priori* par les concepteurs. En partant ensuite de différentes

pratiques actuelles du terrain, nous avons tenté de comprendre les mécanismes d'intégration malgré tout mis en œuvre dans certains bureaux. Pour se faire, nous nous intéressons tout particulièrement à certaines adaptations cognitives (en matière de charge cognitive ou encore de *circumscribed thinking*), et certaines adaptations organisationnelles, telles qu'elles nous sont apparues sur le terrain. La diversité et l'expertise des profils observés font également l'objet d'une discussion.

Nous favorisons donc une approche davantage *bottom-up*, partant des besoins et des demandes réels des utilisateurs révélés par une analyse fine de leurs pratiques. Cette approche située permet d'éviter les aléas d'une approche théorique détachée des pratiques existantes et générant des analyses inadéquates, qui ne répondent pas aux problèmes vécus par les utilisateurs des outils de modélisation paramétrique. Ce n'est qu'en connaissance de ces conditions réelles que nous pourrions correctement outiller les PME, tendant ainsi à initier l'adoption de ces outils tout en répondant à leurs besoins concrets.

3. Plan de la thèse

Le second chapitre de cette thèse consiste à définir notre cadre théorique au travers des connaissances actuelles et à préciser les concepts fondamentaux nécessaires à l'examen de nos résultats. Nous proposons une revue de la littérature découpée en quatre sections :

(1) Le processus de conception, que nous abordons d'abord d'un point de vue général, affiné ensuite en regard des pratiques architecturales et dont nous envisageons finalement les spécificités dans un processus numérique architectural. Nous résumons ensuite le rôle et les typologies principales des outils et représentations utilisés au sein d'un processus de conception en architecture.

(2) Le développement des outils de modélisation paramétrique, que nous contextualisons d'un point de vue historique. Le développement simultané de différentes technologies ayant entraîné des confusions terminologiques, nous précisons la signification des termes centraux dans ce travail. Nous abordons ensuite brièvement le fonctionnement informatique spécifique à cette typologie d'outils, ce qui nous donne les bases nécessaires (compte tenu de notre profil et des besoins de notre communauté) pour retracer et comprendre les principales caractéristiques du paramétrique.

(3) La théorie des organisations nous éclaire ensuite quant aux enjeux de l'intégration d'une nouvelle technologie dans une organisation ayant un vécu et des méthodes de fonctionnement établies. Nous précisons ainsi les liens entre technologie et organisation et abordons la question du *change management*. Ces apports théoriques nous éclairent quant à l'importance du contexte et outillent la description de la structure organisationnelle des bureaux.

(4) Un schéma récapitulatif clôture enfin cet état de l'art et figure l'articulation de ces connaissances. Il met ainsi en évidence les points d'intérêt d'où émergent nos questions de recherche, formulées à sa suite.

Le chapitre trois présente les méthodes sur lesquelles nous nous appuyons pour développer notre recherche : les questionnaires, les entretiens et les observations *in situ*. Ces trois méthodes sont explicitées et envisagées dans le terrain précis qui nous occupe. Nous détaillons à ce stade les contextes, les sujets et les méthodes de recueil de données de chaque phase de la recherche.

Nous décrivons comment nous avons trié, retranscrit et traité les données recueillies.

Dans le chapitre quatre, nous exposons les principaux résultats. Nous établissons dans un premier temps un panorama des pratiques numériques actuelles des bureaux d'architecture belges. Il s'agit également de questionner leur niveau de connaissance en matière de modélisation paramétrique. Nous approfondissons alors notre compréhension des *a priori* au sujet de ces nouvelles technologies et relevons les facteurs influençant l'adoption de ces outils. Nous testons ensuite l'évolution de l'appréhension des concepteurs à l'issue d'une journée de formation. La dernière phase consiste à cartographier certaines stratégies de travail actuelles en effectuant des entretiens rétrospectifs et en observant des petits bureaux ayant une pratique paramétrique. Elle outille la mise au point de modèles théoriques explicitant, à un niveau tant cognitif qu'organisationnel, les adaptations induites par ces outils en regard des multiples aspects de la conception architecturale.

Le chapitre cinq laisse place à la discussion de ces résultats. Nous identifions tout d'abord un système de contraintes dans lequel les pratiques architecturales s'inscrivent, impactant de la sorte le recours ou non à des outils de modélisation paramétrique en fonction de l'expertise des architectes. Nous discutons ensuite le panorama des pratiques paramétriques que nous avons pu observer et les adaptations cognitives et organisationnelles y afférentes. Nous effectuons enfin une mise à niveau des modèles du processus de conception, en proposant un modèle original associé à l'usage de ces outils.

Le chapitre six conclut la thèse en résumant les contributions et limitations principales de la recherche. Il ouvre ensuite de plus larges perspectives pour envisager la généralisation des résultats ou approfondir certaines thématiques discutées dans ce travail.

CHAPITRE 2

ETAT DE L'ART

Après avoir introduit le cadre de notre recherche, l'état de l'art présenté ici a pour objectif d'aller au-delà d'un recensement des principaux auteurs et de leurs apports au cours de l'histoire. Notre volonté est de définir notre positionnement théorique qui fera sens au travers du développement de nos résultats.

Ainsi, nous étudions d'abord, à la section 1, différentes théories relatives au processus de conception, les spécificités du processus architectural, les médias employés pour l'outiller et les représentations externes qui sont produites. Nous retraçons à la section 2 l'adaptation des outils de modélisation paramétrique au domaine de l'architecture et, ainsi, à la nécessité de cerner leurs spécificités. La section 3 clôture le chapitre en abordant la théorie des organisations qui étudie le rapport entre une organisation telle qu'un bureau d'architecture et une nouvelle technologie qui y est implémentée.

1. Processus de conception

Cette section examine les grands courants de pensée qui ont structuré l'étude théorique et la modélisation du processus de conception. Ce regard global permet de nous positionner quant à la définition du processus de conception. Nous explicitons la définition que nous adoptons au cours de cette section. Nous portons ensuite un regard sur le processus de conception en architecture et listons les spécificités de ce domaine. Nous discutons les outils principaux utilisés en architecture et leur impact sur le processus de conception architecturale. Pour finir, nous nous concentrons sur les représentations externes, leur diversité et leur place dans le processus.

1.1. Principales communautés de recherche s'intéressant au processus de conception

Le processus de conception n'est pas inhérent à l'architecture. Il est une composante récurrente de nombreux autres domaines professionnels tels que l'industrie, la mécanique ou l'informatique (Darses, Détienne, & Visser, 2001; Safin, Leclercq, & Decortis, 2007). Nous abordons d'abord le processus de conception dans sa globalité avant de nous pencher sur les spécificités liées au domaine architectural aux sections 1.2 et 1.3 du présent chapitre.

Pour donner un premier aperçu historique de l'étude du processus de conception, nous commençons par identifier cinq phases majeures qui structurent la recherche en conception et que Cross distingue dans son livre « *Developments in Design Methodology* » (Cross, 1984) :

- 1 La première phase est située entre l'après-guerre et 1966, période durant laquelle des précurseurs tels que Pahl et Beitz ont représenté le processus de conception selon des méthodes systématiques avec pour objectif d'établir des prescriptions universelles.
- 2 En contradiction avec le développement de méthodes prescriptives, les années 1967 à 1973 sont marquées par une tentative de cerner la nature intrinsèque de l'activité de conception et, dès lors, son inhérente complexité. La problématique soulevée est le caractère mal défini des problèmes de conception (Buchanan, 1992).

- 3 Fin des années 70, les résultats expérimentaux obtenus sur l'analyse de l'activité de conception n'étant pas satisfaisants, les chercheurs entament des observations dans un cadre de pratique réel, dit « écologique ».
- 4 En parallèle, une nouvelle approche plus psychologique de l'analyse de l'activité, incluant des critères ergonomiques, émerge. Cette approche est reprise sous l'appellation de *design research*.
- 5 Depuis 1984, il y a non seulement une volonté de développer des méthodologies et des outils d'assistance mais également une volonté d'accompagner l'analyse du processus de conception d'une contextualisation. Il y a désormais une nécessité de comprendre en profondeur tous les supports extérieurs au processus qui complètent les compétences cognitives du concepteur et dont l'influence ne peut plus être niée. On parle désormais d'analyse cognitive située de la conception. Nous discutons de la contextualisation à la section 3.

De multiples modèles du processus de conception ont émergé depuis lors et sont envisagés de manières diverses. Nous verrons que la conception voit sa définition évoluer au fil du temps, en fonction des considérations propres à chaque époque. Elle est ainsi successivement résolution d'un problème complexe et mal défini, processus inventif et créatif, résultat conceptuel issu de l'articulation de connaissances ou encore construction de représentations.

Nous résumons les théories majeures qui construisent le panorama actuel de l'activité de conception afin d'avoir un regard global sur l'évolution des courants de pensée, bien que certaines de ces théories aient été réfutées depuis. Nous décrivons ainsi la théorie dite du problème-solution, du see-transform-see, la théorie C-K (concept and knowledge space) et enfin la théorie des représentations. Cet aperçu aide à construire une compréhension du processus de conception et des phénomènes complexes qui s'entremêlent (voir Visser, 2006 pour une revue plus complète).

Problème-solution

Soutenue par Simon (1969), une des premières tentatives de théorisation de la conception considère que tout problème, pourtant mal défini (*ill structured problem*), possède un état initial et un état final (solution). L'ensemble des possibilités et des états intermédiaires est représenté mentalement dans un « espace-problème » définissant les contraintes et les possibilités avec lesquelles jonglent les opérateurs pour résoudre le problème. De ce point de vue, le processus de conception est jalonné de trois activités cognitives qui interviennent de manière itérative : la représentation de l'état du problème, la génération d'une solution et l'évaluation de la solution. Ces travaux précurseurs considéraient donc la conception comme une résolution de problèmes pour lesquels le concepteur doit construire de nouvelles procédures, ne pouvant se référer à des structures préétablies et mémorisées, afin d'aboutir à la solution (Visser, 2009).

Cette approche de la conception est générique, c'est-à-dire qu'elle est indépendante au domaine d'application. Toute personne confrontée à ce type d'activité de résolution de problème, indépendamment de son statut socio-professionnel, est considérée comme un concepteur. Cette vision permet ainsi d'emprunter des concepts aux nombreuses études expérimentales de la résolution de problèmes (Visser, 2009). Cette approche est critiquée sur sa vision mécaniste voire réductrice. La conception, et en tout cas la conception architecturale, est une activité plus complexe que la résolution de problèmes observables en laboratoire.

See-transform-see

En réaction à cette première modélisation de la conception vue comme résolution de problèmes, certains auteurs, dont Schön (1983), ont attaché une importance particulière à la notion de contexte. Considérant le caractère situé de la conception, ils décrivent celle-ci comme une activité émergeant d'une interaction avec un contexte particulier. Les connaissances mobilisées dans des situations de conception sont orientées vers l'action. La conception est ainsi vue comme une « conversation réflexive avec la situation », où la conception même devient un objet de réflexion (Safin, 2011). Schön caractérise la conception par des mouvements du type « voir-transformer-voir ». La situation est interprétée,

mobilise des savoirs orientés vers l'action, puis est réinterprétée. Ces multiples ré-interprétations concernent tant l'espace problème examiné que l'espace solution (Schön & Wiggins, 1992; Suwa, Gero, & Purcell, 2000). Cette approche est dite constructiviste car les savoirs et la situation se co-construisent et s'influencent mutuellement. Dans ce courant de pensée, nommé le situationnisme, l'idée de planification et de stratégies préétablies est rejetée : l'activité est opportuniste voire réactive, et les stratégies ne sont que des reconstructions a posteriori des activités en situation (Suchman, 1987 cité par Safin, 2011).

Théorie C-K

Construisant également sur le concept de boucle itérative entre connaissances et interprétations, Hatchuel et Weil définissent la conception comme un flux perpétuel entre deux espaces : le « concept space » et le « knowledge space » qui s'enrichissent mutuellement, se distanciant ainsi encore davantage de l'assimilation de la conception à de la résolution de problèmes. Dans cette théorie C-K, les concepts sont vus comme le point de départ du processus de conception, qui est interprétable mais qui ne peut être résolu avec les connaissances disponibles (Masson & McMahon, 2016). Cet ensemble de concepts est donc constitué de toutes les propositions dont les caractéristiques essentielles sont d'être partiellement inconnues mais désirables (Masson & McMahon, 2016). L'espace des connaissances est quant à lui défini comme l'espace des propositions logiques. La connaissance peut être tacite ou explicite, scientifique ou faite de croyances, il s'agira toujours de propositions, qui pourront être utilisées pour travailler sur les concepts (Masson & McMahon, 2016).

Quatre opérations sont décrites entre ces deux ensembles C et K. Le concepteur introduit des caractéristiques à son concept, induisant un manque dans l'espace des connaissances. Les concepts procèdent à une activation des connaissances (opération C-K). Il s'agit d'aller de l'inconnu vers le connu : prototyper les concepts, créer du savoir nouveau pour faire exister ses idées (Masson & McMahon, 2016). L'augmentation des connaissances répondant à ce manque initial par optimisation, déduction, inférence, modélisation, sont autant de raisonnements qui forment les opérations de K dans K. Cette modification de l'espace des connaissances génère à son tour la création de nouveaux concepts

(opération K-C) et leurs spécifications. Il s'agit d'aller du connu vers l'inconnu. L'espace C est enfin envisagé comme une arborescence dont le rôle de l'opérateur C dans C est de vérifier la cohérence des concepts. Ce mouvement perpétuel correspond à une acquisition progressive de connaissances entre les différentes phases du processus, enrichissant ainsi l'objet de conception. Ces opérations sont schématisées par la figure 1 ci-dessous.

Cette théorie fait sens dans le domaine de l'architecture. En effet, nous découvrirons dans la section suivante les spécificités de la conception architecturale et notamment l'importance du concept pour le processus architectural. Les propositions formelles des architectes sont identifiées dans cette théorie au travers des concepts. Trouvant un écho particulier dans le domaine du management de l'innovation (Masson & McMahon, 2016), cette théorie constitue une base théorique pertinente dans la recherche que nous menons, touchant d'une part au domaine de la conception, et d'autre part, à l'intégration de nouvelles technologies dans une structure architecturale.

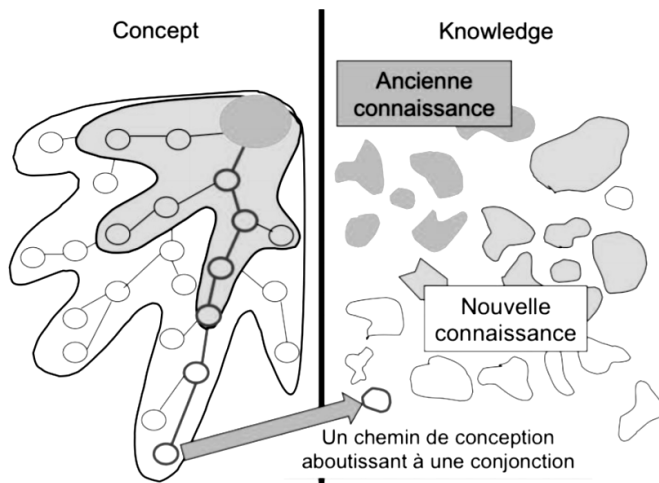


Figure 1.
Fonctionnement de la théorie C-K définie par Hatchuel et Weil (Masson et al., 2016)

Théorie de la représentation

Dans la même veine, nous nous référons aux écrits de Visser (2009) qui définit le processus comme une « activité de construction de représentations » :

*« La conception consiste à spécifier un artefact (l'artefact produit), à partir de spécifications de départ qui indiquent (...) les fonctions à remplir par l'artefact, ainsi que les besoins et buts qu'il doit satisfaire, étant donné certaines conditions (exprimées par des contraintes). Sur le plan cognitif, cette activité de spécification consiste à construire des représentations de l'artefact à concevoir – elles-mêmes aussi des artefacts – jusqu'à ce que ces représentations soient si précises, concrètes et détaillées qu'elles spécifient complètement et explicitement la réalisation de l'artefact (spécifications de réalisation).
» (p.70)*

Visser (2006) considère la conception comme une activité de construction de représentations et de modifications de celles-ci, qu'elles soient dites internes ou externes à la pensée du concepteur. Lors d'une activité de conception, ce dernier navigue entre la construction de représentations mentales de l'artefact et de représentations externes de celui-ci. Cette approche est dite opportuniste car elle n'est pas basée sur une planification hiérarchique du travail à accomplir – entendu ici comme la construction de représentations mentales ou externes.

Parallèlement à la présentation de quatre théories structurant l'étude de la conception (de manière non exhaustive mais révélant une forme de diversité), nous présentons diverses manières dont les processus ont été modélisés. Certains auteurs, dont nous faisons partie, n'ont pas pour ambition de formuler une nouvelle hypothèse explicative des phénomènes de la conception mais tentent de modéliser les processus qu'ils observent afin de mesurer l'impact d'un facteur identifié, tel que l'introduction d'un nouveau type d'outil d'assistance dans notre cas. Les modèles de conception peuvent généralement être classés selon deux critères : les modèles peuvent être soit prescriptifs ou descriptifs, soit procéduraux ou itératifs.

Si nous reprenons le processus de résolution de problème énoncé précédemment, celui-ci suit généralement un axe prescriptif en plusieurs étapes : générer une solution intermédiaire, évaluer cet état intermédiaire, ce

qui va mener à la génération d'une autre solution plus pertinente. Les modèles prescriptifs sont ainsi considérés comme linéaires et séquentiels. Contrairement à ce type de modèles, les modèles descriptifs sont généralement moins linéaires et plus détaillés. Ils ne couvrent dès lors que rarement la globalité d'un processus de conception et se concentrent sur des aspects plus spécifiques, comme par exemple la gestion des contraintes (Darses, 1994 citée par Elsen, 2011). Par ailleurs, certains théoriciens ne s'attèlent plus à décrire de manière détaillée un aspect précis mais tentent de considérer plus largement certains aspects de la conception en construisant ainsi un méta-modèle, comme c'est le cas pour la théorie C-K que nous avons abordée.

Nous pouvons présenter les modèles procéduraux ou en étapes comme une sous-catégorie des modèles prescriptifs. En effet, le processus de conception y est représenté comme une suite d'opérations qui doivent être réalisées consécutivement dans un ordre particulier par le concepteur afin d'accomplir l'activité, comme c'est le cas des premiers modèles de conception représentant symboliquement la conception comme un processus linéaire.

Cette représentation du processus s'est précisée au fil du temps pour faire apparaître des sous-étapes et des sous-tâches du processus de conception. Les modèles présentent alors la nature cyclique et interconnectée d'un processus et peuvent être catégorisés comme des modèles prescriptifs itératifs. Ce type de modèles a été largement repris en architecture.

En 2004, Dubberly et ses collègues recensent, au travers de différentes disciplines telles que l'architecture, le design industriel, le génie mécanique, la gestion de la qualité ou encore le développement de logiciels, vingt-quatre modèles linéaires, trente-deux modèles linéaires intégrant des boucles itératives, trois modèles en arbre, sept modèles en spirale, huit modèles circulaires et douze modèles variés pour représenter le processus de conception (Dubberly, 2004). Cette variété de modèles montre les multiples points de vue à l'égard du processus de conception et surtout leur évolution au cours du temps.

Cette diversité peut être résumée de manière claire par quatre familles de modèles, à savoir les modèles linéaire, cyclique, en vis d'Archimède et en hélicoïde conique convergent (Blessing, 1995, dans Darses, 2004). Ils sont illustrés à la figure 2. Ces quatre typologies reflètent l'évolution schématique de

la représentation du processus de conception, allant du schéma linéaire de base (analyse – synthèse – évaluation) à un modèle itératif.

Le tableau ci-après (figure 3), emprunté à Visser (2006), facilite la comparaison de certaines théories au cours de l'histoire et notamment celles que nous avons citées et résumées. Ce tableau souligne le passage d'une vision plus structurée à une approche plus indéterminée, qui intègre des notions de « conception » et de « perception ».

Après cet aperçu des théories qui ont jalonné l'histoire, il convient d'énoncer la définition de la conception que nous utilisons dans ce travail. Si les théories divergent sur certains points, celles-ci partagent néanmoins une vision commune des caractéristiques principales de la conception, sans émettre de différences entre les domaines d'application et sans se limiter à un statut professionnel ou à une catégorie de personnes. On peut ainsi énoncer le tronc commun suivant :

- l'existence de données de départ (souvent sous la forme d'un programme) au caractère souvent mal défini ;
- un processus de transformation itératif (d'un état initial à un état final) à la fois de l'espace « problème » et de l'espace « solution » ;
- la satisfaction d'une solution jamais optimale mais tout au plus satisfaisant différents critères (eux-mêmes rarement prédéfinis) ;
- l'adaptation au contexte ;
- l'émergence d'un produit (matériel ou immatériel) ;
- l'explicitation de son fonctionnement.

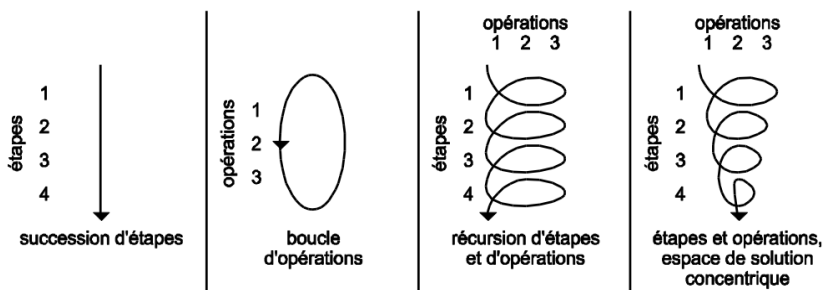


Figure 2. Typologies des modèles de conception d'après Blessing (1995)

Auteur ou Source	Etape 1	Etape 2	Etape 3
Simon (années 1980)	Structurer et analyser	Résoudre le problème	
Schön (années 1980)	Nommer/cadrer	Evoluer	Evaluer
Modèles classiques	Construction de la représentation du problème	Génération de la solution	Evaluation de la solution
Jones (1984) VDI Guideline 2221 (1987)	Analyser Analyse du problème et définition	Synthétiser Synthèse du système	Evaluer Analyse du syst., évaluation et prise de décision
Hamel (1989 ; 1995)	Analyser	Synthétiser	« Moulder »
De Groot (?)	Perception et observation	Essayer	Evaluer
Goel (1995)	Conception préliminaire	Affinement	Mise en détail
Cross (2000) ; Baxter (1995)	Concevoir	Concrétiser	Détailler
Ulrich et al. (2003)	Concevoir	Définir les niveaux du système	Détailler
Press et al. (2003)	Concevoir	Développer le prototype	Conception Finale
Pipes (2007)	Générer les concepts	Développer la conception	Spécifier

Figure 3. "The cognitive artefacts of designing" (Visser, 2006, p.34)
complété par (Self, Dalke, & Evans, 2009)

Dès lors, en résumant succinctement ces différentes propositions théoriques, nous pouvons envisager le processus de conception comme la résolution d'un problème complexe et flou, concourant à un objectif fixé mais mal défini. Cette résolution s'appuierait sur une interaction entre le concepteur, les acteurs du processus et le contexte de conception. L'objet à concevoir émergerait ainsi progressivement et itérativement au travers des représentations personnelles établies par le concepteur.

Bien que nous ayons pu établir un tronc commun de l'activité de conception, la plupart des auteurs cités ici n'ont fourni aucune preuve que les designers ou les architectes suivent systématiquement ces processus. La conception peut en effet être définie d'une manière générale ou, au contraire, selon son domaine d'application, et peut par ailleurs être déployée différemment par des concepteurs d'un même domaine, la conception ayant une variabilité interindividuelle (Safin, 2011). Divers facteurs d'ordre individuel tels que l'expertise, la formation, la personnalité ou encore les capacités, influent sur les modes de raisonnement analogique (Bonnardel, 2000; Leclercq & Heylighen, 2002), les stratégies de décomposition du problème (Akin, 2001) ou encore la quantité de solutions générées.

Constatant la coexistence de spécificités de chaque domaine, nous pouvons distinguer la conception architecturale de la conception mécanique ou du design de produit par exemple. La section suivante s'intéresse plus spécifiquement aux caractéristiques de la conception architecturale.

1.2. Spécificités du processus de conception en architecture

Les approches théoriques que nous avons explicitées nous renseignent quant aux processus cognitifs mobilisés dans des activités de conception génériques, mais ne tiennent pas explicitement compte des spécificités liées au processus de conception en architecture. La recherche que nous menons est développée dans le cadre particulier de la conception architecturale, qui se distingue des autres domaines de conception notamment par la mobilisation de notions attachées à la production d'un artefact architectural telles que son échelle, son caractère unique et difficilement reproductible, ou encore l'influence du contexte.

A l'image des modèles génériques du processus de conception énoncés à la section précédente, nombreux modèles théorisant le processus de conception architecturale se sont succédés et les représentations de ceux-ci se sont diversifiées. Pour revenir aux notions précédemment évoquées définissant un modèle tantôt comme prescriptif, tantôt comme descriptif, Chupin (2010) dira que les modèles de l'ingénierie sont prescriptifs et insistent encore sur des séquences d'étapes obligatoires, tandis que les modèles de l'architecture sont plutôt descriptifs et insistent sur des cycles cognitifs.

Claeys évoque quant à lui que la linéarité du processus architectural parfois représentée doit être nuancée et n'est généralement pas suffisante pour décrire toute la complexité d'un projet d'architecture :

« La (re)présentation du processus à l'aide d'une ligne droite est (trop) simpliste. Il vaut mieux le (re)présenter, au minimum, par une ligne brisée ou tortueuse (des imprévus (ré)orientent subitement le projet d'architecture en cours), par une boucle (le (co)concepteur revient parfois sur ses pas) ou une spirale (il (re)passse régulièrement par certains questionnements, mais globalement il converge vers une solution), ou encore des entrelacs et des pseudo-labyrinthes (le (co)concepteur piétine, il prend des chemins détournés). » (Claeys, 2018, p.177)

Cette description succincte du processus architectural laisse entrevoir les spécificités de la conception architecturale. Nous prenons le temps d'énoncer ces spécificités majeures en nous basant entre autres sur les écrits de Safin (2011) qui les a étudiées sous un angle cognitiviste que nous partageons.

Tout d'abord, la conception architecturale se distingue par son caractère situé. Le projet d'architecture s'inscrit dans un contexte géographique et temporel précis doté de contraintes à la fois techniques, sociales, culturelles, ergonomiques, économiques et sociétales notamment. Cette multitude de paramètres doit être intégrée au mieux dès la conception du projet afin de créer un bâtiment fonctionnel et durable répondant aux attentes émotionnelles, économiques, technologiques des clients. La gestion de cette complexité est guidée par la recherche de compromis satisfaisant au mieux la situation donnée. Alors que d'autres domaines de la conception se développent dans un cadre moins complexe – la construction d'une pièce mécanique par

exemple ne mobilise pas de réflexions d'ordre esthétique ou émotionnel et tente de réduire tant que possible les composantes sociales et ergonomiques pour mobiliser une réflexion essentiellement fonctionnelle, technique et économique – le caractère subjectif de certaines contraintes du domaine architectural rend toute approche exhaustive. Par ailleurs, l'architecture est également considérée comme un art majeur qui vise à produire des résultats uniques voire créatifs et innovants (Safin, 2011). En regard de la diversité des contextes dans lesquels s'inscrit un projet, une conception ne sera optimale que dans un contexte donné et pourrait s'avérer un non-sens dans un contexte temporel différent.

Certains auteurs se sont attelés à intégrer la notion de contexte qui représente une différence importante par rapport à d'autres domaines. Ainsi, on retrouve par exemple le modèle défini par Farel (1991, cité par Claeys, 2013) illustré à la figure 4. Ce modèle du processus de conception est constitué de trois blocs non hiérarchisés et reliés par des boucles itératives : le produit architectural, l'interaction entre le sujet et le contexte définissant les facteurs d'organisation externes et les facteurs d'organisation internes que sont l'usage, la construction et la forme. Le modèle proposé par Farel rencontre ainsi un principe de base de l'approche systémique : l'élaboration de la connaissance émerge des interactions entre le sujet connaissant et le contexte à connaître (Claeys, 2013).

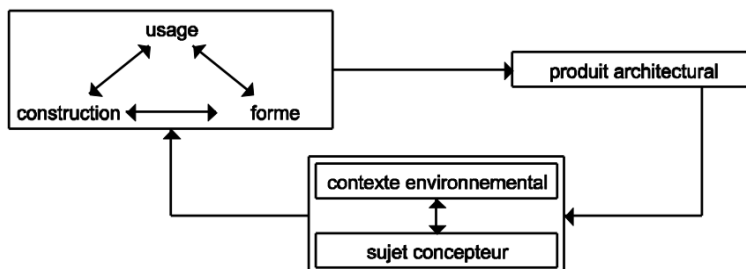


Figure 4. Modèle du processus de conception par Farel (1991 repris par Claeys, 2013)

Nous verrons également dans la section 3 sur la théorie des organisations que le contexte est l'un des concepts clefs de l'appréhension globale des processus de changement et, dès lors, qu'il joue un rôle central dans l'intégration d'une technologie dans une organisation.

Le processus de conception architecturale se caractérise ensuite par l'absence de méthodes prescrites. Les domaines de conception sont différenciables entre autres par l'existence de méthodes plus ou moins définies selon les domaines. Le caractère opportuniste de la conception architecturale se manifeste notamment par une décomposition du problème en fonction de la situation plutôt que par des méthodes structurées. Les recherches d'Akin (2001) renseignent que les architectes ont une propension plus importante que d'autres professions à l'utilisation de méthodes créatives et à la génération de solutions innovantes malgré la possible simplicité d'un problème. Cette attitude viendrait du fait que les architectes sont poussés et récompensés depuis leurs études, lorsqu'ils suggèrent des solutions innovantes (Akin, 2001). L'architecture favoriserait la nouveauté et la créativité tandis que d'autres domaines cultiveraient la fiabilité (Eisenberger & Rhoades, 2001).

Parmi l'absence de méthodes strictes, on retrouve de manière récurrente un parti architectural qui structure tout le processus de conception en orientant le raisonnement. Le concept joue donc un rôle central dans l'activité cognitive de l'architecte en tant qu'élément de contrainte prépondérant imposé par le concepteur lui-même et dont la qualité a un impact considérable sur la reconnaissance du projet (Heylighen & Martin, 2002).

Une autre spécificité majeure du processus architectural tient en la nature de ses représentations. Tandis que certaines disciplines ont recours à des représentations dites symboliques, telles que des listes ou des tableaux, les architectes utilisent de nombreuses représentations différentes et majoritairement analogues afin de représenter l'artefact et les propriétés topologiques et géométriques de l'objet à construire. Nous développerons la diversité de ces représentations à la section 1.5 sur les représentations externes.

Finalement cette distinction au travers de la nature des représentations découle en partie de la nécessité de représentation de la troisième dimension en architecture (Zevi, 1959). En effet, les représentations même en deux

dimensions d'un ouvrage contiennent généralement une grande quantité d'informations codifiées concernant la troisième dimension (un plan contiendra des informations sur la hauteur tandis qu'une coupe ou une élévation sera complétée d'informations sur la profondeur). Bien que de nombreuses informations soient fournies, ces représentations ne permettent pas une découverte de l'espace par le corps en mouvement sollicitant ainsi différents sens, ce qui favoriserait une meilleure perception de l'espace (Pallasmaa, 2005).

Notre travail se centre ainsi sur la conception dans le domaine de l'architecture, c'est-à-dire sur l'ensemble des activités cognitives et graphiques d'un individu ou d'un groupe d'individus, visant l'élaboration d'un artefact bâti, tout en considérant l'existence de contraintes à la fois techniques, esthétiques, fonctionnelles ou culturelles, qui participent à la mise au point du concept, son optimisation et sa validation complète afin d'apporter les données nécessaires à sa construction. Cette définition insiste sur :

- les activités cognitives sollicitées ;
- le caractère individuel ou collectif de la conception ;
- la production de représentations externes ;
- la gestion de contraintes d'ordre différent ;
- le caractère créatif de la conception.

Ces particularités du processus de conception architecturale ont poussé certains chercheurs à proposer des modèles adaptés à l'architecture, et plus particulièrement depuis l'arrivée des outils numériques dont nous présentons plusieurs modèles à la section suivante.

Par ailleurs, concernant le processus de conception architecturale, ce sont davantage les diverses tentatives de propositions de séquençage qui soulèvent des controverses (Bonnardel, 2006; Safin et al., 2007).

Récemment, Chokhachian et Atun (2014) ont proposé leur propre modèle, intitulé « *transparent layering system* ». En comparaison avec les processus de conception traditionnellement linéaires, se basant ici sur le modèle en cinq étapes – *initiation, preparation, proposal making, evaluation, action* – défini par Snyder (1979), l'objectif est de rapprocher les étapes de la conception d'un système plus flexible et d'être en mesure d'adopter et d'intégrer différents paramètres et outils dans les diverses phases de la conception. Le processus de conception est proposé comme un « système multicouche transparent » tel qu'illustré à la figure 5. Dans ce modèle, le terme « processus » est remplacé par « système » et les étapes de la conception sont remplacées par des « sous-systèmes ».

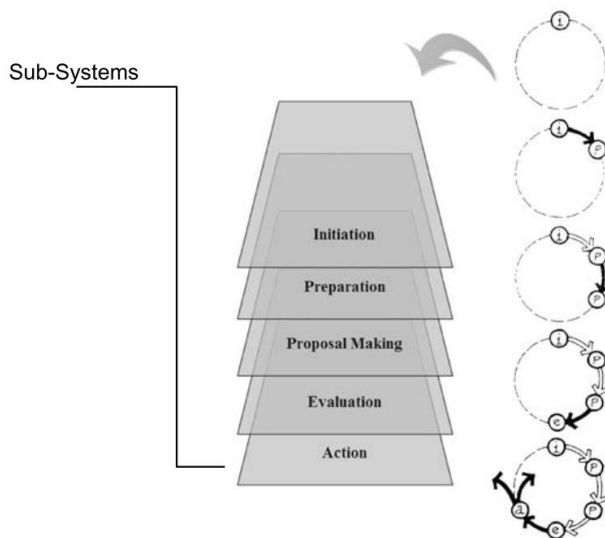


Figure 5.
« *Transparent layering system* »,
modèle proposé par
Chokhachian & Atun
(2014)

Ce modèle s'appuie cependant sur les étapes conventionnelles du processus de conception présentées avec des variations dans de nombreux travaux depuis ceux de Schön ou Cross énoncés précédemment. Cependant, ces modèles en disent relativement peu sur les méthodes, les techniques et les technologies qui soutiennent le processus et sous-entendent que les différents outils ont un impact similaire sur le processus.

Ostwald (2012) va plus loin que ces modèles et retrace l'évolution du processus de conception architecturale en le séquençant d'une manière totalement différente des modèles proposés jusqu'alors. Plutôt que d'être un modèle conventionnel « *design as process* », le modèle d'Ostwald se concentre sur la relation entre les métaconditions de conception (représentation, proportion, information, fonctionnement) et les outils, dispositifs et technologies qui permettent de remplir ces conditions (Ostwald, 2012). Le modèle comprend quatre systèmes :

- Le système figuratif comprend les manifestations les plus visibles du travail des architectes, à savoir tout support utilisé pour communiquer l'intention formelle et spatiale de l'artefact conçu : maquettes et dessins de bâtiments entre autres ;
- Le système proportionnel est nécessaire pour relier les moyens de représentation des modèles au monde réel. Quel que soit le système de mesure adopté par chaque génération successive, l'architecture est restée tributaire d'un lien conceptuel fort entre la représentation et la proportionnalité pour permettre la construction des projets architecturaux. Au 20^e siècle, cela correspond typiquement au système métrique combiné avec des échelles standard ;
- Le troisième système se rapporte à l'index. Traditionnellement, il soutient la transition d'une proposition non construite à une réalité construite. En architecture, les dessins ne fournissent pas assez d'informations pour construire un bâtiment. L'architecte doit également communiquer les informations relatives aux matériaux à partir desquels il souhaite que le bâtiment soit construit ou les normes et exigences auxquelles le bâtiment doit répondre (acoustiques, thermiques, structurelles). Ainsi, le système de représentation est complété par un système d'informations qui définit des types

spécifiques de matériaux de construction et des critères de performance pour le bâtiment ;

- Le système opérationnel émerge à la suite de la révolution industrielle. L'industrie de la construction est devenue de plus en plus complexe, avec des délais plus serrés, des attentes plus grandes en matière de prévisibilité financière, donnant une place prépondérante au processus d'accompagnement d'un bâtiment par rapport au reste du processus qu'il soutient. Ce système regroupe les plannings de livraison de matériaux, les PV de chantier et autres documents de la gestion du chantier. Tandis que cette mission se voyait auparavant couverte par l'architecte lui-même, la complexité de certains chantiers requiert d'attribuer cette mission à une personne nommée « gestionnaire de chantier ».

D'après Ostwald, la comparaison des deux époques – fin du 20^e siècle et début du 21^e siècle (figure 6) – montre que l'évolution de la législation ne cesse d'atténuer les problèmes des systèmes proportionnels. Les normes techniques étendent cependant les processus d'indexation et de gestion, associés aux appels d'offres et à la construction notamment, augmentant ainsi l'importance de ces deux systèmes.

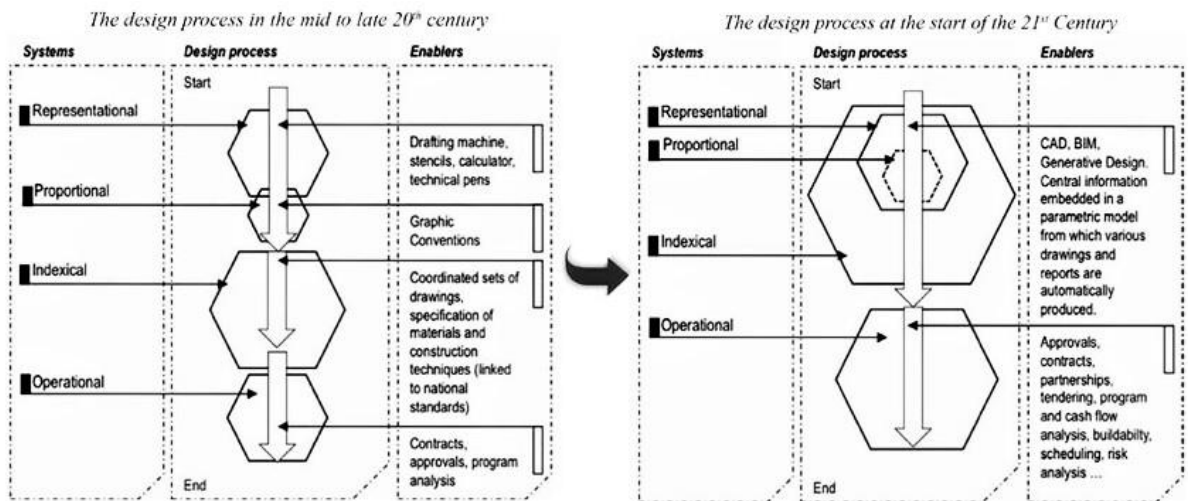


Figure 6. Représentation de l'évolution du processus de conception selon le modèle « system-enabler » proposé par Ostwald (2012)

Pour la première fois, le modèle proposé met en avant l'information comme un élément central et non le cheminement du concepteur. De plus, ce modèle souligne la place des outils en les considérant comme des « facilitateurs » [*enablers*] agissant en fonction des types de problèmes rencontrés dans chaque système. Ce modèle ne se spécifie cependant pas en regard du processus numérique, qui prend de plus en plus de place en architecture.

1.3. Spécificités du processus de conception en architecture numérique

Début des années 2000, Won questionne l'impact du numérique en conception architecturale et formule la question suivante : « Lorsque les concepteurs utilisent l'ordinateur comme support d'esquisse à l'étape de l'élaboration du concept, la cognition et la pensée visuelle sont-elles les mêmes qu'avec les médias conventionnels ? » (Won, 2001, p.320, traduction personnelle). En effet, la conception numérique et son impact croissant sur les pratiques de conception et de production ont rendu nécessaire un réexamen des théories et des méthodologies de conception.

Malgré la littérature disponible, les distinctions méthodologiques relatives à ces phénomènes ne sont encore que très peu formulées. Par conséquent, il est difficile de déterminer si la conception numérique constitue réellement une forme unique de conception et si oui, comment. Oxman (2006, p.230, traduction personnelle) ouvre la question suivante : « Le design numérique est-il un phénomène unique ou une nouvelle forme de design plutôt qu'un simple design conventionnel réalisé avec de nouveaux médias ? ».

Suite à cette nécessité de définir un cadre conceptuel et un fondement théorique de la conception numérique en elle-même, Oxman va définir un schéma générique des caractéristiques de conception par lequel les classes paradigmatiques de la conception numérique sont formulées. Ce modèle, qu'elle nomme la « *pensée du design numérique* » [*digital design thinking*], est présenté ici.

Il place le concepteur à une position centrale, abolissant toute forme de linéarité, contrairement à plusieurs des modèles précédemment cités. Par ailleurs, la nature de l'interactivité et la nature du contrôle des processus de

conception sont considérés comme très importants. Le modèle proposé à la figure 7, comprend quatre composantes de base qui représentent quatre catégories d'activité de conception. Celles-ci sont désignées comme étant la représentation (R), se référant principalement aux médias de représentation, la génération (G) incluant les processus de génération (considérés ici comme différents de la génération de formes via la représentation sur papier), l'évaluation (E) via des processus d'analyse et la performance (P) liée aux considérations programmatiques et contextuelles.

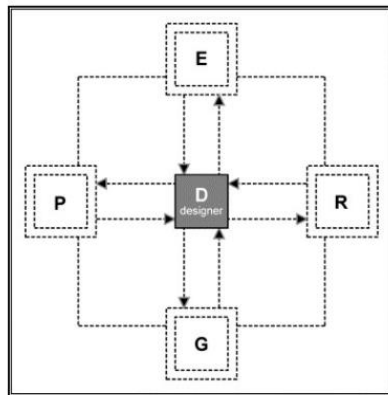


Figure 7. Schéma générique représentant les relations entre les 4 catégories d'activité de conception : R, G, E, P par Oxman (2006)

Les modèles traditionnels de processus de conception sont fondés sur des connaissances implicites plutôt qu'explicites, associant généralement le manque de formalisation des connaissances génératives et évaluatives à l'intuition et à la créativité (Oxman, 2006). Dans une vision computationnelle de la conception, la compréhension des processus cognitifs repose sur la capacité à formuler, représenter et interagir avec des représentations explicites de la connaissance.

Dans ce modèle, deux types de relations entre les composants sont identifiés : les interactions entre composants et les liens, produits du flux d'informations. Différents types d'interactions avec les médias ont été identifiés (figure 8). On peut notamment citer l'interaction sur papier et l'interaction avec un média numérique qui engendrent des distinctions importantes tant sur le plan cognitif que théorique. Dans le premier cas, le concepteur interagit directement avec les formes qu'il dessine sur le papier. Dans le second cas, l'interaction avec les médias numériques dépend de la mise en œuvre du

logiciel utilisé. L'interaction avec les supports de conception informatique exige du concepteur des données de départ et un niveau de formalisation différents.

De l'évolution de ces diverses interactions, Oxman établit cinq modèles numériques en plus du modèle sur support papier. Ceux-ci sont ainsi nommés : les modèles CAO traditionnels, les modèles numériques de formation, les modèles de conception générative, les modèles basés sur la performance, les modèles composés.

Nous retenons et illustrons ici trois de ces six modèles. Ceux-ci représentent trois phases clés de l'évolution du processus de conception en architecture à travers l'histoire. Nous retrouvons d'abord le processus sur support papier, puis le processus avec des outils CAO traditionnels, pour finir avec un modèle composé (figure 9).

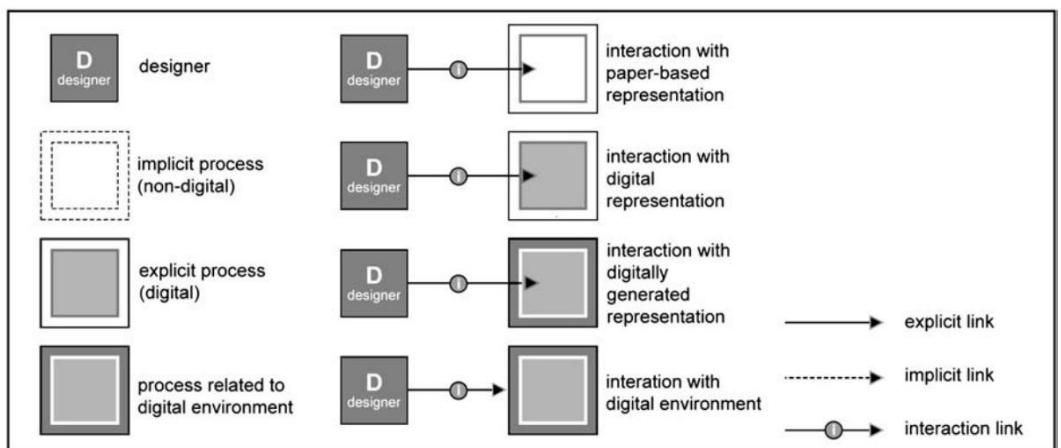


Figure 8. Symboles, limites et liens définis par Oxman (2006)

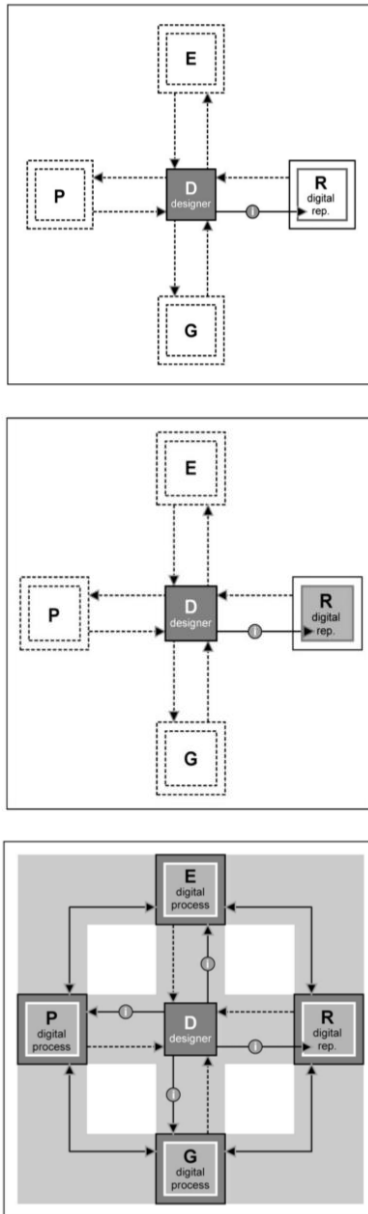


Figure 9. De haut en bas : modèle processus sur support papier, modèle processus avec CAO traditionnelle, modèle composé, définis par Oxman (2006)

Dans le premier cas du support papier, comme précédemment évoqué, le concepteur intègre implicitement les exigences en interagissant directement avec la représentation formelle. Le second modèle reconsidère et redéfinit les concepts de la conception traditionnelle (non numérique) afin de tenir compte des particularités de la conception numérique. L'auteure considère que dans la CAO traditionnelle, l'interaction avec les représentations formelles 2D et 3D permet l'automatisation a posteriori des dessins de conception et des modèles visuels. Les premières générations de systèmes de conception assistée par ordinateur ont donc été principalement caractérisées comme descriptives, en raison de l'utilisation de divers logiciels de modélisation géométrique et de rendu. Selon Kalay (2004 cité par Oxman, 2006), la CAO traditionnelle a eu peu d'effet qualitatif sur le design par rapport aux outils conventionnels. Les technologies numériques ont ensuite évolué dans différents domaines comme les modes de représentation, créant eux-mêmes de nouvelles bases pour la pensée conceptuelle. Ces modifications notables amènent Oxman à formuler le dernier modèle. Celui-ci présente des relations de type explicites entre tous les composants du processus. Le modèle, dit composé, est basé sur des processus intégrés incluant la formation, la génération, l'évaluation et la performance. Il explore de nouvelles formes et relations entre le designer, l'image et l'information. Ce modèle se distingue des précédents par la mise en évidence de la place du concepteur dans le processus de conception.

Dans cette section sur le processus de conception, nous avons évoqué les différents modèles de conception tous domaines confondus pour proposer une définition générale du processus de conception. Cette vision nous permet de saisir les activités constituant le tronc commun de tout processus de conception, à savoir l'existence de données de départ, le processus de transformation de l'état initial, l'adaptation de celui-ci au contexte et aux objectifs, l'émergence d'un produit, l'explication de son fonctionnement. Nous avons ensuite discuté des spécificités de la conception architecturale. Nous avons ainsi listé les particularités de la conception en architecture : la diversité des contraintes menant au caractère situé de la conception, l'absence de méthodes prescrites, la diversité de nature des représentations, la nécessité de représenter la troisième dimension et le rôle central du concept.

Nous avons pu voir au travers des différentes propositions du modèle proposé par Oxman que les outils utilisés impactent le processus de conception.

En effet, bien que certains concepts soient communs, les stratégies et les méthodes d'exploration des solutions peuvent varier selon le type de média utilisé.

Les trois premières sections de ce chapitre ont parcouru les théories et modèles principaux développés pour représenter le processus de conception. Nous constatons au sein de ces modèles certaines similarités, et identifions des spécificités du processus de conception qui font partie d'un tronc commun à chaque domaine. Cependant, d'autres spécificités sont plutôt propres à un domaine, le contexte en architecture par exemple, et poussent dès lors les chercheurs à affiner les modèles existants pour les y intégrer et contribuer ainsi à l'évolution des connaissances. Nous avons vu apparaître plus récemment des modèles adaptés à l'architecture numérique, soulignant de la sorte l'influence des outils sur le processus (figure 10). La section suivante est précisément dédiée aux principaux outils utilisés par les architectes, et à l'impact qu'ils peuvent avoir sur le processus de conception architectural.

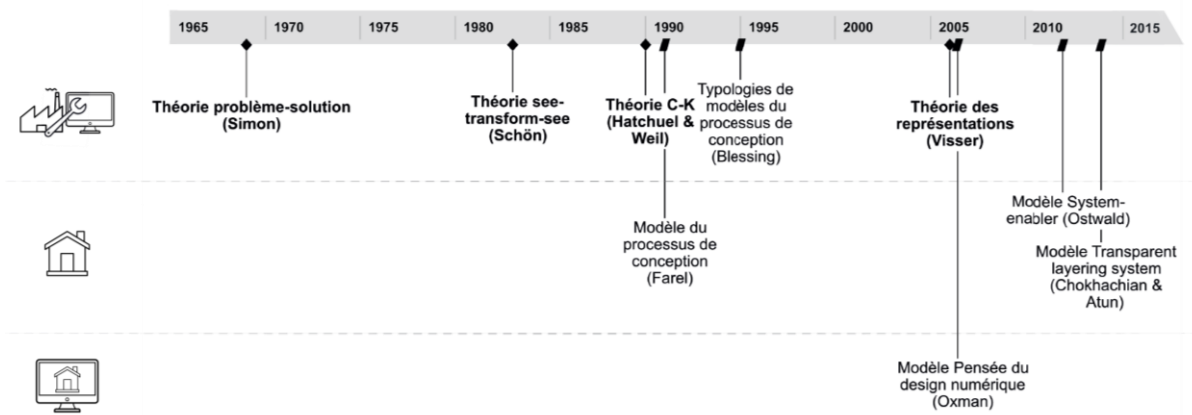


Figure 10. Ligne du temps reprenant les théories et modèles développés au fil du temps pour expliciter le processus de conception. Les spécificités sont étudiées pour différents domaines, de haut en bas : tous domaines confondus ; en architecture ; en architecture numérique

1.4. Outils en architecture

Les architectes ont toujours utilisé différents médias pour exprimer leurs concepts, traduire leurs idées et collaborer avec les autres. Ces outils ont évolué et se sont développés au fil du temps, parallèlement aux changements dans le domaine de la conception architecturale. La profession d'architecte s'est relativement compliquée (Abu Alatta & Freewan, 2017), notamment en regard de la diversité des outils existants et du niveau d'expertise plus ou moins important que les outils requièrent. La complexité croissante de l'architecture entraîne une grande divergence entre la façon dont les architectes imaginent une idée et la façon dont ils la perçoivent et l'expriment. Les outils, les médias et l'environnement choisis influent sur leur processus de conception et leurs productions (Abdelhameed, 2013; Schnabel, 2004).

Aujourd'hui deux grandes catégories d'outils sont distinguées dans la littérature, à savoir les outils analogiques et les outils de Conception Assistée par Ordinateur (CAO). De nombreuses études ne prennent pas en considération toutes les technologies émergentes et écartent de la sorte une partie du pan de l'architecture actuelle. Les architectes développent cependant des outils propres ou s'adaptent aux outils du marché et mettent en place des méthodes de travail spécifiques. Les outils de modélisation paramétrique en font partie et constituent l'objet central de notre étude.

Nous effectuerons donc une distinction supplémentaire dans les typologies d'outils numériques afin de distinguer les outils de CAO « traditionnels » que nous développons dans cette section, des outils de modélisation paramétrique que nous développons dans une section spécifique (chapitre 2, section 3).

Nous entamons cette section en recadrant les rôles que peuvent jouer les médias, ensuite nous posons les bases théoriques des outils analogiques que sont la maquette physique, le dessin à main levée et le discours et nous nous attardons sur les outils traditionnels de conception assistée par ordinateur, fondement essentiel de notre réflexion. Nous ne nous attardons pas à faire l'apologie de chaque typologie d'outil mais nous mettons ici en avant certaines caractéristiques ou propos qui éclaireront l'analyse des outils paramétriques.

1.4.1. Rôle des médias

Les idées du concepteur deviennent accessibles notamment lorsque celui-ci les transpose à l'aide de représentations externes, elles-mêmes émergeant à l'aide de médias qui sont utilisés en fonction de l'objectif à atteindre et en fonction des possibilités qu'ils offrent. Nous choisissons ici le terme *média* parmi les vocables existants afin d'englober les outils et les représentations qui sont associées à chacun d'entre eux. Estevez (2001) définit trois usages fondamentaux possibles des médias : spéculatif, descriptif et prescriptif.

Le concepteur a recours à ces usages de manière simultanée ou à tour de rôle, mais en interaction constante. Claeys (2013) identifie malgré tout une tendance chronologique de l'usage de ces fonctions (figure 11) et les décrit comme suit :

- A Dans l'usage spéculatif, le média est désigné comme support de l'activité conceptuelle du concepteur. Les médias sont utilisés pour supporter la conceptualisation du projet d'architecture. La première phase du projet est donc davantage spéculative, cherchant à initier un projet, à construire des solutions plausibles en raison du problème donné ;
- B Dans le cadre d'un usage descriptif, le média permet de maîtriser la forme et l'apparence du modèle en cours de conception. Dans ce cas de figure, le concepteur représente le modèle architectural en vue de le communiquer à autrui. Dans une phase ultérieure du projet, le processus est davantage descriptif, travaillant le projet en cours à partir de lui-même ;
- C Finalement, l'usage prescriptif affecte le média à la réalisation matérielle de l'édifice conçu afin de passer du modèle architectural au chantier. Dans cette dernière phase, le concepteur essaie de représenter le modèle architectural de manière à préparer et entamer la réalisation concrète de l'ouvrage (détails techniques, cahiers des charges, métrés par exemple). Claeys souligne que la conception peut se prolonger également durant la phase de chantier lorsque le concepteur actualise le modèle architectural en fonction des aléas du chantier.

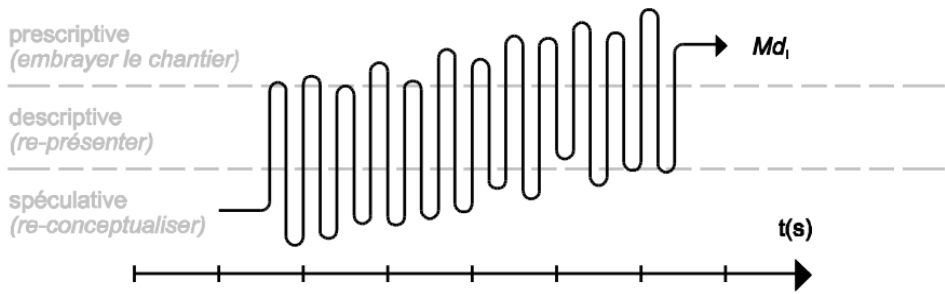


Figure 11. Utilisation des trois fonctions des médias au cours du processus de conception (Claeys, 2013)

De nombreuses facettes de chaque média sont étudiées dont les contenus graphiques, les processus cognitifs qu'ils soutiennent ou encore leurs fonctions au sein du processus de conception (individuel ou collaboratif). Nous ne proposons pas ici une description fine de chaque outil car, notamment pour les outils de CAO, les versions de logiciels évoluent rapidement. Nous parcourons, dans la section suivante, les grandes typologies d'outils utilisés dans un contexte architectural.

1.4.2. Typologie d'outils de soutien à la conception

1.4.2.1. Outils analogiques

Trois typologies d'outils analogiques sont principalement utilisées en architecture. On retrouve le dessin à main levée, le discours et la maquette physique. Cette section parcourt les caractéristiques majeures de chacun de ces outils en regard de leur utilisation en architecture.

Dessin à main levée

Étymologiquement, les mots dessin et dessein possèdent la même origine latine. Si, autrefois, dessiner signifiait tout aussi bien former le projet que tracer les contours, à présent le mot dessein a été assimilé au *dessin* et désigne une

réalité restrictive, purement graphique. Il ne signifie plus la relation entre le dessin et la pensée (Signorile, 2014).

Considérant cette signification, l'activité de dessin tient toujours un rôle central en architecture. En effet, dans d'autres disciplines telles que l'ingénierie ou le développement informatique, le dessin est davantage schématique que figuratif ou esthétique, comme c'est le cas en architecture. Cette particularité de l'architecture génère de l'intérêt auprès des concepteurs du fait que le dessin à main levée leur permet d'exprimer leurs intentions et de formuler leurs concepts dès le début du processus de conception (Goldschmidt, 1991; Hadjri, 2003; Lansdown, 1987; Schnabel, 2004).

Par ailleurs, cet outil permet d'explorer l'espace problèmes/solution de manière opportuniste (Visser, 2006) et les mécanismes du see-transform-see (Schön & Wiggins, 1992) facilitent les découvertes inattendues. Ce caractère dynamique se traduit par la proposition de plusieurs alternatives (Ullman, et al., 1990) dont les traces sont conservées grâce à la mémoire du papier, qui constitue une véritable mémoire externe. La mémoire du concepteur se trouve ainsi soulagée d'une charge cognitive (Bilda, Gero, & Purcell, 2006; Suwa, Purcell, & Gero, 1998). En effet, bien que synthétique (Leclercq & Elsen, 2007), le dessin a la capacité de délivrer un nombre considérable d'informations et ce à différents niveaux de lecture : lecture d'ensemble, groupes d'éléments, éléments particuliers.

Cependant, ces différentes propositions, additionnées aux différents niveaux d'abstraction autorisés sur un même dessin (Cross, 2000), peuvent générer des incohérences entre plusieurs représentations d'un même objet (Goel, 1995), induisant aussi parfois des ambiguïtés et de la complexité.

Le dessin est parfois considéré comme le moyen le plus rapide et le plus efficace pour visualiser la pensée des concepteurs (Archer, 1976). Cependant, sur l'ensemble du processus, le recours à ce média est chronophage et ne facilite pas la prise en considération de paramètres tels que la lumière, l'effet de matière et/ou de la couleur, et ce particulièrement pour des spatialités parfois difficiles à imaginer, à comprendre et à représenter (Wodehouse et Ion, 2010 cités par Abu Alatta & Freewan, 2017). Le dessin est donc caractérisé comme rigide, statique et lent à exécuter, un seul concept émergeant à chaque étape et la représentation graphique finale n'étant pas dynamique. A l'inverse, cette

lenteur est parfois perçue comme une opportunité qui alloue le temps nécessaire à l'émergence d'idées et à la maturation de la réflexion (Leclercq, 2005).

Bien que le dessin ait été élevé au rang de média le plus adapté aux phases préliminaires du processus de conception, certains chercheurs affirment qu'il ne s'y limiterait pas. Il n'existerait pas de moment particulier où le dessin est réellement abandonné (Eissen & Steur, 2008 ; Schenk, 2005 cités par Elsen, 2011). La transition entre différents médias se ferait itérativement par le concepteur, libre de ses choix.

Les outils sont généralement accompagnés et soutenus par le discours, qui favorise l'évolution et facilite la compréhension du projet entre différents acteurs. Nous abordons à présent cette typologie d'outils.

Discours

Une partie de l'activité des architectes repose sur des discussions formelles et informelles établies autour d'artefacts de conception, qui aident à développer des raisonnements individuels ou collectifs relatifs au projet (Joachim, 2016). Les interactions conversationnelles jouent un rôle majeur dans la production de sens, de vérité, de connaissances (Dionne, 2014).

Les ressources verbales utilisées par les architectes au cours d'un processus de conception ne constituent pas l'objet central de notre recherche. Nous nous appuyons sur les propos des architectes interrogés et observés afin d'accéder à leurs pensées. Les lecteurs intéressés par les liens entre activités graphique et discursive dans la communication de concepteurs ou l'influence des communications multimodales peuvent consulter les travaux de Defays (2015) et Joachim (2016).

De manière générale, les outils analogiques génèrent des représentations simplifiées du projet, pouvant même être considérées comme lacunaires ou ambiguës, étant donné le caractère personnel qui peut leur être attribué. Tandis que le dessin et le discours peuvent présenter un caractère complexe, instable et peu structuré, évoluant au gré des pensées du concepteur, la maquette physique nécessite que le concepteur effectue des choix stratégiques sur ce qui doit être communiqué et dès lors représenté.

Maquette physique

La maquette physique (son processus de façonnage, le résultat obtenu) est un moyen d'externaliser la pensée de manière concrète (Zhang & Norman, 1994). D'abord utilisée pour explorer et représenter les pensées du concepteur ou constituer une représentation en trois dimensions de représentations 2D, la maquette, ou maquette numérique, est également utilisée pour représenter des artefacts informatiques (Houde & Hill, 1997). A contrario du dessin à main levée ou du dessin informatisé constituant des représentations en 2D, une des caractéristiques spécifiques de la maquette physique est sa tridimensionnalité matérielle qui permet d'unifier différentes vues bidimensionnelles en une seule représentation (Silvestri, 2009).

La maquette constitue un outil de communication efficace et compréhensible par bon nombre de personnes n'ayant pas de compétences en architecture. Cependant, les projets étant parfois complexes, il peut être difficile de créer un prototype complet. Dès lors, un choix doit être posé pour cibler le bon type de maquette à réaliser (matière, niveau de détails) en fonction des objectifs de communication et du public visé. Ainsi, la simplicité de certaines maquettes peut être bénéfique comparé à une haute complexité du projet. Cette simplicité permet également de générer et partager plusieurs modèles en équipe au lieu d'un modèle unique, explorant un ensemble d'idées différentes et évitant ainsi le phénomène de *premature fixation* (Dow et al., 2010). Lim, Stolterman et Tenenbergh (2008) vont jusqu'à énoncer :

“Prototypes are the means in which designers organically and evolutionarily learn, discover, generate and refine designs. They are design-thinking enablers deeply embedded and immersed in design practice and not just tools for evaluating or proving successes or failures of design outcomes.” (p.2)

Finalement, le travail en maquette permet d'éveiller d'autres sens qui jouent un rôle important en conception, et de maintenir ce lien particulier entre le corps humain et la réalité tandis que « le travail sur ordinateur inhibe la création car il fait appel à moins de sensations. L'ordinateur crée une distance entre le créateur et l'objet. » (Pallasmaa, 2005, p.13, traduction personnelle). En effet, Loyer (1974) s'est positionné par rapport au lien entre le corps humain et la maquette. Il explique que la maquette physique permet de vérifier la

cohérence volumétrique du projet mais non les espaces en eux-mêmes puisqu'il est généralement impossible de pénétrer dans la maquette. Notre perception aurait d'ailleurs tendance à être faussée par le fait que nous regardons la maquette par le haut, inculquant une vision d'un point de vue aérien.

Malgré l'intérêt de cet outil, le temps nécessaire pour réaliser une maquette physique est important dans un processus de conception. Cette caractéristique freine l'utilisation de cet outil et incite les concepteurs à se tourner vers d'autres outils.

Les caractéristiques des outils analogiques ne répondant pas totalement aux attentes des architectes, l'usage des outils de conception assistée par ordinateur s'est propagé petit à petit dans la pratique architecturale. Nous abordons à présent les considérations au sujet de cette typologie d'outils.

1.4.2.2. Outils traditionnels de conception assistée par ordinateur (CAO)

Se rapprochant davantage des outils de modélisation paramétrique qui constituent l'objet central de notre recherche, nous nous attardons un peu plus sur les caractéristiques des outils traditionnels de conception assistée par ordinateur.

Depuis les années 1980, les logiciels de dessin et de conception assistée par ordinateur (en deux et trois dimensions) ont été diffusés dans les agences d'architecture, complétés plus récemment par les outils dédiés au Building Information Modeling - BIM (Tribout & Margier, 2018).

En architecture, il existe plusieurs approches de modélisation. Certaines sont déployées dans un processus de conception créatif pour ouvrir de nouveaux champs d'exploration, tandis que d'autres cherchent à modéliser des bâtiments en réduisant le temps et le coût de production (Mitchell, 2005). Elsen (2011) énumère ainsi trois catégories majeures d'outils que nous reprenons sous l'appellation de « CAO » dans la suite de ce travail :

- Les outils de modélisation qui requièrent de modéliser chaque élément en détail. Ces outils peuvent être augmentés par des plugins qui leur donnent d'autres fonctionnalités, telles que des évaluateurs de résistance structurelle ou des plugins d'optimisation ;

- Les outils de rendu visuel qui permettent de générer une représentation 2D ou 3D précise de l'objet final et de le contextualiser dans le même temps, évitant ainsi de dédoubler un modèle quasiment à l'identique ;
- Les outils de visualisation dédiés à la manipulation dynamique de l'objet sans pouvoir le modifier. Cette catégorie soutient principalement la communication vers d'autres acteurs.

Cette évolution du numérique en architecture a été schématisée par Aish et Bredella (2017) en quatre grandes étapes représentées à la figure 12. Il y a une progression du dessin 2D au BIM et ensuite au « *design numérique* » [*design computation*]. Si l'on considère cette progression du point de vue des systèmes ou des flux de données, les auteurs distinguent également quatre phases dans l'évolution de l'informatique en architecture (représentées sur l'axe horizontal de la figure 12).

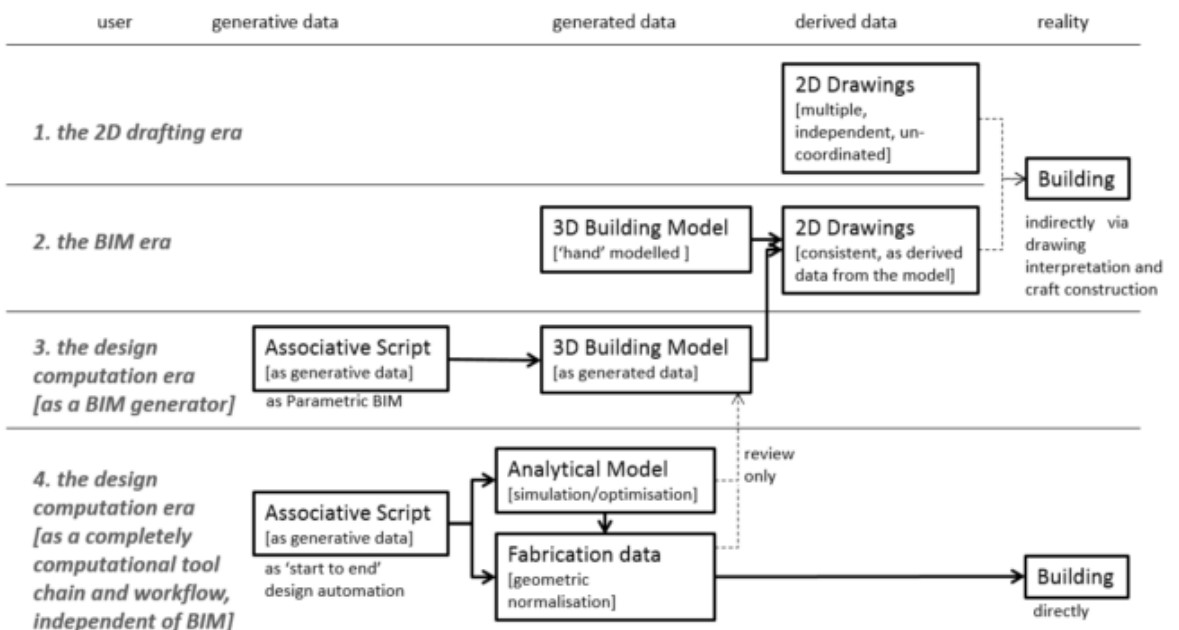


Figure 8. Les 4 phases de la conception assistée par ordinateur définies par Aish & Bredella (2017)

Dans la phase 1 (dessin 2D), l'architecte crée directement des dessins qui sont utilisés dans un processus de construction artisanal ou assisté mécaniquement. Le dessin en 2D présente tous les problèmes inhérents aux dessins, c'est-à-dire qu'ils sont susceptibles d'être incohérents et d'entraîner des erreurs de réalisation.

Dans la phase 2 (modélisation BIM), l'architecte crée un modèle BIM 3D à partir duquel des dessins peuvent être extraits. Ce type de modélisation représente le bâtiment en 3D induisant une certaine cohérence entre les différentes représentations. Cependant, le processus de construction est encore artisanal ou assisté mécaniquement.

Dans la phase 3 (design numérique en tant que générateur BIM), l'architecte crée des scripts ou des diagrammes de nœuds graphiques en tant que représentation permettant de générer automatiquement le modèle BIM.

Dans la phase 4 (design numérique en tant que générateur direct du bâtiment), l'architecte crée des scripts ou des diagrammes de nœuds graphiques comme représentation générative du bâtiment. Ce processus inclut directement les codes nécessaires pour piloter la fabrication numérique et la construction robotique. Ce processus est l'aboutissement d'une chaîne d'outils et d'un flux de travail complètement informatisés sur l'ensemble du processus.

Les logiciels commerciaux appartenant à la phase 1 (AutoCAD®, ArchiCAD® ou AllPlan® par exemple), visant à aider le tracé de plans techniques, ont désormais été adoptés et ont supplanté la table à dessin grâce à leur efficacité en termes de possibilités de représentation et d'édition. Ces caractéristiques permettent de vérifier rapidement le concept grâce à la visualisation 3D, au caractère numérique des plans qui facilite la transmission et l'archivage ou encore en tant que support des processus d'évaluation (de la lumière, des matériaux, des couleurs,...) (Hanna & Barber, 2001; Tovey & Richards, 2004 cités par Elsen, 2011; Safin, 2011).

Bien que ces outils soient puissants pour les phases avales du projet, ils peinent à soutenir le travail créatif de la conception et ce, malgré leur appellation générale d'outils de CAO (Conception Assistée par Ordinateur). C'est pourquoi Lawson appelle les outils CAD - Computer Aided Drafting - plutôt que "Designing" (Léglise, 2016 ; Reffat, 2006 cité par Abu Alatta & Freewan, 2017).

Les architectes les utilisent malgré tout dès le début du processus de conception et se conforment aux possibilités offertes par les interfaces des logiciels, notamment en étant contraints par des bibliothèques d'éléments architecturaux prédéterminés (Foster & Partners, 2006). Cette contrainte peut faire apparaître un phénomène de « *circumscribed thinking* » qui se dégage lorsque la génération des idées est elle-même impactée par l'outil numérique, en restreignant le « pensable » à ce qui est rendu « possible » par les interfaces utilisées (Robertson & Radcliffe, 2009; Scheffers et al., 2017)

Ces outils sont issus de préoccupations propres au fonctionnement de l'informatique, qui ne correspondent pas réellement au caractère opportuniste, flou et itératif des processus de conception tels qu'ils ont été observés dans des pratiques faisant usage de la technique papier/crayon (Garner, 2000 ; Amphoux, 2002 cité par Tribout & Margier, 2018 ; Leclercq, 2005 ; Derycke, 2012 ; Léglise, 2016). La CAO a de plus appauvri la capture du *design rationale*, c'est-à-dire de la genèse des raisons et du processus décisionnel qui sous-tendent les décisions prises lors de la conception (alternatives envisagées, chemin décisionnel pour aboutir à l'artefact final)

Le processus numérique actuel est davantage à sens unique plutôt qu'interactif, ce qui signifie que les concepteurs utilisent l'ordinateur pour modéliser leurs idées, traiter le modèle, obtenir des représentations, mener des discussions sur la conception, modifier la conception en fonction des retours recueillis, puis modifier le modèle afin de parvenir au résultat final après avoir effectué cette même procédure à plusieurs reprises (T. Zhang, Dong, Han, & Ma, 2018). Le processus de conception étant avant tout un processus orienté vers la recherche d'un résultat inconnu, un grand nombre de concepteurs considèrent qu'il est difficile de l'outiller uniquement avec des logiciels qui requièrent une définition précise et détaillée du moindre élément à modéliser (Derycke, 2012).

Ce pré-requis de précision réduirait le nombre de solutions investiguées (phénomène du *bounded ideation* ou bien du *circumscribed thinking* énoncés par Bilda & Demirkan, 2003; Robertson & Radcliffe, 2009). Les concepteurs étant amenés à approfondir plus rapidement une seule solution (Ullman et al., 1990 cité par Elsen, 2011), ils examineraient moins le champ des possibles qu'avec une technique papier/crayon. De plus, les dimensions limitées de

l'interface «écran» ne faciliteraient pas les comparaisons de plusieurs variantes (Hewett, 2005).

Les limitations techniques et les difficultés d'apprentissage renforceraient cette restriction. Une étude effectuée en Wallonie, interrogeant les conditions de la pratique architecturale actuelle (Scheffers et al., 2017), esquisse ces limitations à partir des propos recueillis. Concernant le numérique, les architectes wallons construisent majoritairement leur discours sous le mode du « oui, mais... », convoquant à la fois des arguments en faveur et à l'encontre des outils numériques. Le gain de temps que ceux-ci permettent serait en réalité, selon certains, équivalent à la perte de temps engendrée par l'appropriation de l'outil, les restrictions que les outils imposent et la perte du rapport à l'échelle qu'ils entraînent (Scheffers et al., 2017). Plusieurs difficultés peuvent donc être formulées, liées essentiellement à la complexité globale des logiciels : leur maîtrise minimale est difficile à acquérir, leur logique sous-jacente est largement incomprise, ils brident la liberté de représentation et d'exploitation de l'objet architectural.

La difficulté d'apprentissage de ces logiciels impacte l'effort cognitif du concepteur, le déviant de sa tâche initiale à savoir l'exploration de l'espace problèmes/solutions pour se focaliser sur des problèmes liés à l'interface ou à l'outil en lui-même. L'utilisateur serait par ailleurs tenté d'opter pour des opérations qu'il maîtrise et dès lors qui sont moins énergivores. Ce choix pourrait dans certains cas s'avérer moins adaptées (Borillo & Goulette, 2002). La génération des idées est elle-même impactée par l'outil numérique c'est-à-dire que l'utilisateur est influencé, modélisant non pas ce qu'il veut vraiment, mais ce qui est le plus aisé à effectuer avec le logiciel (Robertson & Radcliffe, 2009). Cette attitude est le phénomène de « circumscribed thinking » que nous avons évoqué précédemment.

Les utilisateurs, une fois habitués à un outil particulier, ne feraient plus l'effort d'en appréhender un autre, parfois pourtant moins complexe. Des effets de monopole se dégagent ainsi, laissant le marché dans une inertie soumise aux pressions économiques et industrielles (Elsen, 2011).

Par ailleurs, une étude réalisée par Chokhachian et Atun (2014) a notamment questionné des architectes praticiens de différents pays (Chypre, Iran, Allemagne, Nouvelle-Zélande et Angleterre) sur la pratique numérique

qu'ils mènent depuis 4 à 6 ans. Les cinquante réponses retenues permettent aux auteurs de classer les raisons pour lesquelles les concepteurs n'utilisent pas les outils existants. Le principal obstacle mis en évidence est le manque de formation dans le système académique. Ensuite, les participants mettent en avant que ce n'est pas exigé par les clients et que ça n'augmente pas la rapidité du processus de design. Les auteurs concluent que la formation du concepteur joue un rôle majeur dans les premières étapes de la conception et pourrait considérablement renforcer ses capacités s'il avait été sensibilisé à ces outils au sein de son parcours académique. Nous discuterons cette analyse à la lumière des résultats de notre travail.

Finalement, Dino (2012) argumente que l'évolution de la complexité du processus de conception architecturale ne serait pas seulement due à des stimuli externes, tels que l'augmentation des exigences de performances des bâtiments, les besoins des utilisateurs, les processus de conception intégrés, mais aussi à un nouvel intérêt formel pour la géométrie des formes libres et les concepts mathématiques et géométriques qui la composent.

En effet, l'architecte américain Cohen évoque dans un entretien avec Picon (Picon & Razavi, 2011), que l'ordinateur a donné une impulsion nouvelle à ses recherches formelles, permettant de produire des formes à la fois rigoureusement définies, contrôlées et imprévisibles, étendant largement le registre formel envisageable. Ces différents éléments seront discutés plus amplement en regard de la littérature dédiée à l'étude du paramétrique dans la section 2.4 de ce chapitre, et finalement confrontés dans la Discussion aux phénomènes tels que le bounded ideation, le negative premature fixation et le circumscribed thinking.

En regard des questions soulevées dans cette recherche, nous faisons état des caractéristiques intrinsèques des outils les plus utilisés en architecture afin de situer par après les outils de modélisation paramétrique. Cet aperçu nous permet de rebondir sur les représentations externes que nous mettons en lumière dans la section suivante.

1.5. Représentations externes en architecture

Nous nous intéressons dans cette section aux représentations externes intimement liées à l'usage des outils que nous venons d'aborder et envisageons la conception de ce point de vue (section 1.5.1). Nous identifions les types de représentation mobilisées lors d'activités cognitives et nous interrogeons leurs caractéristiques (section 1.5.2). Cette mise au point nous permet d'interroger ensuite spécifiquement les représentations sous le regard du numérique (section 1.5.3).

Le mot « représenter » signifie littéralement rendre présent la chose observée. Présenter le réel serait une opération qui se veut descriptive, tandis que le *re-présenter* sous-entend une (re)formulation intentionnelle, et donc spéculative de celui-ci. Ainsi, pour Simon (1969 cité par Claeys, 2013), résoudre un problème signifie simplement « le représenter de façon à rendre la solution transparente ». Selon Claeys, présenter et re-présenter le projet d'architecture en cours de conception sont deux opérations simultanées. En tant qu'opération cognitive d'aide à la résolution de problèmes, la représentation opère une influence directe sur tout processus de conception du projet architectural. Tout au long de l'avancement du projet et au travers de l'usage d'outils, le concepteur exploite et manipule des représentations de divers types : images de référence, images mentales, dessins, schémas, plans, modèles 3D physiques ou numériques, explications orales,... Les nombreuses représentations à l'œuvre au cours du processus de conception l'influencent. Qu'elles soient externes ou internes, générées par le concepteur ou, au contraire, perçues et interprétées, elles participent à la construction du processus et à l'élaboration de l'artefact.

Pour aborder les questions des représentations en architecture, nous nous appuyons principalement sur les thèses de Claeys, Elsen et Safin, dans lesquelles les auteurs prennent respectivement soin de détailler les enjeux de la représentation (Elsen, 2011 ; Safin, 2011 ; Claeys, 2013). Les lecteurs désireux d'approfondir le processus de représentation, les caractéristiques de chaque média et les voies possibles de leur utilisation notamment, sont invités à consulter les trois thèses citées. Nous nous attelons dans cette section à mettre en lumière les questions de la diversité des représentations et l'impact de leur usage, sur lesquelles nous reviendrons par la suite. Nous portons une attention particulière aux recherches concernant les représentations associées aux outils

de modélisation paramétrique. L'objectif de cette section n'est donc pas de revenir sur toutes les notions abordées dans la littérature mais bien de développer celles qui font sens dans le cadre de cette recherche.

1.5.1. La conception vue comme une construction de représentations

Comme décrit dans la section 1.1, le processus de conception a été abordé sous différents angles au cours de l'histoire. Dans le cadre de cette recherche, nous nous appuyons sur la théorie présentée par Visser (2006, 2009). Cette chercheuse a proposé un nouveau modèle pour expliciter la conception, basant son approche sur les représentations internes et externes manipulées par les concepteurs. De ce fait, elle redéfinit également la conception de manière à soutenir son modèle théorique. Pour elle, « *la conception consiste à spécifier un artefact en fonction d'impératifs qui indiquent - généralement jamais explicitement ni de façon complète - une ou plusieurs fonctions qui doivent être remplies, ainsi que les besoins et objectifs à atteindre, dans certaines conditions (exprimées par les contraintes). A un niveau cognitif, cette activité de spécification consiste en la construction (génération, transformation et évaluation) de représentations de l'artefact, jusqu'à ce qu'elles soient si précises, concrètes et détaillées qu'elles définissent explicitement et complètement l'implémentation de l'artefact* » (Visser, 2006).

Visser opère donc un changement majeur de perspective, passant de la description de la conception comme une résolution de problèmes à la conception comme construction de représentations. Le concepteur utilisant ses connaissances et ses propres représentations fait évoluer la situation en identifiant et sélectionnant les éléments, puis en les interprétant et enfin en les transformant. Selon Visser, la conception n'est qu'une suite de transformations de représentations qui sont générées par le concepteur. Les connaissances et les savoir-faire sont donc positionnés comme une ressource centrale dans la construction et l'utilisation de ces représentations.

Derycke (2012) va jusqu'à définir le *paradigme de la représentation architecturale* comme étant l'ensemble des règles graphiques qui ont – depuis plus de 500 ans – permis à l'architecte de manipuler et de communiquer l'objet architectural sur base de dessins composés pour une part, de figuratif ou

d'analogie et, pour une autre part, d'un langage de symbolisation et de codification communément admis.

Considérant la conception comme la construction de représentations successives, nous distinguons et classifions les différents types de représentations dans la section suivante. Nous abordons ensuite le rôle cognitif des représentations pour finir par esquisser leur positionnement dans le processus de conception architecturale et l'influence potentielle du numérique.

1.5.2. Distinction des types de représentations

La notion de représentation est au cœur de nombreux débats en sciences cognitives depuis les années 1980. C'est notamment au travers de l'approche ergonomique que les représentations sont abordées, s'appuyant ainsi généralement sur les travaux d'Ochanine (1978), d'Anderson (1983) et de Rasmussen (1990) (cités par Wolff, Burkhardt, & de la Garza, 2005). Plusieurs études se concentrent plus particulièrement sur l'articulation des représentations dites internes et externes (Visser, 2009) et étudient la manière dont les représentations mentales s'élaborent tout au long du processus de conception (Darses et al., 2001). L'artefact évolue en effet vers la solution définitive en passant par une succession d'états intermédiaires (Jeantet, 1998) qualifiés par un ensemble de représentations internes et externes qui changent au fil du processus. Bonnardel (2006) identifie trois caractéristiques majeures en regard desquelles les représentations évoluent lors de la conception :

- L'adéquation de la représentation (propriétés inutiles ou appropriées) ;
- La complétude de la représentation (propriétés manquantes ou complètes);
- Le niveau de représentation.

Selon l'étape du processus, le concepteur utilise soit des représentations internes, réalisées mentalement, soit des représentations externes de l'ordre de l'esquisse papier-crayon, des représentations physiques ou des représentations digitales par exemple. Les représentations internes (états cognitifs réels, modèles architecturaux, images mentales...) doivent être

distinguées des représentations externes (dessins, maquettes, discours...). La distinction est formulée d'après les écrits de Claeys (2013) et Elsen (2011).

Dans le premier cas, des représentations internes issues d'opérations cognitives émergent dans l'intra-psychique du concepteur lorsqu'il mène des opérations de représentation (in)conscientes sous la forme de modèles architecturaux. Les représentations internes sont généralement liées à des thématiques telles que la mémoire à long ou à court terme (Purcell & Gero, 1998), la charge cognitive liée à leur traitement, ou encore à l'émergence de l'inspiration et à la créativité. À chaque état du processus de conception, le modèle architectural est (ré)actualisé par le concepteur à l'aide d'opérations mentales. C'est à partir du modèle architectural que le concepteur élabore des représentations. Nous ne détaillerons pas davantage l'étude des représentations internes en tant que telles et nous intéressons principalement à l'externalisation des représentations et à la « charge cognitive » nécessaire pour les formaliser.

Un des chercheurs ayant le plus activement investigué la question des représentations externes en architecture est Lebahar. Pour ce chercheur, *« analyser l'activité du SC [sujet-concepteur] revient essentiellement à analyser des représentations, ainsi que des raisonnements et procédures qui permettent de les construire ou de les transformer »* (Lebahar, 2007). On peut s'interroger sur les raisons qui poussent les individus à utiliser des notes, des schémas ou des dessins, pour des activités qui n'en nécessitent pas toujours *a priori*. Safin (2011) prend notamment l'exemple du calcul écrit : alors que la plupart des opérations peuvent être réalisées mentalement, quelles sont les raisons qui nous poussent à prendre des notes pour effectuer certaines opérations arithmétiques ?

Les rôles cognitifs des représentations externes dans les activités humaines ont été classifiés en quatre catégories par Safin : alléger la charge mentale, matérialiser l'information, structurer le comportement et étendre la cognition.

Un projet d'architecture comporte un nombre considérable de données qu'il est difficile de traiter uniquement mentalement. Le concepteur se voit donc forcé d'en stocker une partie ailleurs. Le premier rôle de ces représentations est de fournir une aide mnémonique améliorant ainsi l'efficacité et l'efficacité des activités cognitives (Kirsh, 2010 cité par Safin

(2011)). Par exemple, si la liste de courses a évidemment pour but de se souvenir des achats à effectuer, elle permet aussi à certaines personnes d'organiser leur stratégie d'achat, en définissant des parcours qui ne sont pas nécessairement aisés à récupérer en mémoire.

Ensuite, les représentations externes matérialisent l'information. En libérant la pensée, les informations deviennent des informations tangibles, manipulables et dès lors partageables. Par cette matérialité, les idées peuvent être réinterprétées et reformulées tout en laissant parfois, selon les supports utilisés des traces des opérations effectuées.

Cette production de représentations externes a par ailleurs un impact non négligeable sur notre comportement. La manière dont est présentée une information ou dont est conçu un objet conditionne notre comportement et l'interprétation qui en est faite (Purcell & Gero, 1998). Ce phénomène avait déjà été identifié sous le concept d'affordance par Gibson (1979). Les caractéristiques physiques d'un objet nous incitent à adopter un comportement, ce que Zhang évoque selon ces termes : « *Les représentations externes ne sont pas simplement des données et des stimuli pour l'esprit interne ; elles sont plutôt intrinsèques à de nombreuses tâches cognitives au point de guider, contraindre et même déterminer le comportement cognitif.* » (Zhang, 2000, p. 2, traduction personnelle). Safin illustre ce concept à partir de la forme d'une poignée de porte : suivant son design, nous aurons tendance à la tirer ou à la pousser. Elsen (2011) souligne qu'il est donc essentiel d'en tenir compte lorsque l'on soumet à autrui une représentation de l'artefact en cours de conception.

D'une manière plus générale, les représentations externes permettent d'étendre la cognition et ainsi de réaliser des opérations plus complexes à mesure que les outils de représentation évoluent : « *... au fur et à mesure que notre environnement et notre technologie évoluent, nous serons en mesure de penser à des choses qui sont impensables aujourd'hui.* » (Kirsh, 2010, p.2, traduction personnelle). L'externalisation d'une information permet un traitement différent mais complémentaire du traitement possible en interne. Externaliser une information, c'est permettre d'utiliser des outils et artefacts plus puissants pour le traitement de cette information. Par exemple, l'utilisation d'une calculatrice s'avère dans beaucoup de cas bien plus puissante que le calcul mental (Safin, 2011).

Finalement, un projet d'architecture ne peut fonctionner que si la communication est possible entre les différents acteurs du processus (maître d'ouvrage, entrepreneurs, ingénieurs, urbanistes,...) (Claeys, 2013). Le concepteur doit donc inévitablement recourir à des outils pour externaliser ses représentations internes et les rendre ainsi intelligibles aux autres. Cette externalisation offre, de la sorte, la possibilité de construire un référentiel commun aux acteurs et la construction d'une inter-compréhension de la situation.

Claeys distingue trois modalités d'externalisation des connaissances qui sont combinées par le concepteur pour faire état du projet architectural :

1. Le **discours** est le développement de la pensée par une suite de mots ou de propositions qui s'enchaînent (Lalande, 1926 cité par Claeys, 2013). Cette première modalité de représentation est économique puisqu'elle ne nécessite pas de support autre que le corps.
2. Le **dessin** est une modalité de représentation qui nécessite au moins deux éléments : un support matériel (papier, calque par exemple) et un outil de représentation (crayon, stylo par exemple).
3. La **maquette** est une modalité synthétique et spatiale qui requiert minimum deux éléments : un support matériel (carton, plexiglas, plâtre,...) et des outils pour le travailler (cutter, colle,...).

Ces modalités, telles que définies par Claeys, n'intègrent pas la notion de numérique. Celle-ci pourrait pourtant transparaître, le dessin se faisant dès lors sur un support tel qu'un ordinateur à l'aide d'une souris, la maquette étant associée à la production d'une maquette numérique. Nous n'irons pas plus loin sur les modalités d'externalisation car elles possèdent de nombreuses similarités avec les outils que nous avons décrits à la section 1.4.2.1. Nous ciblons donc uniquement les spécificités des représentations.

S'il est difficile de dresser une liste exhaustive des diverses représentations envisageables, Van de Vreken et Safin (2010) proposent néanmoins de distinguer les types de représentations en architecture et leurs usages selon sept dimensions. Chaque représentation peut être caractérisée par une ou plusieurs des dimensions suivantes telles que définies par Safin (2011) et résumées à l'annexe 1 : analogue ou symbolique, visuelle ou multimodale,

synthétique ou expressive, univoque ou ambiguë, interactive ou contemplative, immersive ou émergente, 2D ou 3D.

Safin définit chacune de ces dimensions plutôt comme un continuum qu'une dichotomie. De nombreux types de représentation sont donc possibles et une même représentation pourra être caractérisée différemment en fonction du contexte ou de l'usage qui en est fait (Safin, 2011). L'architecte utilise plusieurs modes de représentation selon ses objectifs, ses moyens et les personnes auxquelles il s'adresse. Les différents types de représentation ont des capacités variées de figuration de l'espace, en fonction de leurs caractéristiques et de celles de l'utilisateur, comme son expertise ou son genre (Hannibal et al., 2005 cité par Safin, 2011).

Nous nous devons donc d'évoquer la différence entre une représentation générée, perçue ou interprétée. Bien qu'il nous semblait essentiel de mentionner cette distinction, nous n'entrerons pas davantage dans ces théories et dirigeons les lecteurs intéressés vers les écrits de Blavier (2006) et Van de Vreken (2008). Nous retiendrons simplement les trois points énoncés par Elsen (2011) :

- la sélection et l'usage des outils ont un impact direct sur les représentations manipulées et donc sur le processus ;
- une représentation peut présenter différentes «qualités» de contenu et donc différentes opportunités de manipulation ;
- l'évaluation d'une représentation « générée » se fait différemment de l'évaluation d'une représentation « perçue » et l'imposition de cette dernière à un concepteur n'est donc pas sans conséquences.

Les représentations, au même titre que la conception, se voient donc influencées par le contexte ainsi que par les outils utilisés par le concepteur. Nous abordons ce point plus spécifiquement en regard des représentations de l'artefact générées dans le domaine de la conception architecturale et influencées par l'émergence des outils numériques.

1.5.3. Impact des outils numériques sur les représentations en architecture

Au XX^{ème} siècle, les technologies numériques ont permis de gérer des systèmes d'informations complexes qui étaient alors adaptés à la conception architecturale. L'accumulation de ces informations entraîne un besoin de les organiser et complexifie la tâche de l'utilisateur quant à leur représentation graphique. Au vu de la masse d'informations du modèle numérique, celles-ci doivent nécessairement être filtrées par l'architecte qui va d'une part faire appel à des outils spécifiques au programme utilisé et, d'autre part, mobiliser une série de connaissances propres à la discipline architecturale, afin d'extraire du modèle numérique une représentation graphique pertinente se conformant à la codification d'un média final déterminé (Derycke, 2012).

Les représentations externes en architecture constituent un instrument de régulation de l'activité du concepteur, de même que des filtres le guidant dans la perception du problème qu'il a à maîtriser (Zevi, 1959 ; Daru, 1991 ; Garrigou & al., 1995 cités par Elsen, 2011). Van de Vreken (2008) classifie les représentations en architecture et évalue leur impact sur la perception de l'espace architectural. De ce corpus de résultats, la chercheuse souligne que la principale limitation du plan d'architecture est de ne pas pouvoir figurer explicitement la troisième dimension ; la principale limitation de la maquette physique est de ne pas aller assez loin dans la représentation réaliste des matériaux, couleurs, interactions avec la lumière ainsi que de limiter l'immersion physique dans un espace ; la principale limitation du film et, par extension, de la navigation dans les environnements 3D, est la difficulté de s'y mouvoir librement et facilement. Elle approfondit de la sorte un constat déjà largement admis : les concepteurs préfèrent utiliser certaines représentations en fonction du concept qu'ils désirent générer et de l'objectif poursuivi (Do, 1995 cité par Elsen, 2011).

Le choix d'un type de représentation s'expliquerait également par le fait que le processus de raisonnement sur base de dessins se fait préférentiellement en zonages, ou « part-to-part », et que la visualisation 3D ne conviendrait pas à ce type de raisonnement spatial (Kavakli, Scrivener, & Ball, 1998 cités par Elsen, 2011). Cette ancienne hypothèse a été remise au goût du jour début des années 2000. Estevez (2001) discute de cette « fragmentation » des représentations. Celle-ci serait l'essence même du processus de conception architecturale : les plans, coupes et élévations peuvent évoluer en parallèle et

en incohérence, sans imposer au concepteur une nécessité de synthétiser toutes les données en un modèle unique et intégral, d'emblée trop limpide, comme cela est généralement imposé par les modèles 3D numériques. Ce chercheur formule l'existence d'un «paradoxe géométral» : le travail en vues fragmentées ferait évoluer le projet dans sa globalité tout en laissant au concepteur une certaine forme de liberté créatrice liée au degré d'imprécision véhiculé par cette fragmentation. Cependant, en architecture, force est de constater que la représentation 3D fait désormais partie des représentations prédominantes. Une large étude de Self, Dalke et Evans (2009) questionne l'efficacité de divers supports en comparaison aux supports traditionnels 2D. La recherche met en perspective les avis de plusieurs centaines de concepteurs issus de sept pays, évaluant les représentations générées par onze outils, traditionnels ou numériques, tous commercialisés (CAO 2D ou 3D, croquis sur papier ou sur tablette, maquette physique, prototypage rapide, dessin technique, ...). Cette recherche met en avant que la CAO (2D ou 3D) est reconnue par les architectes comme la plus efficace pour la définition de détails de conception. A la question « *cet outil représente-t-il fidèlement le concept général du produit ?* », la CAO 2D et le dessin à main levée sur papier récoltent quasiment le même résultat, inférieur à la CAO 3D qui serait un des meilleurs moyens de figurer les concepts.

La multiplicité actuelle des techniques de représentations graphiques telles que des logiciels de dessin, de modélisation surfacique et volumique, de modélisation paramétrique, résout donc en partie le point de vue technique du dessin mais induit une modification des habitudes de la conception et, par conséquent, un renouvellement des opérations et/ou fonctionnalités de la conception (Lecourtois, 2010).

Lecourtois est l'une des dernières chercheuses à avoir proposé un nouveau concept propre à l'étude des représentations numériques en architecture. Cette chercheuse développe le concept d'« espace de la modélisation ». La modélisation est ici entendue comme l'activité cognitive par laquelle on pense et on construit des modèles informatiques. Elle formule la question suivante : « *Comment conçoit-on un modèle informatique qui puisse représenter et assister la conception d'un objet architectural en cours de conception ?* » (Lecourtois, 2010). Elle identifie deux niveaux qui influencent ce développement : celui de l'interface et celui du mécanisme de l'assistance. Les menus des interfaces des

outils évoqués présentent une hiérarchisation et un découpage des objets et des fonctionnalités. Les utilisateurs se voient ainsi guidés dans leurs usages par le déploiement de menus qui ne laissent pas de place à une visibilité globale du système. Par ailleurs, les mécanismes des logiciels influencent le concepteur en fonction de leur visée opératoire propre, ce qu'on entend plus généralement par logiciel « métier ». Dès lors, les opérations telles que choisir des objets, découper la représentation du projet en objets disponibles de l'outil, situer le modèle dans un système géographique, situer l'observateur de la scène, sont autant d'opérations qui s'écartent de celles de la conception architecturale même du projet.

Les utilisateurs développent donc des opérations de modélisation dépendantes du fonctionnement des logiciels qu'ils utilisent. Lorsque les utilisateurs ont recours à des logiciels de dessin ou des logiciels « métiers », ceux-ci les poussent à penser un découpage des éléments constitutifs des représentations en plan. Lorsque les utilisateurs ont recours à la modélisation numérique surfacique et volumique, celle-ci induit un renouvellement de la pensée des formes architecturales en offrant de nouvelles façons de les construire (Lecourtois, 2010). Finalement, la modélisation paramétrique offre quant à elle des possibilités de programmation et incite alors à penser des relations entre des propriétés géométriques déterminantes de formes et des variables indépendantes. Lecourtois illustre ce dernier cas en se référant à l'expérience développée par Greg Lynn sous l'appellation d'Embryological House : l'architecte propose une multiplicité d'instances pour sa maison à partir d'un modèle numérique unique.

Bien que l'univers des médias architecturaux se soit diversifié et que certaines théories aient vu le jour, le modèle numérique est généralement envisagé, à différents degrés, comme un support de travail dont les modes de communication n'ont que peu évolué. Ce positionnement pousse Derycke à considérer qu'il n'y a pas encore eu de réelle remise en question de la représentation architecturale dans sa dimension *paradigmatique*. Il l'explique en reprenant les mots d'Estevez :

« Les trois projections fondamentales, à savoir : la projection conique, la projection parallèle ou cylindrique, et la projection géométrale continuent de faire loi dans la pratique contemporaine de l'architecture. Les représentations graphiques bidimensionnelles

extraites des modèles numériques passent encore et nécessairement par ces systèmes de projection. Nous n'avons pas encore assisté à une "transformation des codes culturels de la représentation" » (Estevez, 2001, p.105 cité par Derycke, 2012, p.3)

Nous terminons le développement de cette section en mettant en avant la question que pose Damien Claeys : « Sommes-nous face à une crise de la représentation en architecture due à l'irruption des outils numériques, ou devons-nous mettre volontairement et constamment en crise nos méthodes de représentation ? » (Claeys, 2018).

Claeys fonde ce constat de crise sur deux mythes antagonistes concernant la représentation (Claeys, 2018) :

1. le mythe du dessin analogique selon lequel le geste naturel garantit une représentation intuitive par un transfert immédiat, de l'esprit au corps médiateur et de ce dernier vers l'outil de représentation, ce qui permet un dialogue parfait du concepteur avec le réel ;

2. le mythe du dessin numérique selon lequel l'immédiateté des commandes garantit la continuité des représentations (travail en temps réel) et le transfert par immersion totale qui assure un dialogue avec un double parfait du réel (travail à l'échelle réelle). Ce mythe est renforcé, par exemple, par l'accessibilité et la démocratisation croissante d'outils de réalité virtuelle et d'applications user friendly (par exemple, le casque de réalité virtuelle HTC Vive, développé par HTC).

Nous clôturons cette section en soulignant l'importance de l'étude des représentations. La compréhension des représentations multiples nous éclaire quant à leur chevauchement et leur complémentarité. Cet état de l'art nous permet d'évaluer comment et pourquoi le concepteur fait tantôt appel à un type de représentation plutôt qu'à un autre pour mener à bien son processus de conception.

2. Développement des outils de modélisation paramétrique

Les recherches que nous venons d'évoquer ont démontré les influences positives et négatives des outils numériques, ouvrant la voie à l'adoption des outils paramétriques. De nombreux chercheurs font état de l'influence des outils paramétriques et de leur intérêt croissant pour les architectes, compte tenu des nouvelles perspectives qu'ils ouvrent en termes de workflow et de diversité morphologique. Cependant, la distinction entre les différents types de logiciels paramétriques reste confuse. A la section 2.1, nous abordons d'abord l'historique du développement du paramétrique en architecture pour ensuite définir ce que nous entendons par conception paramétrique et confronter cette notion à celle du BIM à la section 2.2. Nous approfondissons l'explication de la modélisation paramétrique d'après son fonctionnement informatique à la section 2.3, pour ensuite considérer à la section 2.4 comment le paramétrique est caractérisé d'après les recherches publiées dans la littérature. Cette synthèse nous permettra d'aborder les intérêts et changements en cours.

2.1. Historique du développement du paramétrique en architecture

La pratique architecturale est en pleine redéfinition étant donné l'utilisation croissante des technologies BIM, qui ont remplacé les outils de CAO à certains niveaux de conception (Caetano & Leitão, 2017). Cependant, en raison de la nature variable de la conception architecturale (Bukhari, 2011), les architectes revendiquent un processus de conception qui favorise le changement. Les outils de CAO traditionnels requièrent généralement trop de temps et d'efforts pour modifier les conceptions et les modèles, ce qui limite l'exploration de solutions plus complexes. Néanmoins, certaines technologies récentes ont permis le développement et la prolifération de solutions plus complexes, de nouveaux modèles et de méthodes de fabrication avancées (Kolarevic, 2005). C'est pourquoi les architectes ont commencé à détourner des outils dédiés à d'autres secteurs. À l'origine, la modélisation paramétrique numérique a été développée pour la conception dans des domaines tels que l'industrie navale, l'aérospatiale et l'automobile (Foster & Partners, 2006; Salim & Burry, 2010).

Cependant, on retrouve déjà des préceptes de cette logique paramétrique actuelle dans les travaux de nos prédécesseurs : Sullivan qui décrit les processus

de reproduction de l'ornementation florale à partir de constructions géométriques ; Gaudi ou encore Le Corbusier établissant des règles de composition et des systèmes de génération analogiques comme les voûtes à courbure funiculaire ; Moretti qui, dans les années 40, décrit déjà ce processus ou encore Eisenman qui reflète cette pratique dans la conception d'une série de maisons (Maison I - X), où il affirme que « *la maison n'est pas un objet au sens traditionnel - qui est le résultat final d'un processus - mais qui est plus exactement l'enregistrement d'un processus* » (Eisenman, 1977 cité par Dino, 2012). A ce sujet, les travaux d'Eisenman se basaient au départ sur des critères poétiques puisque l'objectif était de se référer à un ordinateur, non pas pour obtenir une modélisation contrôlée mais pour voir la forme naître d'un ensemble d'automatismes (Picon & Razavi, 2011). La prise en considération de paramètres organisationnels plus rationnels, comme les flux piétons, automobiles, programmatiques ne s'est développée qu'à la fin des années 1990.

Il s'avère que si nous reprenons la signification originelle d'une représentation *paramétrique* telle qu'elle est apparue au XIXe siècle dans le domaine des mathématiques et des sciences (voir définition de la 'Concise Encyclopedia of Mathematics' notamment), tout dessin architectural pourrait être entendu comme paramétrique. En effet, plusieurs architectes considèrent que le paramétrique a traversé toute forme d'architecture :

« *This thesis begins with the assertion that all design is parametric.* » (Hudson, 2010, p. 18)

« *It must be stated that architectural design is inherently a 'parametric' process, and that the architect has always operated in a 'parametric fashion'.* » (Gerber, 2007, cité par Davis 2013, p. 23)

Ce que nous entendons aujourd'hui par conception paramétrique, et que nous définissons à la section suivante, a fait évoluer l'architecture au niveau des processus, des outils de conception et parfois même des techniques de construction (Oktan & Serbulent, 2017).

Les récents développements informatiques ont donc nourri l'émergence de deux logiques de modélisation, ayant toutes deux acquis de la reconnaissance mais induisant parfois aussi certaines formes de confusion entre ces deux pratiques architecturales : la modélisation paramétrique d'une part, et le BIM

(Building Information Modeling) d'autre part. Nous poursuivons en éclaircissant ces ambiguïtés.

2.2. Confusion des termes

Gu et Ostwald (2012) distinguent cinq grandes catégories de technologies numériques contemporaines en architecture au travers de l'ouvrage *Computational design methods and technologies* (Gu & Wang, 2012) : les systèmes de conception paramétrique, le BIM, les environnements virtuels collaboratifs, les systèmes de réalité virtuelle et augmentée, et enfin, les environnements interactifs et intelligents. Parmi ceux-ci, la modélisation paramétrique et le BIM, ici entendu comme BI« Modeling » et non BI« Management », en respect de la norme ISO19650 (Organisation Internationale de Normalisation, 2019) sont deux termes couramment utilisés mais qui se recoupent et sont parfois employés à mauvais escient (Jabi & al., 2017). En effet, ces deux logiques de modélisation partagent l'objectif de l'intégration de données diverses dans le projet architectural mais à des niveaux et par des moyens différents dans le processus.

Ce qu'on entend par *modélisation paramétrique* (repris en (c) à la figure 13) regroupe des outils basés sur des descriptions mathématiques paramétrées et des associations entre points, courbes, surfaces et solides. Dans ce contexte, les paramètres peuvent également caractériser et contrôler la performance, les caractéristiques structurelles, matérielles, sociales, urbaines ou environnementales. Parmi les outils appartenant à cette catégorie, citons Grasshopper© par exemple. Il faut souligner que le processus évolutif mis en œuvre à travers de tels outils paramétriques contraste totalement, par son efficacité, avec les comportements statiques des méthodes de modélisation plus traditionnelles, utilisées pour créer un modèle instancié (Gallas & Delfosse, 2015). Les différents logiciels énoncés sont repris dans un glossaire à l'annexe 2.

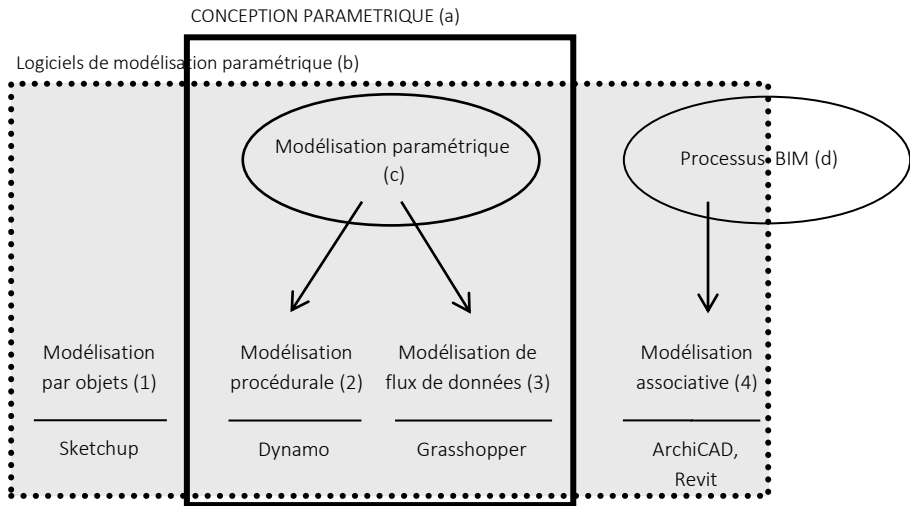


Figure 13. Types de logiciels de modélisation paramétrique, (Stals, Jancart, & Elsen, 2018) sur base des travaux de Janssen et de ses collègues (2016)

Alors que la modélisation paramétrique peut intégrer directement les données dans un processus de morphogénèse, l'intégration des données dans le processus BIM rime avec adjonction d'une couche supplémentaire d'informations au modèle géométrique, cantonnant les données à des éléments statiques complémentaires. Dans ce second cas, les relations paramétriques synthétisent les descriptions paramétriques des composantes d'un bâtiment, plusieurs disciplines confondues (Drogemuller, Crawford, & Egan, 2004). ArchiCAD© est un exemple d'un tel logiciel.

Les logiciels permettant de supporter un processus BIM sont donc en partie des *logiciels de modélisation paramétrique* (b). Dès lors, pour différencier ces deux logiques de modélisation, nous nous appuyons sur la littérature existante, et en particulier les écrits de Janssen et ses collègues (parmi les différentes approches développées pour distinguer et classer les logiciels existants) (Janssen, 2015, 2016; Janssen & Stouffs, 2015). Janssen et al. définissent quatre types de modélisation paramétrique (1-4) en fonction des capacités techniques des outils et du type d'itération que les logiciels peuvent supporter (figure 13). Selon cette classification, la modélisation paramétrique reprend la « modélisation procédurale » (2) et la « modélisation de flux de données » (3), qui s'appuient sur l'itération multi-opérations, soit la plus puissante des

itérations. Celle-ci est utilisée dans les logiciels de *design computationnel* tels que Dynamo© (intégré à Revit©), Grasshopper© (intégré à Rhinoceros©). La « modélisation procédurale » se distingue de la « modélisation de flux de données », la première étant guidée par un processus itératif explicite utilisant la récursivité tandis que la seconde est soutenue par un processus itératif implicite ne supportant pas la récursivité. Par ailleurs, elle contraste avec la « modélisation associative » (4), utilisée dans les systèmes BIM tels que Revit©, ArchiCAD©, qui se caractérise par le type d'itération le plus simple, soit une seule opération, appliquant la même opération simultanément sur plusieurs entités géométriques. Ce fonctionnement limite la capacité d'automatiser le processus de modélisation. La « modélisation par objets » (1) fait quant à elle référence à des logiciels comme SketchUp© par exemple, ne supportant aucun type d'itération. Ce type de logiciel ne crée pas de confusion avec d'autres classifications car nous remarquons qu'il n'est généralement pas considéré comme un logiciel de modélisation paramétrique par les architectes. Nous entendons sous le terme de « CAO traditionnelle » ces deux derniers types de logiciels.

Nous parlons ainsi de manière distincte dans cette thèse d'une part des logiciels « BIM » et, d'autre part, des logiciels paramétriques au processus itératif implicite (tels que Grasshopper©), associés ici au terme « outils de modélisation paramétrique », plus familier aux architectes débutants dans le domaine.

Les termes étant précisés, nous pouvons alors définir la *conception paramétrique* (a). Considérant l'existence d'une forme de conception paramétrique analogique, nous pouvons définir la conception paramétrique comme une méthodologie de conception qui permet, entre autres, de générer des formes à partir de l'exploitation et la manipulation d'une grande quantité de données de type environnemental, acoustique, structurel, social ou encore urbain reprises comme « paramètres ». Dans le processus de conception paramétrique, une fois les règles implémentées, un nombre illimité d'alternatives peut être généré en parallèle (Woodbury & Burrow, 2006). Nous revenons en profondeur sur ce fonctionnement dans la section suivante sur le fonctionnement informatique.

Si l'on examine plus en profondeur les processus de *design computationnel*, Janssen distingue deux types de modélisation (figure 14). Dans le cadre des

logiciels de *modélisation paramétrique* (e), tels que Rhinoceros© ou Digital Project©, l'utilisateur est amené à lier des paramètres et des dimensions à des contraintes géométriques préprogrammées.

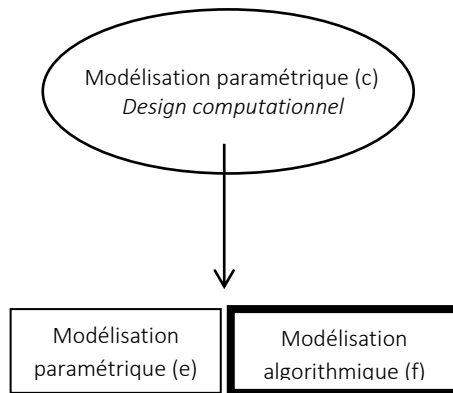


Figure 14. Relation entre les termes utilisés dans le domaine de la conception paramétrique et focus sur la « modélisation algorithmique » appelée plus communément « modélisation paramétrique »

L'exemple à la figure 15 illustre ce fonctionnement : pour créer un cercle dans Rhinoceros©, l'utilisateur utilise la fonction préprogrammée « cercle » et lui fournit des paramètres (dont la position du centre et le rayon). Par contre, pour les logiciels de *modélisation algorithmique* (f), tels que GenerativeComponents© ou Grasshopper©, l'utilisateur est amené à utiliser un langage de programmation textuel ou bien visuel, semblable à un code de programmation informatique, qui lui permet de passer outre les limites de l'interface utilisateur (Leach, 2014). Dans la suite de ce travail, bien que l'appellation « paramétrique » soit conservée car usuellement employée dans le vocabulaire architectural, nous nous concentrerons uniquement sur les logiciels de modélisation algorithmique et plus précisément sur ceux possédant une interface de programmation visuelle.

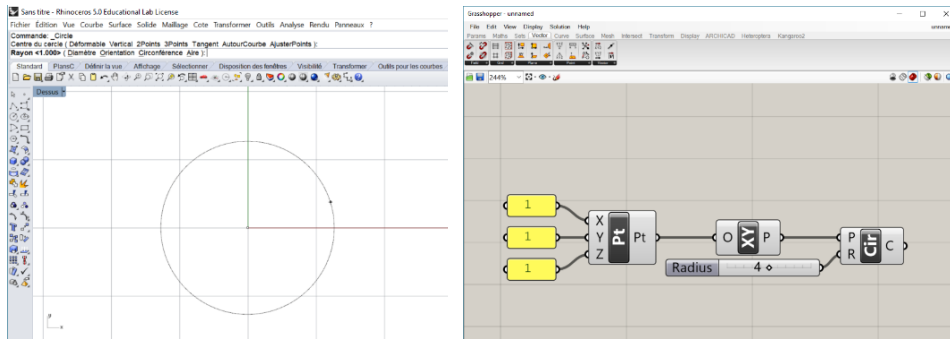


Figure 15. Création d'un cercle par deux logiciels de modélisation paramétrique de type différent. A gauche : Rhinoceros®, à droite : Grasshopper®

Ce choix est effectué étant donné le positionnement particulier de cette thèse, en faveur des pratiques émergentes liées aux nouvelles générations de technologies, et en particulier dans les structures de petite taille. Afin de contextualiser encore davantage, notons dès à présent que les cas d'étude de cette thèse instruisent spécifiquement les usages du logiciel Grasshopper®, développé en 2007 comme plug-in de Rhinoceros®.

Il est un fait que Grasshopper® a été récemment davantage adopté que ses homologues car cet outil, basé sur la programmation visuelle, a permis à des non-spécialistes d'accéder à une forme de programmation sans avoir besoin de développer des compétences de programmation pure, comme l'illustreront nos observations. Tandis que ce mode de programmation est plus facilement accessible et appréhendable, ses potentialités restent à certains égards limitées : son fonctionnement est plus proche de la modélisation paramétrique que de la programmation algorithmique (de Boissieu & Guéna, 2012). Cet outil fonctionne entre autres sur des itérations implicites, ce qui évite d'avoir à gérer des boucles mais ne permet pas la récursivité.

Son utilisation plus soutenue dans le milieu de l'architecture (Cichocka, Browne, & Rodriguez, 2017) est également la conséquence d'enjeux plus concrets. Grasshopper® a en effet fait l'objet de nombreuses mises-à-jour peu après son lancement, en raison notamment de son accessibilité en open source. Une large communauté d'adopteurs actifs ont créé de nombreux forums très bien documentés (annexe 3) et ont développé de nombreux plug-ins. La dernière

mise-à-jour importante date désormais de 2014 (version 1.0), faisant de Grasshopper© un logiciel relativement stable depuis près de cinq ans, soutenu par de nombreux supports et formations.

Les termes ayant été définis, nous abordons la question du fonctionnement informatique de ces logiciels dits paramétriques et, dès lors, deux notions majeures qui s'associent à un tel processus de modélisation : la génération du modèle et la multiplicité des instances.

2.3. Fonctionnement des modeleurs paramétriques du point de vue informatique

Après avoir abordé les conditions de l'émergence du paramétrique dans la pratique architecturale, et après avoir défini les outils ciblés dans le cadre de cette recherche, nous interrogeons leur fonctionnement d'un point de vue informatique. Cette section complète les caractéristiques communes ou les divergences des logiciels paramétriques évoqués en définissant la *modélisation paramétrique*. Cette description plus technique des outils fait sens pour discuter les usages observés de ces modeleurs et décrits dans les sections ultérieures.

Tout d'abord, sur le plan informatique, il n'y a pas de différence entre les systèmes algorithmiques et paramétriques. Les algorithmes par défaut fonctionnent sur des paramètres, et la composante fondamentale d'un système paramétrique est l'algorithme lui-même, appelé le *schéma* ou la *définition* (figure 17) (Dino, 2012). Dino caractérise un algorithme comme un ensemble fini d'instructions qui visent à atteindre un but clairement défini en un nombre fini d'étapes. Un algorithme prend une valeur ou un ensemble de valeurs en entrée, exécute une série d'étapes de calcul qui transforment l'entrée pour produire finalement une valeur ou un ensemble de valeurs en sortie. Dino image ce processus par les instructions d'assemblage d'un meuble ou les recettes de cuisson. Celles-ci sont en quelque sorte des algorithmes informels et plus simples, où les parties du meuble ou les ingrédients de la recette sont les entrées, les meubles finis ou le repas sont les sorties, et le processus d'assemblage ou de préparation est la procédure à suivre.

Pour décrire ce modèle paramétrique, nous reprenons les termes de Janssen qui repart de la notion même d'algorithme :

« Un algorithme génère des modèles composés de géométrie et de propriétés (par exemple, des spécifications de matériaux). Cet algorithme utilise des fonctions et des variables, incluant à la fois des variables dépendantes et indépendantes. Certaines des variables indépendantes peuvent recevoir un statut plus important, aussi bien dans l'interface que dans le modèle paramétrique - on les appelle les paramètres du modèle. » (propos relaté par Frazer, 2016, p.20, traduction personnelle)

Cet algorithme utilise des fonctions et des variables qui peuvent être dépendantes ou indépendantes. Les variables indépendantes qui ont une place importante dans le modèle, sont considérées comme les *paramètres* du modèle. Les attributs qui sont fixes, sont quant à eux, appelés *contraintes* (Hernandez, 2006).

Nous utilisons l'exemple d'Hernandez pour imaginer par la même occasion la définition proposée par Janssen, insistant sur les variables dépendantes et indépendantes (figure 16). Si l'on considère une colonne classique, les paramètres peuvent définir les relations proportionnelles et donc dépendantes entre les éléments de la base, du chapiteau et de l'entablement, et par contre, les variables indépendantes peuvent par exemple être la hauteur.

Nous entrons dans le vif du sujet en nous référant au travail de de Boissieu (2013) pour décrire les composantes d'un *modeleur paramétrique*. Un modeleur est un logiciel informatique permettant de construire un *modèle* géométrique numérique duquel sont produites différentes représentations.

Le terme *modèle*, tel qu'entendu dans le cadre de ce travail, signifie une représentation numérique d'un élément modélisé via un modeleur paramétrique. Ce modèle paramétrique est généré et visualisé au travers de deux types d'interface (figure 17). On retrouve de manière plus traditionnelle la représentation graphique de la géométrie du modèle qui est désignée en tant que *représentation explicite*, tandis que cette représentation est assortie d'une interface de programmation qui est appelée *représentation symbolique*. Cette représentation abstraite reprend des algorithmes propres aux modeleurs (Agbodan, 2002, cité par de Boissieu, 2013).

Ce qui fait la spécificité des modeleurs paramétriques est donc l'existence d'une représentation symbolique ou abstraite. Celle-ci constitue une représentation informée du modèle sur laquelle le concepteur peut intervenir pour transformer le modèle (de Boissieu, 2013).

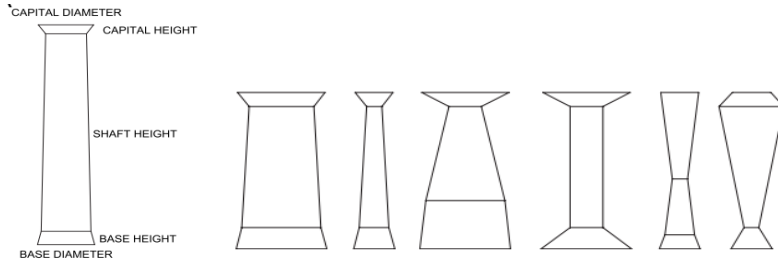


Figure 16. Exemples d'instances différentes à partir de variations paramétriques (Hernandez, 2006)

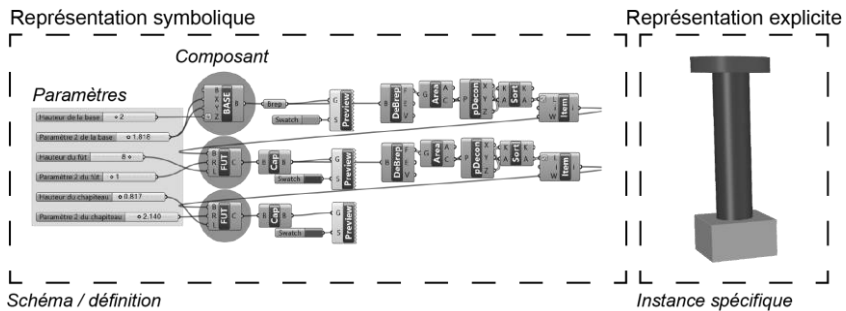


Figure 17. Représentation symbolique et explicite d'un modèle paramétrique

Une fois cette double représentation explicitée, nous pouvons revenir sur les représentations externes en regard des outils de modélisation paramétrique. Akin (2001) avance que l'architecture est un domaine saturé de représentations. Nous avons pu identifier les différents types de représentations externes dans la section 1.5.2. Nous revenons sur deux modes distincts de représentation, à savoir analogue et symbolique, définis par Akin.

Nous avons ainsi pu préciser que les représentations analogues sont des dessins, des esquisses, des modèles physiques ou numériques notamment, qui correspondent en tout cas à la réalité et se prêtent facilement à l'évaluation de performances liées à la composition, l'adéquation contextuelle et la constructibilité par exemple. Les représentations symboliques sont, quant à elles, des descriptions physiques ou mathématiques liées à la définition de performances telles que le transfert de chaleur, la distribution de la lumière et du son, par exemple. Akin positionne les systèmes paramétriques à l'interface, comme des outils de médiation entre le contenu des représentations analogiques et des représentations symboliques. Les outils de conception paramétrique utilisent plusieurs vues. D'un côté, il y a la vue du modèle 3D qui affiche la représentation géométrique (analogue). De l'autre côté, il existe un éditeur qui permet au concepteur d'encoder l'algorithme, à savoir la définition. Cet éditeur est textuel ou visuel.

Au travers de cet éditeur, la conception paramétrique requiert que l'utilisateur construise un graphe acyclique dirigé (*directed acyclic graph – DAG*), composé à la fois de *paramètres* et de *composants* permettant de générer la géométrie (Aish & Woodbury, 2005). A la fin du processus, il existe à la fois cette définition et une instance spécifique qui représente une conception concrète. Le principal effet de la séparation de la définition et de l'instance est de différer les décisions. En effet, la définition illustre les décisions concernant les relations choisies entre les composants et ne tient pas compte des valeurs précises qui dépendent de ces relations. Nous discuterons l'impact de la dissociation de ces deux phases décisionnelles.

Ainsi, le concepteur se doit de définir quatre types d'éléments : les conditions et paramètres de démarrage (entrée), le mécanisme de génération (règles, algorithmes, etc.), l'acte de génération des instances (sortie), et la sélection de l'instance la plus appropriée.

Ces précisions détaillent davantage l'aspect technique d'un modèle paramétrique que le processus de conception paramétrique de manière générale. Pour résumer l'impact d'un tel processus, nous nous appuyons sur la déclaration de Oxman et Gu :

« L'intérêt de la pratique est un passage du dessin d'un objet singulier à la construction d'un processus de conception. Dans le processus de conception paramétrique, une fois les règles mises en œuvre, un nombre illimité d'alternatives de conception peuvent être générées en parallèle. » (Oxman & Gu, 2015, p.479, traduction personnelle)

Pour résumer les apports d'un tel processus de conception, nous nous appuyons sur trois principes définis par Woodbury (2010):

1. Les concepteurs conçoivent des règles et définissent leurs relations logiques dans la création de modèles de visualisation 3D;
2. Les concepteurs peuvent modifier leur modèle à tout moment;
3. Des alternatives de conception peuvent être développées en parallèle à n'importe quelle étape du processus.

En regard de ces propos, nous établissons un lien entre ces trois principes et les recherches de Hudson (2010). Ce dernier cherche à définir les tâches impliquées et les considérations requises dans un processus de conception paramétrique. Pour ce faire, Hudson se base sur les descriptions générales de projets publiées dans la littérature par les praticiens eux-mêmes. Pour compléter cette analyse pouvant relever de biais liés à des intérêts commerciaux notamment, Hudson met en place des expérimentations au sein desquelles il se place en tant que observateur participant. Il définit ainsi cinq approches stratégiques : développement des connaissances, saisie des connaissances, construction du modèle, investigation de conception, documentation de construction. Ainsi, les trois premières stratégies touchent au développement de la description du problème, à la formulation de solutions et au choix des paramètres afin de générer le modèle.

En effet, certains logiciels d'architecture appliquent automatiquement des paramètres à la géométrie au fur et à mesure que le modèle est réalisé. Ce fonctionnement se déroule de la sorte dans Revit© par exemple. D'autres logiciels requièrent que le concepteur programme les paramètres au moment

de la modélisation, ce qui nécessite une capacité complémentaire au simple fait de modéliser en 3D.

Dans ce second cas, les concepteurs doivent modéliser non seulement l'artefact conçu mais aussi une structure conceptuelle qui guide la variation (Aish & Woodbury, 2005; Kolarevic, 2005). Cette approche exige du concepteur qu'il élabore une étape intermédiaire entre l'idée et la conception. Dans cette étape, le concepteur produit la description algorithmique de la conception prévue (Leitão, 2013) incluant la logique et les dépendances entre les paramètres d'entrée, les opérations géométriques dépendantes. C'est cet algorithme qui, lors de l'exécution par un ordinateur, crée le modèle 3D. Par conséquent, on dit que ce processus précède la génération de la forme. Ce changement majeur est lié à un passage fondamental de la modélisation d'un « objet » conçu, à la modélisation de la « logique » de son design (Leach, 2009 cité par Dino, 2012). Si la représentation numérique est désormais le processus, nous pouvons considérer que les architectes ne conçoivent plus uniquement un bâtiment mais bien son processus. Cela permet à l'architecte d'explorer au-delà des hypothèses de conception initialement envisagées et ce, d'une manière qui serait impossible avec des approches de conception et de modélisation traditionnelles (Aish & Bredella, 2017).

La deuxième notion qui transparaît dans la définition d'Oxman et Gu est la multiplicité des instances, renforcée par les propos de Hernandez (2006, p.310) : *“parametric design is the process of designing in environment where design variations are effortless, thus replacing singularity with multiplicity in the design process”*.

Ce propos indique que le concepteur a, par ce biais, la capacité de générer différentes configurations spatiales et techniques à partir d'un modèle paramétrique initial en éditant les paramètres. Lorsqu'un paramètre change, les changements se propagent à travers la chaîne de dépendances des paramètres modifiés, induisant que d'autres paramètres s'adaptent automatiquement (Hernandez, 2006; Ostwald, 2012). En contrôlant les paramètres, il est donc possible de créer des instances de conception particulières à partir d'une gamme potentiellement infinie de possibilités (Kolarevic, 2005).

Ce processus induit donc une adaptabilité issue de la réactivité des logiciels de modélisation paramétrique. En effet, l'évolution possible des critères de

conception rendent les modèles paramétriques particulièrement utiles pour l'exploration conceptuelle. Cependant, Dino met en garde car les systèmes paramétriques sont souvent confondus à tort avec un style architectural émergent plutôt qu'à une méthode de modélisation (Dino, 2012). Une prise de conscience critique des potentiels et des limites des systèmes paramétriques est donc essentielle pour leur utilisation efficace lors de la conception. En effet, conjointement à la confusion terminologique que nous avons évoquée précédemment, les architectes sont peu informés et conscientisés au sujet des nouvelles technologies. Nous aborderons l'appréhension des outils et tenterons d'en mesurer les effets.

Les spécificités du fonctionnement des outils de modélisation paramétrique et leur impact sur le processus de conception sont étudiés par de nombreux chercheurs. Chokhachian & Atun (2014) tentent par exemple de définir un cadre de réflexion qu'ils nomment PDT pour Parametric Design Thinking.

La conception paramétrique ayant fondamentalement changé le rapport au problème conceptuel (Schnabel, 2012), les auteurs essaient de mettre en pratique un système capable de traiter des problèmes complexes non seulement dans un cadre théorique, mais aussi dans des situations pratiques. La structure principale du modèle PDT est basée sur la résolution de problèmes complexes grâce à la mise en œuvre d'outils imposant par eux-mêmes des contraintes au concepteur, au même titre que les contraintes qu'il se fixe telles que le concept.

Le PDT est constitué de quatre sous-systèmes de conception identiques au modèle d'Ostwald (2012) explicité précédemment (représentationnels, proportionnels, indexés, opérationnels). Dans ce modèle, les outils de conception assistés par ordinateur servent de facilitateurs afin de faire le lien entre les activités de conception et, pour éviter d'être dans un processus linéaire incomplet et inefficace à l'image de la conception traditionnelle.

Nous retenons de ce modèle l'intégration des outils comme un facteur nouveau intégrant le modèle du processus de conception en architecture.

Le fonctionnement des modeleurs ayant été explicité, nous développons dans la section suivante les conséquences qu'il induit à différents niveaux.

2.4. Caractérisation du paramétrique à partir des discours existants

Dans le monde entier, de plus en plus d'ouvrages sont réalisés grâce à des méthodes de conception paramétrique. Les outils de modélisation paramétrique ont fait l'objet de nombreuses publications dans la littérature de ces trente dernières années principalement. Ces outils ont des conséquences à la fois positives et négatives sur les tâches, les résultats et la perception des concepteurs. Cette section a pour vocation d'explicitier les points de vue avancés par les chercheurs.

Nous identifions tout d'abord les contextes d'étude auxquels les chercheurs ont généralement recours afin de cerner notre champ d'investigation. Cette cartographie confirme la pertinence de notre terrain d'étude.

Nous allons ensuite au-delà de l'identification de problématiques strictes liées à la modélisation paramétrique et nous identifions quatre catégories dans lesquelles des changements profonds ont lieu, en raison des spécificités informatiques avancées dans la section précédente : démarche conceptuelle et cognition, recherche morphologique, compétences, flux de travail.

Bien que les impacts de ce type de modélisation se recoupent et s'influencent mutuellement, nous commençons par discuter les impacts sur la démarche conceptuelle et la cognition et, nous poursuivons avec la recherche morphologique induite par cette typologie d'outils. Ces deux premiers aspects nous amènent aux compétences personnelles nécessaires pour aborder ce type de modélisation. Nous étudions ensuite l'impact sur le flux de travail.

Le tableau 1 ci-après récapitule les catégories que nous avons identifiées à partir de la littérature et que nous développons dans les sous-sections suivantes.

Table 1. Catégorisation des spécificités paramétriques issues de la littérature

Contexte d'étude du paramétrique	Terrains d'étude généralement questionnés
Démarche conceptuelle et cognition	Considération de l'effort cognitif nécessaire : anticipation cognitive
Recherche morphologique	Diversification du champ de recherche morphologique
Compétences	Développement d'une culture numérique et de compétences
Flux de travail	Remise en question du flux de travail par l'influence des compétences nécessaires

2.4.1. Contexte d'étude du paramétrique

La littérature a tendance à annoncer que la pratique paramétrique est désormais établie dans les bureaux d'architecture (Harding, Joyce, Shepherd, & Williams, 2012; Yu, Gero, & Gu, 2015), avançant des propos tels que : « *Récemment, la conception paramétrique - l'une des technologies émergentes de CAO - a suscité un vif intérêt de la part des concepteurs et des étudiants en design, en particulier pour la "créativité" qu'elle soutient, comme en témoignent les formes ou styles uniques qu'elle génère.* » (Lee et al., 2014, p.265, traduction personnelle). Cependant, ces études avancent rarement des chiffres quantifiant et décrivant l'état des pratiques réelles dans les bureaux d'architecture. La majorité des études se font en effet dans un contexte expérimental académique ou professionnel, ou dans de grands bureaux d'architecture ne reflétant pas la pratique de la majorité des architectes. En effet, une enquête européenne étudiant la profession d'architecte en Europe en 2018 (Architects' Council of Europe, 2019) révèle que 99% des bureaux d'architecture sont composés de moins de dix personnes, et même 71% sont composés d'une seule personne. Cette étude a par ailleurs démontré que la quantité de bureaux de taille moyenne diminue continuellement, en faveur de structures plus petites.

Le contexte académique est un terrain d'étude privilégié par les chercheurs car il est aisément accessible et modulable. Une méthodologie concise peut y être appliquée sur des profils d'opérateurs choisis (exemple comparaison entre

ingénieurs et architectes, entre novices et experts,...). Le protocole d'analyse est ainsi maîtrisé. Nombreuses sont les études qui sont publiées à ce sujet, certaines affirmant dès le départ leur volonté de s'inscrire dans un contexte académique, d'autres faisant fi de l'influence potentielle du contexte d'étude :

- Faute de ne pas pouvoir recruter des concepteurs à la fois expérimentés dans la pratique architecturale et dans l'usage des outils de modélisation paramétrique, Chien et Yeh (2012) ont finalement établi un contexte expérimental constitué de trois étudiants diplômés qui se sentent à l'aise avec l'utilisation d'outils de conception paramétrique et qui ont au moins quatre années de formation en conception architecturale. L'objectif de cette recherche est d'observer comment les concepteurs se comportent face à des résultats inattendus, notamment suite à l'utilisation d'outils paramétriques ;
- Iordanova et ses collègues (2009) mettent en situation 10 étudiants de troisième (et dernière) année de bachelier prenant part à un atelier d'architecture afin d'examiner la créativité en situation de conception avec des outils paramétriques et tenter d'établir certains critères pour évaluer la créativité des opérateurs. A l'issue de l'expérimentation, les auteurs affirment que le processus exploratoire a été différent en fonction des outils de modélisation utilisés et la créativité des participants a été enrichie par les outils de modélisation paramétrique ;
- Abdelmohsen et Massoud (2015) ont observé 18 étudiants participant à un des studios d'architecture de bachelier. La question soulevée dans cette recherche est formulée comme telle : « *La capacité de visualiser par ordinateur des représentations morphologiques complexes garantit-elle une compréhension approfondie de l'essence de l'idéation architecturale et de la génération de concepts ?* ». Les auteurs ont observé qu'il n'existe pas de dichotomie claire entre les deux aspects, mais plutôt une relation complexe qui est fortement influencée par trois facteurs importants : le point de départ conceptuel, l'expérience utilisateur et la pensée algorithmique ;
- L'étude de Schnabel (2012) a pour objectif d'analyser la transposition des connaissances de conception paramétrique à leur usage réel en tant que ressource première pour la conception d'un projet

architectural. Pour ce faire, l'auteur a suivi le travail de deux groupes de 15 étudiants de Master participant à un cours de projet ;

- Une étude plus générale, relatant une observation de six ans, propose une méthode développée pour le contexte académique sous forme de puzzle (*parametric puzzle*). Cette méthode a été instaurée pour soutenir le passage des étapes du processus paramétrique transcrites sur papier, à la génération du modèle paramétrique numérique (Gallas, Jacquot, Jancart, & Delvaux, 2015).

Les chercheurs s'intéressent également aux professionnels et à la manière dont ceux-ci appréhendent les outils en regard de leur expérience architecturale (Yu et al., 2015). Ces différentes études se font dans un environnement contrôlé sous conditions expérimentales, hors d'une pratique quotidienne et des contraintes usuelles que cette pratique pourrait engendrer :

- Les profils choisis par Yu et ses collègues (2015) sont huit architectes professionnels ayant une moyenne de huit ans d'expérience et pas moins de deux ans d'expérience en conception paramétrique. L'expérimentation consiste en deux sessions de design au sein de deux environnements différents afin d'évaluer les différences comportementales cognitives des concepteurs travaillant dans un environnement de conception paramétrique et dans un environnement de modélisation géométrique traditionnelle. Les résultats de l'étude indiquent que le comportement des concepteurs n'est pas significativement affecté par l'environnement informatique qu'ils utilisent. Cela peut s'expliquer par le fait que l'expertise élevée des concepteurs a plus d'influence que l'environnement de conception. La principale contribution de cette étude est que le comportement cognitif des concepteurs ne varie pas significativement relativement aux outils numériques adoptés ;
- Lee, Ostwald et Gu (2016) ont mis en place une expérimentation, mettant en situation de conception dans un environnement paramétrique des architectes australiens et suédois. Cette recherche développe un nouveau cadre et une nouvelle méthode de recherche combinant des approches cognitives et linguistiques pour étudier la conception paramétrique. Elle ouvre des pistes potentielles pour

suggérer une évolution conceptuelle importante dans la perception de la cognition du design d'un point de vue linguistique.

Le fait que ces études soient basées sur des expériences simulées et menées par des profils ciblés, représente une limite de ce type de contexte. Le déroulement et l'issue de ces expériences pourraient ne pas être exactement les mêmes que celles entreprises dans une pratique de conception réelle en bureau.

D'autres chercheurs sont désireux d'interroger la pratique paramétrique développée au sein même des bureaux. Pour ce faire et afin de baser leur étude sur une pratique paramétrique stable, les chercheurs observent généralement des agences d'architecture de grande envergure dont la pratique paramétrique est implantée depuis plusieurs années :

- Dennis Shelden interroge la pratique paramétrique chez Gehry Partners et la place de l'outil dans le processus de conception des projets de cette agence. Cette recherche porte essentiellement sur la représentation numérique de géométries complexes et la capacité à décrire la constructibilité des enveloppes conçues ;
- Wortmann et Tuncer (2017) examinent trois cas d'étude de grande envergure via différentes traces. Cette comparaison illustre comment le paramétrique permet d'élargir le spectre des formes architecturales, d'intégration des préoccupations relatives à l'environnement, à la structure et à la constructibilité et de manière plus globale de soutenir une certaine forme de complexité.
- Peters et Whitehead (2008) relatent l'exploration du potentiel des formes libres par l'agence Foster & Partners au travers de six projets. Ils décrivent plus amplement deux cas d'étude qui reflètent jusqu'où l'agence a poussé l'usage de méthodes génératives algorithmiques. Les recherches nécessaires ont été menées par la création du *Specialist Modelling Group* en tant que consultant interne de l'agence, initiant une tendance similaire dans d'autres bureaux d'architecture.
- De Boissieu (2013) se focalise précisément sur des pratiques stables, gérées par des spécialistes experts en paramétrique. Les recherches de cette chercheuse se basent sur l'hypothèse que la pratique

paramétrique en bureaux d'architecture est réalisée par des spécialistes et non par les architectes chargés de la conception (Kolarevic, 2005; Szalapaj, 2000). A l'issue des entretiens menés, de Boissieu confirme la présence d'experts de la modélisation paramétrique, distincts des acteurs de la conception dont elle énumère la présence chez Foster and Partners, Gehry Partners, Ateliers Jean Nouvel notamment, toutes au rang de grandes agences. La plupart du temps, ces agences se dotent d'individus ou d'équipes « experts » de la modélisation paramétrique qui interviennent en consultance au sein du projet (de Boissieu, 2013; Shelden, 2002). Un « expert » est entendu ici comme un professionnel reconnu, disposant de compétences spécifiques et reconnues (Lecourtois, 2012).

De Boissieu interroge également la pratique paramétrique de deux agences de plus petite envergure, comparables aux cas d'étude de cette thèse. L'agence Objectile réalise des projets de moindre ampleur (e.g. installations artistiques, panneaux de bois) et revendique la mise en place d'un « continuum » de la conception à la fabrication grâce à l'usage de la modélisation paramétrique couplée aux machines à commande numérique. Dans ce cas d'étude, la pratique paramétrique s'opère différemment et le modèle paramétrique est développé simultanément à la conception architecturale. De Boissieu relève la grande proximité entre ce profil de praticiens, les acteurs de la modélisation paramétrique et les éditeurs de logiciels ou les enseignants et les chercheurs inscrits à l'université. Ce type de pratique peut être associé à de la « recherche par le projet » (dite « *research by design* ») et a mené, dans ce cas, à la formulation des concepts d'*objectile* et d'*associativité* (de Boissieu, 2013).

La chercheuse a également interrogé Hugh Dutton, responsable de l'agence HDA, qui revendique un intérêt pour la modélisation informatique. Pour leurs projets, conception et modélisation sont menées en interne mais vraisemblablement par des acteurs différents, ayant une spécialité reconnue. Il s'agit d'une coopération sur le mode de la consultation interne distinctement de la conception.

Ces deux derniers entretiens ouvrent la voie d'un questionnement de la pratique paramétrique dans de plus petites agences d'architecture.

Cependant, les résultats n'ont pas été traités en fonction de la taille de l'agence mais de la stabilité de la pratique paramétrique et de la présence d'une expertise forte dans le domaine.

A notre connaissance, il n'existe qu'une seule étude amorçant véritablement un questionnement spécifique de la pratique des petits bureaux d'architecture. Cette étude avait pour ambition d'interroger les pratiques numériques générales des architectes autrichiens et anglais travaillant dans de petits bureaux d'architecture, où la plupart des diplômés travaillent après leurs études. Il s'agissait bien de récolter leurs opinions par des questionnaires et non d'observer les pratiques d'architectes sur le terrain. L'objectif à terme était de pouvoir adapter l'enseignement aux pratiques réelles. Cependant, en raison du manque de participation des architectes anglais interrogés, cette étude n'a pu être considérée que pour les 107 répondants de la région autrichienne questionnée (Dokonal et Knight, 2008). Le terrain d'étude choisi par ces chercheurs révèle que 80% des bureaux d'architecture sont constitués de moins de 9 personnes et que 60% sont constitués de moins de 5 personnes, confirmant l'importance et la représentativité de ce terrain d'étude.

Plus spécifiquement en Belgique, la dernière étude portant sur l'utilisation des outils numériques par les architectes a été réalisée en 2008 (Weytjens, Verbeeck, & Verdonck, 2009). L'objectif de cette recherche, qui s'adressait principalement à la partie nord du pays, était d'évaluer l'impact de différents types d'outils d'aide à la conception à travers le processus de prise de décision. Cette recherche ne portait donc pas spécifiquement sur le rôle des outils numériques dans les pratiques architecturales. Les outils de conception ont plutôt été classés en six types, en fonction du rôle qu'ils jouent tout au long du processus de conception : outils de connaissance, outils de communication, outils de modélisation, outils de présentation, outils de structuration et outils d'évaluation et d'analyse.

Ces différents contextes mettent en évidence l'importance du choix du terrain d'étude, impactant les processus de conception mis en place et dès lors observés et étudiés.

Nous identifions donc ici un manque de connaissances quant aux pratiques numériques et plus particulièrement paramétriques des petits bureaux, représentant la majorité des bureaux d'architecture. Il est essentiel d'interroger

les architectes praticiens des bureaux de petite taille, pouvant être non-expérimentés, novices ou experts dans l'usage des outils de modélisation paramétrique afin de comprendre comment la technologie est intégrée ou non à leur pratique quotidienne et quelles sont les contraintes auxquelles ils font face.

Le tableau 2 résume ce panel de recherches antérieures et souligne (dans la colonne grisée) le peu d'intérêt pour les pratiques des PME en général, et pour l'utilisation des outils paramétriques en particulier.

Table 2. Regard sur les recherches effectuées sur les pratiques numériques et paramétriques en architecture. Pour chaque colonne (catégorie de participants observés), les signes moins (-) et plus (+) indiquent dans quelle mesure ces participants connaissent la technologie, selon les auteurs respectifs.

2.4.2. Démarche conceptuelle et cognition

Le fonctionnement des outils de modélisation paramétrique décrit dans la section 2.3 explicite le changement clair de fonctionnement comparé aux logiciels de CAO « traditionnels ». Une des premières conséquences notifiées dans la littérature est l'augmentation de l'effort initial dans la génération d'un modèle paramétrique. La programmation des paramètres décrivant le processus, et non plus uniquement l'artefact en cours de conception, est un changement majeur dans le processus de conception. La réflexion sur les paramètres à prendre en considération, ainsi que leur mise en place, est une tâche essentielle et non négligeable. Ce passage de la modélisation de l'artefact à la modélisation du processus permettrait cependant de mieux comprendre la structure conceptuelle de l'objet à concevoir (Aish & Woodbury, 2005).

Dino (2012) explique à quel point la modélisation paramétrique exige de l'intentionnalité: elle impose au concepteur de générer l'algorithme avec beaucoup de précision avant de pouvoir entamer l'exploration paramétrique. Les principes algorithmiques qui sous-tendent les modèles paramétriques fonctionnent en effet de manière relativement rigide, de sorte que le changement ne peut être accepté que s'il s'inscrit dans la définition du problème traité. Une reformulation drastique d'un problème, nécessitant une modification notable de l'algorithme, peut provoquer la remise en question complète du modèle paramétrique (Gerber, 2007, cité par Dino, 2012). De plus, au fur et à mesure que la structure du graphique paramétrique devient complexe, sa flexibilité et sa capacité à s'adapter à l'évolution des contraintes et des exigences s'en trouvent réduites. La modification profonde du schéma lors de l'exploration conceptuelle est une tâche particulièrement coûteuse (Davis et al., 2011b).

De ce fait, la souplesse reconnue de la modélisation paramétrique résulte davantage des paramètres et s'y limite, alors que le schéma est relativement peu résistant au changement. Gerber (2007, cité par Dino, 2012) souligne la nécessité de refaire sans cesse le modèle paramétrique à mesure que la topologie du projet change. Burry (2007) soutient également qu'il est courant dans la modélisation paramétrique que le concepteur soit obligé de modifier ou de remodeler le schéma relationnel.

Par ce biais, le paramétrique augmenterait la complexité de la tâche du concepteur (Aish & Woodbury, 2005). Dès lors, pour qu'un concepteur tire parti efficacement d'un logiciel paramétrique, il doit anticiper les différentes directions que le projet peut prendre afin de programmer les géométries et leurs relations les unes avec les autres (de Boissieu, 2013; Smith, 2007). Un des propos de Smith complète cette notion en soulignant qu'une mauvaise anticipation des paramètres peut nécessiter de recommencer le processus complet :

« Lorsque vous modélisez à l'aide de paramètres, vous programmez en suivant des étapes logiques et procédurales similaires à celles de la programmation logicielle. Vous devez d'abord conceptualiser ce que vous allez modéliser à l'avance et sa logique. Vous programmez, corrigez et testez ensuite toutes les ramifications possibles là où le programme paramétrique pourrait échouer. Ce faisant, vous risquez de trop imposer ou de constater que vous devez ajuster le programme ou recommencer à nouveau la programmation parce que vous avez adopté la mauvaise approche. » (Smith, 2007, p.2, traduction personnelle)

Les spécificités du processus de modélisation ainsi que l'anticipation nécessaire pour programmer la géométrie sont deux facteurs de changement du développement conceptuel des projets (Foster & Partners, 2006; Oxman & Oxman, 2014).

Des chercheurs se sont attelés à quantifier ces changements pour mesurer la part du processus cognitif dédiée aux spécificités paramétriques. Yu et ses collègues (2015) distinguent ainsi, d'un point de vue cognitif, les *connaissances de conception* qui sont issues notamment de l'expertise du concepteur, et les ressources nécessaires pour définir les règles algorithmiques. Ces chercheurs ont remarqué que l'effort cognitif initial dédié aux *connaissances de conception* domine malgré tout sur les règles algorithmiques à mettre en place (figure 18). Au fur et à mesure que le processus de conception progresse, l'effort cognitif concernant les *connaissances de conception* passe de 100% à 60%. Simultanément, l'effort cognitif concernant l'élaboration des règles algorithmiques passe de 0% à 40%. Par conséquent, ces chercheurs déduisent que dans le processus de conception paramétrique, les concepteurs consacrent encore beaucoup d'efforts à la *connaissance de la conception*, entendu comme

la prise en considération du contexte d'intervention, du programme notamment, tel que dans les processus de conception dits « traditionnels », tandis que les définitions algorithmiques sont principalement utilisées pour soutenir leur intention de générer des modèles. Les concepteurs commencent par prendre en compte les questions liées aux *connaissances de la conception* telles que les exigences du client et les fonctions du programme ; lorsque la conception progresse, ils consacrent progressivement plus d'efforts cognitifs à la création des définitions algorithmiques en elles-mêmes.

Du point de vue du concepteur, les outils de modélisation paramétrique peuvent offrir aux architectes des possibilités de conception à la fois grâce aux *connaissances de la conception* et à l'algorithme des règles, ce qui ouvre de nombreuses possibilités : des formes complexes peuvent être générées et gérées plus efficacement, des paramètres et des données externes intégrés et liés à la conception pour produire des solutions plus rationnelles, des variations de conception développées en parallèle et des changements peuvent finalement être facilement effectués à différentes phases de la conception (Harding et al., 2012; Yu et al., 2015).

Nous définissons cette vision comme une des deux postures théoriques potentielles face à l'utilisation des outils de modélisation paramétrique. Le paramétrique vient en support de la conception, comme outil de représentation.

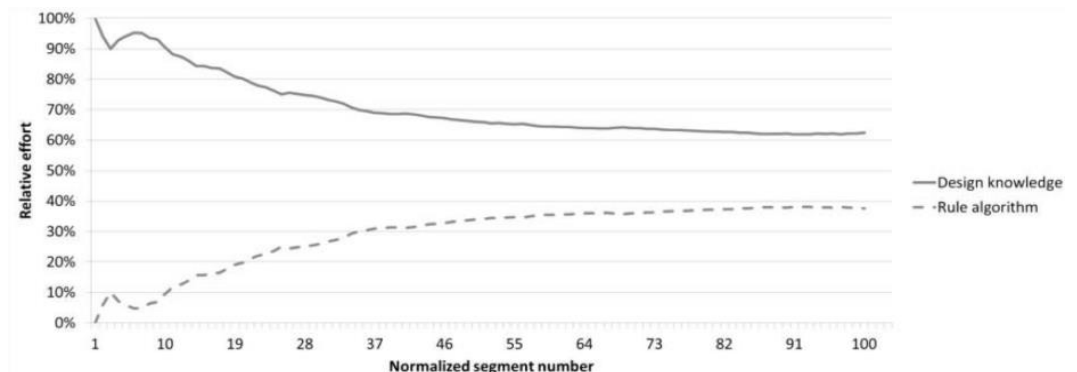


Figure 18. Comparaison de l'évolution de l'effort cognitif dédié aux connaissances de conception et aux règles algorithmiques, par Yu et ses collègues (2015)

Au-delà de la tâche que cela implique, une réflexion sur l'impact conceptuel éventuel émerge des recherches. On note ici l'existence d'une deuxième posture théorique considérant les outils de modélisation paramétrique comme des outils d'aide à la conception. En effet, la créativité est caractérisée par l'inconscience et l'imprécision (Bukhari, 2011) et, par conséquent, est mieux servie par un processus de conception qui englobe le changement. D'une part, les outils de conception traditionnels n'appuient pas facilement le changement parce qu'ils exigent trop de temps et d'efforts pour modifier les modèles et, d'autre part, l'ordinateur est devenu un outil essentiel pour le processus de conception, qui a modifié et continue de modifier, la façon dont les architectes conçoivent (Kolarevic, 2005).

Nous discuterons les deux postures théoriques que nous venons d'esquisser et l'ambiguïté qui en découle, à la lumière des résultats recueillis.

Par ailleurs, la diversité des possibilités de recherche morphologique que nous développons à la section suivante, complexifierait la prise de décision du concepteur. Ce potentiel impact est un sujet largement discuté dans la littérature. En effet, pour les concepteurs qui codent, l'activité de codage est considérée comme un canal de créativité et comme un moyen de représenter des idées de conception qui va au-delà du dessin visuel ou graphique (Burry & Burry, 2008; Leitão, Caetano, & Correia, 2016; Oxman, 2017). Les outils actuels ont donc aidé la pensée créative de certains concepteurs. Cependant, ces propos avancés sont d'une part contrebalancés par les défenseurs du papier-crayon (Léglise, 2016) et, d'autre part, par les partisans de la technologie qui portent un regard critique sur l'implication qu'a son usage. Hesselgren avait notamment déclaré en tant que directeur Recherche et Développement du bureau KPF London que « *l'avantage d'utiliser GenerativeComponents est qu'il [l]'aide à réfléchir à ce [qu'il fait]. L'inconvénient est qu'il [l]'oblige à penser ainsi.* » (Aish & Woodbury, 2005, p.161, traduction personnelle). Les outils de modélisation paramétrique forcent en effet les concepteurs à quantifier leur conception en composants et en associations de composants pour générer des variations qu'ils aimeraient explorer davantage (Salim & Burry, 2010).

Dès lors, ce processus peut en quelque sorte limiter la découverte créative si une modification profonde de la définition algorithmique ne peut pas être envisagée par manque de temps par exemple. Le cas contraire entraîne quant à lui une grande perte d'efficacité (Smith, 2007). Dans ce sens, Kilian (2006 cité

par Dino, 2012) souligne le risque que l'approche de modélisation paramétrique puisse même geler prématurément la conception en raison des investissements précédemment réalisés dans la définition paramétrique, plutôt que de soutenir une exploration plus détaillée dans les phases ultérieures de la conception. Par conséquent, selon Kilian, la modélisation paramétrique offre une zone exploratoire restreinte, ne permettant pas de générer de réelles variations conceptuelles.

A ce sujet, la question de la maîtrise du processus de génération de la forme et de la maîtrise de la forme elle-même suscite encore débat en regard de l'utilisation d'outils de modélisation paramétrique. Certains architectes perçoivent les outils de modélisation paramétrique comme figés, inadaptés aux premières étapes de la conception. Ils craignent également une perte totale de contrôle sur le processus de conception, au profit de l'ordinateur qui se substituerait à leur expertise.

Carpo discute notamment dans ses écrits cette possible perte d'autorité de l'architecte comme auteur du projet. Il explique que « *les ordinateurs n'imposent pas en eux-mêmes des formes, pas plus qu'ils ne renvoient à des préférences esthétiques.* » (Carpo, 1993, p.16). Il rappelle ainsi qu'il est du ressort des architectes de conserver, ou non, un certain degré d'intentionnalité au sein de leur démarche formelle.

Picon questionne l'architecte Cohen à ce sujet afin d'identifier si *l'imprévisibilité* peut amener une valeur positive dans le processus de conception. Cohen l'envisage comme suit :

« J'ai dit que les règles et le contrôle étaient essentiels. Mais j'ai insisté sur l'alliance du contrôle et de l'imprévisibilité. Ce que je veux dire, c'est que la géométrie représente un moyen de découvrir des formes que l'on ne peut ni anticiper ni imaginer à l'avance, mais qui sont néanmoins produites au moyen de règles. La possibilité de permuter ces intersections et de les contrôler à l'aide de tangences spécifiques m'intéresse énormément. Ce sont la lutte contre le hasard, le combat que requiert toute détermination géométrique, l'obstination à forcer les surfaces à se comporter comme on le souhaite qui me motivent. »
(entretien avec Picon & Razavi, 2011, p.39)

Bourbonnais démontre également que l'utilisation des outils paramétriques porte en elle, intrinsèquement, la promesse d'un renouvellement des principes de maîtrise de la forme. Analysant le processus de conception de plusieurs architectes exploitant la modélisation paramétrique, il a investigué les notions de « lâcher prise » ou au contraire de « laisser aller », de « laisser faire ». Ces deux derniers termes sous-entendent que la machine génère des formes de manière complètement autonome avec une intervention de l'architecte uniquement pour choisir une des propositions finales, plaçant la machine et le concepteur dans un rapport de force. Il ressort des observations de Bourbonnais qu'il est plus judicieux de parler en architecture de « lâcher prise », car le concepteur, même s'il laisse l'ordinateur travailler seul durant un certain laps de temps, reste l'unique responsable de la solution choisie, elle-même retravaillée, et ainsi de suite dans un processus itératif qu'il maîtrise (Bourbonnais, 2015). De même, Dino (2012) l'envisage comme la délégation de tâches sans que cela signifie que le système de génération devienne le concepteur, mais que le concepteur humain externalise et code une partie de son intelligence de travail dans le logiciel pour effectuer certaines tâches de conception ou résoudre des problèmes.

Les propos suivants de Bourbonnais font écho à cette réflexion :

« Ni laisser-aller, ni inattention, mais plutôt l'inverse : la sensibilité du « lâcher prise » peut être présentée comme la capacité pour le concepteur de laisser, momentanément, le programme se charger de transformer, modifier et faire varier la forme grâce à un algorithme particulier. Contrairement au « laisser aller », le « lâcher prise » oblige une reprise en main de la forme par l'architecte, qui doit par la suite l'insérer dans son monde à lui, chargé de considérations personnelles. [...] Ils restent concentrés pour recadrer, rediriger, réorienter la prise de forme, de manière intuitive ou analytique, jusqu'à ce qu'ils en découvrent, perçoivent et inventent un sens. Il se produit une sorte de dépossession momentanée : l'architecte ne contrôle plus directement les mutations de la forme, mais seuls les critères de variations sont à sa portée ; il assure le relais entre forme et information. » (Bourbonnais, 2015, p.112).

Les changements conceptuels engendrés par l'utilisation d'outils de modélisation paramétrique nous amènent à aborder l'extension potentielle du champ de recherche morphologique tel que nous venons de l'évoquer.

2.4.3. Recherche morphologique

La recherche morphologique par le biais du paramétrique est largement discutée dans la littérature. Foster and Partners (2006) évoquent que l'approche paramétrique est une approche de conception éditable qui offre un haut degré de contrôle géométrique combiné à la capacité de générer rapidement des variations. Une modification d'un paramètre d'entrée déclenche une modification simultanée du modèle, générant des variations sur le modèle tout en maintenant la cohérence sous-jacente du schéma (Dino, 2012). Les technologies récentes permettent d'aller bien au-delà de l'exploration des possibilités traditionnelles, favorisant ainsi le développement et la prolifération de formes complexes, de nouveaux modèles et de techniques de production avancées. Nombreux chercheurs tels que Aish et Woodbury (2005), Killian (2006), Smith (2007), Harding et ses collègues (Harding et al., 2012) et plus récemment Caetano, Santos et Leitao (2015), ou Aish et Bredella (2017) confirment l'intérêt de la modélisation paramétrique pour faciliter la découverte de nouvelles formes. Par la manipulation des paramètres, les concepteurs peuvent exprimer et explorer des idées variées au-delà des limites de leurs propres compétences en dessin (Kolarevic, 2003; Lee, Gu, & Williams, 2014). Pour certains, l'ordinateur « *n'éradique pas l'imagination humaine, mais en étend plutôt les limites potentielles [...] il fournit les moyens d'exploration, d'expérimentation et d'investigation dans un domaine alternatif* » (Terzidis, 2004, p.206, traduction personnelle).

Cette posture semble répondre à l'une des problématiques soulevées dans la section sur les outils numériques en architecture. En effet, ceux-ci ne semblent plus pouvoir répondre aux attentes en matière d'exploration et de résolution des ambiguïtés durant la conception. Il ne suffit plus que les outils de conception numériques puissent modéliser une solution statique de la conception. Ce qui est important, c'est que les outils de conception soient capables de traiter les règles de conception sous-jacentes à partir desquelles une gamme de solutions potentielles est alors explorée et, ainsi, appliquée de

façon appropriée au monde de la construction (Foster & Partners, 2006; Laiserin, 2009). Cependant, l'utilisation du paramétrique comporte un risque potentiel, car les variations peuvent être trop abstraites et seulement virtuellement viables (Hanna & Turner, 2006, cités par Lee et al., 2014). Par ailleurs, la génération de différentes variables accroît la complexité de prise de décision sur le plan de la conception et augmente le nombre d'éléments à prendre en considération (Aish & Woodbury, 2005).

Cette ambiguïté de points de vue nous mène à étudier de plus près le contexte des recherches qui définissent l'impact du paramétrique sur la recherche morphologique. Chien et Yeh (2012) avancent que les méthodologies des expérimentations ne sont pas toujours réellement explicitées, voire que le cadre de recherche n'est pas pris en considération. C'est notamment au travers d'une de leurs études explorant la relation entre les résultats inattendus générés par les outils de modélisation paramétrique et le processus créatif de conception qu'ils mettent en évidence l'importance de l'expertise des sujets.

Les acteurs de cette étude sont des étudiants de premier cycle apprenant à utiliser des outils de conception paramétrique. Les trois acteurs participants ont produit des résultats inattendus, souvent causés par des réglages de paramètres complexes et des liens erronés entre les données d'entrée et de sortie. Les auteurs avancent que les résultats inattendus induits par des paramètres complexes résultent principalement du manque de compréhension de la programmation informatique, des mathématiques et en particulier de la géométrie plutôt que d'un impact réel des outils de modélisation paramétrique. Les études réalisées chez des étudiants ne reflèteraient donc pas véritablement la réalité des pratiques architecturales.

Par ailleurs, certains architectes considèrent que la conception paramétrique est le seul moyen de générer une géométrie complexe (Dino, 2012). Comme évoqué précédemment, la géométrie complexe de l'architecture était déjà présente avant même que le calcul ne devienne un domaine appliqué à la conception architecturale, comme en témoignent les travaux de Otto, Utzon, Nervi, Candela, Gaudi et bien d'autres. Cependant, la conception de ces géométries complexes peut être traitée efficacement en utilisant des outils de modélisation paramétrique, évitant le recours à la modélisation physique qui peut entraîner des imprécisions du modèle.

La conception paramétrique est donc parfois mal comprise et mal considérée. Beaucoup d'architectes associent le terme à des édifices complexes et courbes tandis que d'autres peuvent même l'associer à un style architectural (Dino, 2012; Jabi et al., 2017). Bien qu'il y ait une certaine cohérence stylistique avec une grande partie de l'architecture paramétrique, Jabi et ses collègues avancent que les outils de modélisation paramétrique peuvent, dans le même temps, permettre de construire des géométries simples et subtiles mais qui ont des relations paramétriques complexes entre leurs éléments ou, de construire des bâtiments très complexes basés sur des relations paramétriques très simples. La modélisation paramétrique est bien une méthode pour contrôler la complexité de la conception et qui peut être appliquée à tout processus de conception au sein duquel l'exploration formelle prend son sens (Dino, 2012).

Cet amalgame fréquent découle d'une culture numérique peu développée chez les architectes. L'utilisation d'outils de modélisation paramétrique requiert pourtant de nombreuses compétences et savoirs spécifiques afin de pouvoir maîtriser le processus. Nous relevons ces spécificités à la section suivante.

2.4.4. Compétences

Le fonctionnement des modeleurs paramétriques que nous avons décrit dans la section 2.3, force les concepteurs à décomposer l'artefact en composants. Une observation qualitative menée par Yu et ses collègues (2015) révèle que le concepteur semble utiliser les composants qui leur sont familiers. Ces composants sont employés en fonction des compétences acquises par le concepteur et de sa culture numérique. Cela peut être à la fois efficace et contraignant. Cela signifie que la façon dont le concepteur utilise les outils paramétriques a un impact sur le processus de conception paramétrique.

Aish souligne donc l'importance d'une prise de conscience et de la nécessité de développer une culture d'utilisation des techniques génératives en parallèle avec les outils numériques eux-mêmes : « *En général, il y a un glissement de nombreuses activités humaines de " faire " à " contrôler ", impliquant le développement des outils et d'une " culture axée sur les usages " de ces outils.* » (propos reporté dans Foster & Partners, 2006, p.46, traduction personnelle). Le développement de cette culture est nécessaire afin que les possibilités offertes par les outils puissent être pleinement exploitées (Aish &

Bredella, 2017). De nouveaux défis semblent apparaître pour les architectes, en conséquence de quoi, le rôle des architectes pourrait évoluer vers le comportement à la fois d'un architecte et d'un programmeur (Yu et al., 2015).

“To implement parametric software in architectural design, a new breed of architects will need to be trained. They would need more rigorous discipline, not only in understanding three-dimensional geometry but also in the discipline of software programming and architecture.” (Smith, 2007, p.6)

De Boissieu montre dans ses analyses que l'usage de la modélisation paramétrique nécessite la mise en œuvre d'opérations cognitives spécifiques et parfois inhabituelles pour un architecte, telles que des compétences en géométrie et en programmation (de Boissieu, 2013). Les compétences spécifiques liées au paramétrique regroupent à la fois des savoirs, savoir-faire et savoir-être ou attitudes, en vue de résoudre une situation complexe. Nous ne détaillons ici que les spécificités des savoirs et attitudes que de Boissieu définit au cours de sa thèse (2013).

De Boissieu identifie plusieurs savoirs théoriques qui sont nécessaires à la manipulation d'un modèleur paramétrique dans le cadre de la conception architecturale. Les savoirs qu'elle décrit se déclinent comme tels :

- Savoirs propres aux mathématiques et en particulier à la géométrie : ces deux savoirs sont nécessaires à la mise en œuvre de la traduction d'un concept architectural en géométrie paramétrique ;
- Savoirs liés à l'informatique : ces savoirs sont nécessaires à différentes échelles. Il y a les savoirs sur l'informatique en général et plus particulièrement la programmation. Quelques savoirs généraux sont essentiels pour comprendre les enjeux des mécanismes paramétriques tels que décrits dans la section sur le fonctionnement des modèleurs. Plus précisément, le concepteur se doit également de développer des savoirs propres au logiciel utilisé. L'interface de chaque modèleur est différente et doit être appréhendée ;
- Savoirs sur le numérique en général : au-delà des savoirs sur l'informatique à proprement parlé et les outils en eux-mêmes, les savoirs généraux sur le numérique situent le concepteur dans le

contexte numérique d'un point de vue philosophique, historique et social notamment. De Boissieu établit que ces savoirs peuvent avoir une influence sur la dissémination de l'usage du paramétrique ;

- Savoirs liés à l'architecture et à la construction : les recherches de de Boissieu mettent en évidence l'importance d'avoir acquis des savoirs propres à l'architecture et la construction. En effet, les experts en modélisation paramétrique qu'elle a rencontrés sont pour la plupart des architectes.

Nous nous référerons à cette catégorisation des savoirs pour éclairer nos propres résultats.

En parallèle à ces savoirs, de Boissieu définit quatre attitudes adoptées par l'expert en paramétrique:

- L'abstraction (logique et géométrique) : le modèle doit être pensé de façon abstraite afin d'organiser un modèle en parties logiques mais également, de façon à interpréter une intention architecturale en termes de géométrie paramétrique ;
- L'organisation et l'anticipation : une certaine adaptabilité d'un modèle paramétrique en réponse aux transformations est déterminante pour la performance du modèle et le rendement de travail du concepteur. En effet, un modèle paramétrique trop figé (ou auquel on ne peut pas faire subir les transformations voulues) ne sera ni intéressant ni rentable.
- Participer, entretenir un réseau et travailler en équipe : au vu de l'évolution rapide de ces outils, le concepteur a davantage intérêt à s'inscrire dans une communauté d'utilisateurs qui lui permettra de rester performant. Le développement de ces aptitudes permettra de maintenir et d'enrichir l'espace des savoirs de la modélisation paramétrique du concepteur ;
- La curiosité et l'esprit d'initiative : à l'image de la compétence précédente, le concepteur doit explorer perpétuellement et chercher à comprendre sans craindre les problèmes informatiques.

Nous exemplifions ces attitudes au travers de nos résultats afin de débattre les attitudes adoptées par les utilisateurs de modélisation paramétrique que nous avons observés.

A la suite de ces sections sur le développement conceptuel impacté par le fonctionnement des outils et les compétences des utilisateurs, nous pouvons avancer que les outils paramétriques posent de nouveaux défis tant sur le plan cognitif qu'opérationnel. Le concepteur doit souvent passer d'un état cognitif à l'autre : une pensée créative qui met l'accent sur la nouveauté et l'innovation, et une formalisation systématique de la conception d'un point de vue informatique (Dino, 2012). Cela engendre une adaptation du flux de travail que nous abordons à la section suivante.

2.4.5. Flux de travail

La notion du flux de travail est envisagée ici sous un angle de vue technique, le paramétrique faisant évoluer la rapidité d'exécution, et sous un angle de vue collaboratif, en regard de ce qui est parfois nommé le droit d'auteur unique. La modélisation paramétrique est décrite par Foster and Partners (2006) comme ayant la capacité d'améliorer le flux de travail notamment grâce à la rapidité de modification des paramètres d'entrée que nous avons évoquée. L'utilisation du paramétrique réduirait ainsi le temps et les efforts nécessaires aux changements et à la réutilisation (Aish & Woodbury, 2005; Salim & Burry, 2010).

De plus, si l'on considère le processus de travail de la conception à la fabrication, la modélisation paramétrique offre la capacité de fournir des données géométriques précises pour l'analyse des performances d'une part, et la fabrication numérique d'autre part, ce qui favorise une cohérence longitudinale sur l'ensemble du processus architectural (Foster & Partners, 2006).

Les savoirs que nous avons cités font partie d'un apprentissage personnel qui influencent et sont influencés par l'expérience du concepteur. Le développement de l'algorithme a donc une coloration personnelle. Cette identité impose une limite à la complexité du graphique pour qu'il puisse être compris par au moins un autre esprit humain. Sur le plan collaboratif, Laiserin (2009) souligne cette difficulté d'intégrer un modèle dans un processus

multidisciplinaire car ce droit d'auteur unique peut être un frein lors de l'utilisation de la conception paramétrique dans un environnement collaboratif. Les propos de Smith complètent et résument clairement cette tendance :

*« Cela souligne également le fait que tout opérateur qui utilise le modèle doit avoir une connaissance approfondie du programme paramétrique qui est programmé pour cette conception spécifique. Cette connaissance logique n'est pas facilement transférable avec le modèle 3D. Dans un sens, le programmeur d'origine du modèle devient alors le propriétaire du modèle. Souvent, si le programme est trop complexe, le programmeur d'origine est le seul à pouvoir l'utiliser. »
(Smith, 2007, p.2, traduction personnelle)*

Cette notion d'auteur unique remet en question la mise en œuvre d'un processus collaboratif. Nous n'entrons pas en profondeur dans les enjeux de la collaboration mais nous nous basons sur les travaux de Ben Rajeb (2011) pour distinguer le concept de collaboration de celui de coopération en conception architecturale. La conception coopérative correspond à une activité entreprise par plusieurs concepteurs qui interagissent sur un même projet architectural selon des tâches définies *a priori*. En conception collaborative, les concepteurs partagent les mêmes tâches et procèdent par ajustement en fonction des choix effectués conjointement. La conception collaborative est également appelée *co-conception* par d'autres auteurs (Darses, Falzon, 1996, cités par Ben Rajeb, 2011). Les lecteurs intéressés par davantage d'informations peuvent consulter (Ben Rajeb, 2012). Cette distinction nous permet d'affiner le contexte de travail des cas d'étude observés dans cette recherche que nous décrivons dans le chapitre 4.1.

La collaboration ou coopération peut s'effectuer selon différents modes que de Boissieu (2013) recense parmi les pratiques expertes de la modélisation paramétrique qu'elle a observées :

- la consultation externe, qui consiste à faire appel à un prestataire pour une expertise sur un projet en particulier ;
- la consultation interne distinctement à la conception, comme dans les Ateliers Jean Nouvel qui ont constitué, en 2010, une « Cellule de Conception 3D » visant à produire des représentations 3D, des scripts et des modèles paramétriques (Kubota 2012, p.33, cité par de Boissieu, 2013) ;

- la consultation interne simultanément à la conception.

Ces trois possibilités de pratique de la modélisation paramétrique témoignent de la diversité potentielle des pratiques de modélisation paramétrique dans de grands bureaux.

Suite à la mise en évidence des spécificités des outils au cœur de notre recherche, nous considérons les théories des organisations qui nous apportent un éclairage d'un point de vue social. Elles explorent les mécanismes en jeu lors de l'introduction d'une nouvelle technologie dans une structure. La section suivante est dédiée au lien entre technologie et organisation, au *change management* et aux principales structures organisationnelles envisageables dans des bureaux d'architecture.

3. Théorie des organisations

Un changement a toujours un impact certain sur l'organisation d'une société. Dans le cadre de cette thèse, nous étudions l'impact de l'insertion d'une technologie dans une organisation telle qu'un bureau d'architecture de petite taille. Le contexte dans lequel une technologie est intégrée a une importance fondamentale et ne peut s'arrêter à une approche analytique axée uniquement sur la variable de taille de l'organisation. En effet, des modes de fonctionnement différents sont observables dans des structures de même taille. Afin d'étudier cette diversité de manière plus complète, nous établissons notre grille de lecture en nous appuyant sur les travaux de Mintzberg repris plus tard de manière plus appliquée par Nizet et Pichault (1995). Trois thématiques sont essentielles à aborder pour analyser les changements engendrés par une technologie. La première relève du lien entre technologie et organisation, la deuxième concerne les grands principes organisationnels, tandis que la troisième concerne le *change management*. Ce chapitre est consacré à la compréhension de ces trois angles d'analyse en s'appuyant sur les grandes approches théoriques développées au cours de l'histoire.

Cette approche permet d'appréhender les technologies de manière pertinente, en particulier pour analyser le rôle potentiel des outils de modélisation dans le processus de conception architecturale. Cette approche met également en perspective la reconfiguration de nouveaux modes d'action avec les relations que ces technologies impliquent. Bien plus qu'au contenu et aux possibilités techniques des logiciels, c'est à cette reconfiguration que nous souhaitons nous intéresser dans ce chapitre.

3.1. Lien entre technologie et organisation

Au-delà de l'acquisition de compétences et de la structuration de la tâche, les technologies participent à redéfinir les modes de relations entre les acteurs d'une organisation. Différentes approches de la technologie ont été développées au cours de l'histoire en fonction de l'évolution des technologies et de la place qui lui est donnée dans l'organisation étudiée (Boyd & Holton, 2017; Nizet & Pichault, 1995; Orlikowski, 2000). Deux approches antagonistes dominent cependant. En effet, le déterminisme technologique a longtemps été

la théorie dominante mais fut remise en perspective par la théorie de la socio-matérialité. Nous abordons succinctement ces deux théories que nous mettons en perspective à la lumière de nos résultats.

A. Déterminisme technologique

Cette approche est une des premières postures observables dans l'histoire. Radicalement tranchée, la technologie est vue comme déterminante des usages qui en sont faits. Dans ce cas, ce sont les utilisateurs qui s'adaptent à l'outil qui fixe le cadre de travail. On retrouve dans la littérature certains auteurs attachés à cette approche. Sennett rejoint notamment ces craintes d'un déterminisme de la technique sur la conception et la forme architecturale finale (Tribout & Margier, 2018). Les logiciels de CAO participeraient ainsi à une forme de « rationalisation de la pensée et à une hypertechnicisation du processus de conception » (Amphoux, 2002). Utilisés en amont de l'instrumentation du projet, ces outils obligerait les concepteurs à se plier aux modèles proposés par les logiciels (Léglise, 2016).

Cette posture a été critiquée et des chercheurs ont démontré qu'elle n'était pas suffisante pour expliquer la diversité des interactions possibles entre homme et machine. Pourtant, il serait facile de limiter la modélisation paramétrique à ce déterminisme. Nous discutons les postures actuelles à l'issue de la section Résultats.

B. Théorie de la socio-matérialité

En contre-pied du déterminisme technologique, la théorie de la socio-matérialité est notamment soutenue par Orlikowski (1992, 2000, 2007). Ce chercheur considère que des présupposés sont inscrits dans la technologie mais que le contexte social joue un rôle fondamental et qu'il doit être pris en considération. Une technologie amènerait des choix organisationnels différents selon le contexte dans lequel elle s'inscrit. En d'autres termes, l'usage de cette technologie ne serait pas totalement déterminé mais variable en fonction du contexte. Un même outil peut donc être aussi bien implanté dans une agence de grande taille que dans une agence de petite taille avec un usage différent.

Cette approche théorique des agencements socio-techniques permet ainsi de repenser l'usage des technologies, celles-ci n'étant pas considérées comme de simples instruments mobilisés par les humains pour arriver à leurs fins, ni déterminant l'action humaine. Cette approche situe les technologies comme des actants participant pleinement à la cognition, à l'acquisition de compétences ou à la prise de décisions (Tribout & Margier, 2018). En permettant d'agir selon des pistes qui n'auraient pas été initialement suggérées, ou en fonction d'interprétations que l'humain ne possède pas, les technologies peuvent en effet jouer un rôle important dans les directions prises par l'action. C'est en ce sens que les technologies, et les logiciels en particulier, peuvent développer chez les utilisateurs de nouvelles compétences (Tribout & Margier, 2018).

Dès lors, pour analyser cette relation entre technologie et organisation, nous reviendrons sur ces deux premières théories en regard du positionnement du paramétrique. Nous questionnons l'appropriation du paramétrique dans les petits bureaux d'architecture de ce point de vue dans le chapitre Discussion de cette thèse et nous discuterons les facteurs qui font que le paramétrique peut, encore aujourd'hui, être inscrit dans ces deux théories.

Considérant les choix organisationnels qu'une technologie peut engendrer, nous nous intéressons aux différentes structures organisationnelles dans lesquelles une technologie s'inscrit et nous étudions leurs principales caractéristiques à la section suivante.

3.2. Structure organisationnelle des bureaux

L'impact évident de la technologie sur une organisation est souligné depuis de nombreuses années par les chercheurs comme Woodward dans les années 60 (Pichault, 2013). Afin de comprendre l'impact des outils de modélisation paramétrique dans les organisations étudiées, nous nous référons aux écrits de Nizet et Pichault (1995) pour comprendre les enjeux d'une structure organisationnelle.

Une structure organisationnelle est marquée par la répartition et la coordination du travail des opérateurs. On parle de niveaux de division et de coordination du travail (Nizet & Pichault, 1995). Ces niveaux sont corrélés.

Toute division du travail est sous-tendue par la recherche d'une augmentation de la productivité qui ne peut se produire que par la mise au point des mécanismes de coordination.

Nous développons ainsi successivement la division horizontale et la division verticale du travail et, pour finir, les mécanismes de coordination.

La division horizontale se réfère au nombre de tâches effectuées par chaque opérateur. En cela, nous pouvons entendre, l'opérateur est-il polyvalent ou spécialisé dans une tâche comme la rénovation, les marchés publics ou certaines parties du processus ? La division horizontale est dite forte lorsque les opérateurs sont spécialisés dans certaines tâches. La division est faible lorsque les profils sont polyvalents et ont donc un nombre important de tâches affectées par individu.

La division verticale concerne la séparation entre conception et exécution du travail. L'opérateur, soit l'architecte par exemple, a-t-il la responsabilité de ses tâches ou exécute-il les tâches qu'on lui donne ? L'opérateur a-t-il une marge de manœuvre ? Ces questions se posent dans le cadre de la division verticale du travail. En cela, une division verticale sera qualifiée de forte lorsque conception et exécution des tâches sont nettement distinctes. A l'inverse, la division verticale est faible lorsque les opérateurs peuvent prendre des initiatives et prendre part à la conception de leur travail.

Ces deux variables combinées génèrent quatre situations susceptibles de se présenter dans une organisation. Nous les présentons dans le tableau 3 ci-dessous et les explicitons ensuite.

Table 3. Combinaison des différents modes de division du travail

	Division verticale forte	Division verticale faible
Division horizontale forte	A	C
Division horizontale faible	B	D

La situation A est peu fréquente dans le monde de l'architecture (Scheffers et al., 2017). Celle-ci est associée au taylorisme. Le cas B ne laisse aucune place à l'investissement de l'opérateur dans la conception de ses missions. Celles-ci sont cependant davantage multidisciplinaires. Le cas de figure C est généralement représentatif d'opérateurs spécialisés. Ils effectuent leur tâche dans un domaine spécifique avec une marge de liberté et de décision importante au vu de leur qualification dans le domaine. Ce mode de division a été constaté lors de nos observations *in situ*, tout comme c'est le cas de la situation D. Celle-ci est similaire à la situation C sur le plan de la division verticale. On y retrouve une division du travail horizontale également faible, ce qui signifie que les opérateurs travaillant dans ce cadre sont polyvalents et investis dans la vie de l'entreprise. Nous reparlerons de ces trois dernières situations dans la section 4.1 dédiée à la description des contextes professionnels sollicités.

Nous avons abordé les modalités selon lesquelles les organisations divisent de manière générale le travail des opérateurs, que sont les divisions horizontale et verticale du travail. La troisième variable, définie par Nizet et Pichault pour décrire la structure organisationnelle d'un bureau, concerne les moyens qui sont mis en œuvre pour favoriser la coordination du travail réparti.

Les mécanismes de coordination correspondent aux moyens alloués à la coordination du travail entre les opérateurs et analysent donc les mécanismes employés pour coordonner les tâches entre opérateurs. Suivant les organisations, le(s) mécanisme(s) dominant(s) varie(nt). Parmi les six types que Mintzberg distingue, nous retenons deux mécanismes principaux rencontrés dans le contexte qui nous occupe. Un des mécanismes est repris sous la dénomination d'ajustement mutuel. Dans ce cas, les opérateurs échangent leurs compétences et savoir-faire par communication informelle verbale ou non-verbale. A l'inverse de cette première méthode de coordination, la supervision directe signifie qu'une personne est responsable du travail de plusieurs autres. Cette coordination se fait généralement par la transmission d'instructions ou d'ordres envers les personnes exécutant le travail. Le travail est alors contrôlé régulièrement pour veiller à sa bonne exécution. La supervision directe dans les bureaux d'architecture peut s'expliquer par la prise de responsabilité décennale endossée par le leader (Scheffers et al., 2017).

L'introduction d'une nouvelle technologie peut avoir un impact sur la coordination en augmentant ou non le nombre de procédures par exemple.

Les petits bureaux sont généralement marqués par une prévalence de fonctionnements informels, une multiplication de statuts et un recours majoritaire à l'ajustement mutuel, tandis que les agences d'architecture de plus grande taille ont tendance à se distinguer par un pilotage des prestations, une tendance au panoptisme ainsi qu'une importante formalisation des modes de fonctionnement (Scheffers et al., 2017). De manière générale, nombreux auteurs (Nizet & Pichault, 1995) ont montré que plus la taille d'une organisation croît, plus les tâches se spécialisent, plus les niveaux hiérarchiques se distinguent. En conséquence, plus la taille croît, plus la division du travail est forte entre opérateurs, plus les mécanismes de coordination basés sur la formalisation se développent.

A partir de l'analyse individuelle des divisions verticale et horizontale du travail, des mécanismes de coordination, ainsi que d'autres dimensions telles que la manière de prendre des décisions ou encore les acteurs qui ont le plus de d'importance, Mintzberg établit cinq typologies de configuration qui articulent ces trois notions pour construire des « types idéaux » d'organisation. Une étude touchant un tout autre champ de questionnement, à savoir la nature, l'évolution et la quantification des prestations des architectes sur le territoire franco-germanophone belge (Scheffers et al., 2017), fait référence et s'approprie quatre de ces typologies de configuration. Ce terrain étant proche de celui que nous étudions (chapitre 3, section 3), nous reprenons ici les organisations types qu'ils décrivent en présentant pour chacune d'elles, les modalités qui les caractérisent. Toutes les organisations concrètes ne correspondent pas à une seule de ces configurations théoriques mais se rattachent à deux d'entre elles. Nous décrivons et discutons les organisations auxquelles nous avons été confrontés dans la section 4.1 sur les contextes professionnels sollicités.

Configuration adhocratique

Cette configuration adopte principalement le mécanisme d'ajustement mutuel énoncé précédemment. Les opérateurs communiquent donc librement sans qu'il y ait de contrôle direct des opérateurs. Cela laisse place à la prise

d'initiatives et aux marges de manœuvre pour accomplir le travail. On peut donc dire que la division verticale du travail est faible. Les opérateurs dans la configuration adhocratique sont majoritairement polyvalents, ce qui signifie que la division horizontale du travail est faible également.

Configuration entrepreneuriale

Au même titre que la configuration adhocratique, la configuration entrepreneuriale est très fréquente. Elle se caractérise par la position centrale d'un profil. Ce leader fort représente l'autorité et est généralement le fondateur du bureau dans un contexte architectural. La figure d'autorité convoquée ici est donc celle du patron de PME prenant la majeure partie des décisions. Dès lors, la division verticale du travail dans ce type de structure est forte et contrôlée. La coordination s'y opère par supervision directe. Dans un bureau d'architecture, les chercheurs expliquent ce mode de supervision notamment par la responsabilité décennale endossée par le leader, qui n'est pas étendue à ses collaborateurs (Scheffers et al., 2017). La division horizontale a tendance à être faible car les opérateurs de ces structures sont souvent polyvalents. Les facteurs influençant cette variable sont la petite taille de l'organisation ainsi que l'imprévisibilité de l'environnement.

Configuration professionnelle

Cette configuration se caractérise par une forte division horizontale mais une faible division verticale. Cela signifie que les opérateurs sont spécialisés dans certaines tâches tout en pouvant prendre des initiatives quant à la gestion de celles-ci. Les opérateurs sont dotés de qualifications très poussées qui les amènent à travailler dans des créneaux restreints. Ces qualifications leur confèrent une grande liberté dans la conception et la réalisation de leur travail. Ils exercent ainsi une influence importante sur la prise de décision.

Configuration hiérarchisée

Nommées organisations bureaucratiques par Mintzberg, les organisations regroupées sous ce terme sont développées sur un modèle pyramidal. La division du travail a tendance à être forte sur les deux dimensions. Les

opérateurs reçoivent des instructions et ne sont donc pas associés aux décisions. Par contre la division verticale se fait sous une autre forme que dans le modèle professionnel. Les opérateurs sont ici plutôt regroupés par pôles et non plus par expertise singulière. On retrouve généralement cette configuration dans les structures de plus grande taille.

Le tableau ci-dessous reprend de manière succincte les caractéristiques des quatre configurations énoncées.

Table 4. Caractéristiques des quatre configurations de bureaux envisageables

Variables	Configurations			
	Adhocratique	Entrepreneuriale	Professionnelle	Hiérarchisée
Division horizontale du travail	Faible	Faible	Forte	Forte
Division verticale du travail	Faible	Forte	Faible	Forte
Mécanisme de coordination	Ajustement mutuel	Supervision directe	Recours à des documents formalisés	Recours à des outils et procédures formalisés

Nous examinerons les modes d’organisation et le workflow des bureaux observés dans les résultats afin d’identifier en quoi le contexte dans lequel s’inscrit la technologie est susceptible d’influencer l’appropriation de celle-ci.

Après avoir étudié différentes typologies d’organisation, nous nous intéressons aux éléments connexes qui influencent l’adoption de la technologie. De nombreuses pistes de réflexion sont à trouver dans la notion de *change management* que nous développons dans la partie suivante.

3.3. Change management

Le *change management* questionne la gestion du changement et comment cette gestion impacte l’appropriation de l’outil par les utilisateurs.

Il faut d'emblée s'entendre sur le phénomène dont nous parlons. Le changement peut aussi bien être intentionnel, faisant dès lors l'objet d'une programmation, d'un plan de communication par exemple, que forgé progressivement, au fur et à mesure des évolutions de l'organisation, par l'émergence de nouvelles manières d'effectuer le travail (Pichault, 2013). Les recherches menées par Mintzberg (1986, 1998) dans les années septante ont fait considérablement évoluer les théories des organisations. Ainsi, trois perspectives managériales se dessinent pour organiser une société :

- L'organisation est la résultante de l'action de son dirigeant qui conçoit et formule sa stratégie et ensuite la met en œuvre. On parle de perspective rationnelle.
- L'organisation fait face à des contraintes issues du contexte. Le dirigeant adapte ses choix stratégiques en fonction du poids des contraintes afin de conserver les performances de l'organisation. Dans ce deuxième cas, les perspectives sont dites contingentes.
- L'organisation est un état d'équilibre, provisoire, entre des intérêts liés par des relations de pouvoir. L'organisation n'est, dans ce cas, plus vue comme la résultante unique de l'action managériale. Nous parlons de perspective politique.

Ces trois perspectives managériales soulignent l'impact des choix que le dirigeant peut avoir pour assurer le fonctionnement d'une organisation. Ces trois perspectives managériales sont davantage ancrées dans la théorie de Kotter qui considère qu'il faut avoir une vision claire des objectifs à atteindre et la communiquer au personnel de manière ouverte afin de le convaincre. Cet auteur met en évidence la communication et la conviction comme deux éléments directeurs de sa théorie pour analyser la gestion du changement (Kotter, 2015). Cette démarche top down part d'une intention hiérarchique imposée aux utilisateurs qui doivent s'adapter à la technologie.

Les décisions stratégiques sont cependant elles-mêmes influencées par les variations de l'environnement et conduisent à leur tour à des modifications de la structure organisationnelle. L'origine du changement est donc souvent multiforme, constituée d'un ensemble de variables en interrelation. Cette théorie, défendue par Pichault (2013), est fondée sur le besoin de co-construire le projet d'adoption de la technologie en y impliquant les différents acteurs.

La théorie de l'acteur réseau, développée depuis de nombreuses années, s'avère être un cadre théorique pertinent pour comprendre le rôle et l'influence des innovations techniques (Tribout & Margier, 2018). Les partisans de cette approche accordent une importance particulière aux « entités produites par les sciences et les techniques » (Callon, 2004) et aux façons dont s'agencent le social et la technique. Dans cette perspective, une attention particulière est portée à toutes les entités, humaines ou non humaines, qui participent d'une manière ou d'une autre au déroulement d'une action. La coupure traditionnelle entre humains et non humains disparaît ainsi pour laisser place à une interprétation selon le rôle potentiel de ces entités en tant qu'actants, et à la manière dont celles-ci participent - ou s'associent pour participer - à l'action (Murdoch, 1997).

Afin de faire transparaître ces différents facteurs d'influence, Pichault développe une nouvelle vision et aborde le *change management* sous le terme de *management polyphonique*.

Selon lui, il y a une nécessité de travailler avec l'ensemble des acteurs pour co-construire le projet. De ce point de vue, il y a une importance marquée de prendre en compte les intérêts des différents acteurs (fondateurs, architectes, fournisseurs logiciel, clients, urbanisme, ...) qui sont autant d'acteurs pouvant pousser à l'adoption de nouveaux outils. Pour comprendre les acteurs et les relations qui sont en jeu, Pichault établit le *modèle des cinq forces* (figure 19).

Ce schéma offre une appréhension globale des processus de changement à partir de trois concepts clefs et de leurs interrelations : le contenu, le contexte et le processus (Pichault, 2013, p.68).

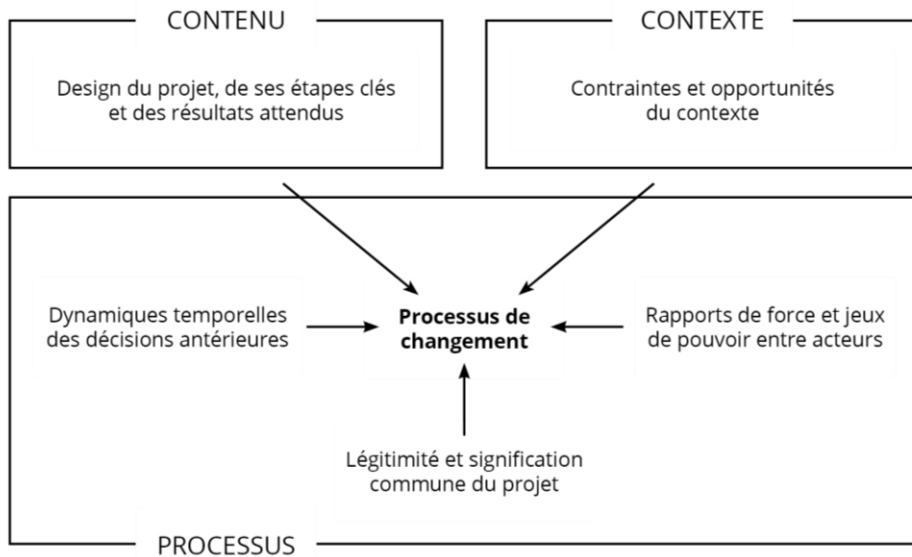


Figure 19. Modèle des cinq forces selon Pichault (2013)

Le **contenu** désigne le domaine concerné ou la cible visée par le changement.

Le **contexte** désigne les facteurs susceptibles d'influencer les contenus et leur évolution. Pettigrew (1987) distingue deux types de facteurs : les contextes internes (modes de travail, taille, âge de l'organisation) et les contextes externes (structuration du secteur, la concurrence et la réglementation). Une étude, réalisée par Hochscheid et Halin (2018) sur le processus de décision lié à l'adoption du BIM, recourt aux théories comportementalistes pour identifier les facteurs qui influencent l'adoption d'une technologie quelle qu'elle soit (figure 20). Cette étude complète les contextes internes et externes d'un facteur interne, le décideur, qui, en fonction de ses expériences, son âge, sa personnalité, évalue l'effort à fournir en termes d'argent, de temps, d'énergie pour implémenter la technologie. Le décideur tente également de mesurer l'utilité de cette implémentation en considérant sa propre pratique et ses besoins en sus de deux facteurs externes, les solutions à sa portée (en termes de technologie, de processus) ainsi que la communication liée à la technologie (documentation, communication commerciale).

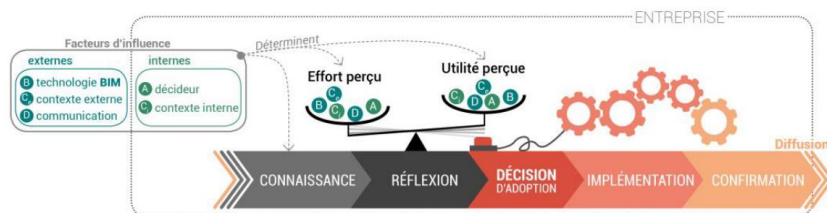


Figure 20. Processus de décision lié à l'adoption du BIM selon Hochscheid & Halin, 2018

Le **processus** inclut les rapports de pouvoir qui se développent entre acteurs et les initiatives qu'ils mettent en œuvre en conséquence, face au processus de changement.

Ces trois variables sont en étroite interrelation car les jeux d'acteurs seraient contraints, au moins en partie, par les contextes, qu'ils construisent et transforment en même temps. Pichault (2013) décrit ce modèle comme ceci :

« Le changement est d’abord un contenu, c’est-à-dire un objet qui va être soumis à modification [...]. Ce changement ne peut être appréhendé correctement sans être mis en relation avec le contexte dans lequel il est destiné à s’implanter, qui représente à cet égard autant de contraintes que d’opportunités. Son processus d’introduction s’avère crucial : comment les acteurs se positionnent par rapport au contenu, comment ils sont marqués, dans ces positionnements, par l’histoire organisationnelle et les décisions héritées du passé, chacune ayant une temporalité spécifique, comment ils « mettent en action » les éléments du contexte pour les intégrer de manière signifiante dans le contenu. »

Dans un contexte architectural, ces trois concepts peuvent être identifiés. Le contenu correspond aux éléments organisationnels ou cognitifs qui vont être sujets à modification suite au changement technologique. Le contexte peut quant à lui être défini par la taille du bureau (petit ou grand), le type de projets (rénovation, unifamilial, privé ou public, ...), les profils rassemblés au sein de l’agence ou encore la localisation de celle-ci par exemple. Finalement, le processus fera référence aux expériences antérieures du bureau. Quel est l’historique du bureau ? Y a-t-il déjà eu des expériences avec des ambitions de changement technologique ? Comment les acteurs interprètent-ils la technologie ? Comment le responsable du bureau crée-t-il un sens et présente-t-il la nécessité de l’outil ? Ces interrogations sont des pistes pour définir le processus du changement en architecture. Ces trois concepts sont décrits pour chaque bureau d’architecture interrogé et observé à la section Résultats.

4. Schéma récapitulatif

Après nous être attardés sur les principales communautés de recherche s'intéressant au processus de conception, ce chapitre s'est recentré sur le processus de conception architecturale et finalement sur le processus de conception architecturale numérique qui anime le cœur de notre problématique. Nous avons ensuite abordé les médias qui outillent ces processus et notamment les représentations externes générées. Après avoir parcouru brièvement les caractéristiques majeures des outils analogiques et de CAO dits « traditionnels », nous nous sommes penchés sur les outils de modélisation paramétrique en architecture. Nous avons finalement abordé le fonctionnement des organisations et les liens avec les technologies en nous appuyant sur les théories des organisations.

Le schéma suivant (figure 21) résume les grandes thématiques présentées dans cet état de l'art et met en évidence cinq thématiques potentielles d'exploration scientifique :

1. En regard des pratiques numériques décrites dans la littérature, nous soulignons le manque de mise-à-jour de l'état des pratiques numériques et le nombre limité de recherches évoquant leurs conséquences au quotidien sur le processus de conception des PME ;
2. Faisant ce constat au sujet du numérique de manière générale, il est à noter que l'insuffisance de données concernant les pratiques paramétriques des PME est davantage marqué ;
3. En regard des caractéristiques de la modélisation paramétrique décrites dans la littérature et généralement associées aux grandes agences, il serait pertinent d'interroger les architectes de PME pour identifier leurs perceptions *a priori* et leurs intérêts potentiels vis-à-vis de cette technologie ;
4. Parmi les quelques bureaux de petite taille faisant usage de la modélisation paramétrique, il semble opportun de questionner les raisons qui poussent ces architectes à adopter et recourir à ce type de modélisation ;

5. Tandis que la littérature nous renseigne sur l'impact qu'ont les représentations sur le processus de conception, il nous faut alors interroger cet impact en regard des processus de conception soutenus par la modélisation paramétrique et développés dans les bureaux de petite taille.

Ces thématiques nous poussent à formuler nos questions de recherche au chapitre suivant.

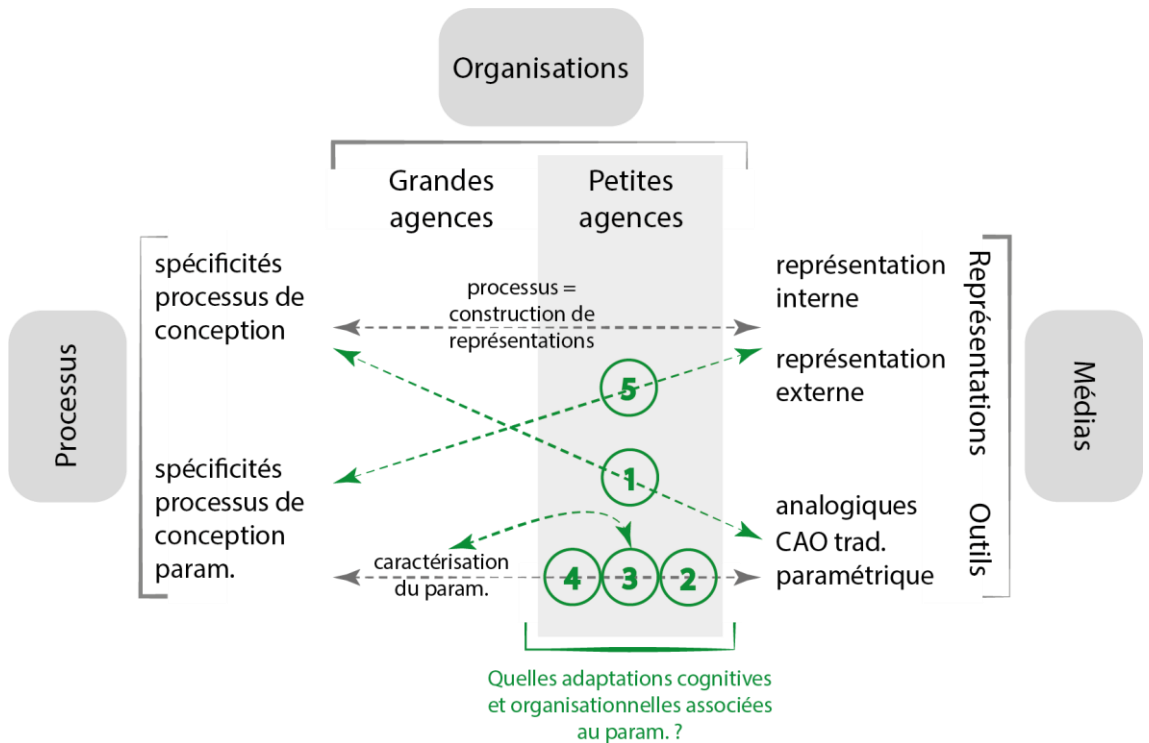


Figure 21. Schéma récapitulatif de l'état de l'art et identification de thématiques à questionner (étant donné leur ordre d'apparition ci-dessus, numérotées de 1 à 5).

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

Cette thèse questionne les pratiques numériques actuelles en bureau d'architecture afin de cerner le contexte dans lequel s'inscrit le développement de l'usage des outils de modélisation paramétrique. Cette thèse vise ensuite à produire des connaissances sur l'impact des outils de modélisation paramétrique sur la conception architecturale. Ces connaissances sont produites pour identifier les changements tant organisationnels que cognitifs dans le flux de travail des petits bureaux d'architecture. Ce chapitre explicite les méthodes exploitées afin de recueillir les données nécessaires pour éclairer les intersections mises en évidence au travers du schéma récapitulatif. Nous commençons par formuler les questions de recherche issues de ces intersections (section 1). Nous positionnons ensuite la thèse dans les paradigmes scientifiques actuels (section 2) afin de comprendre les choix méthodologiques effectués et dès lors explicités dans ce chapitre. Nous présentons ainsi l'articulation entre les méthodes de recueil de données, la nature du corpus analysé et les méthodes d'analyse utilisées pour le traiter à la section 3. Ces méthodes sont de différentes natures : questionnaires (section 4), entretiens (section 5) et observations *in situ* (section 6).

1. Questions de recherche

A travers la revue de la littérature, nous avons pu mettre en évidence que les outils de modélisation paramétrique sont très peu exploités dans les petits bureaux d'architecture en comparaison avec les grands bureaux d'architecture, où leur impact sur le flux de travail a par ailleurs été largement étudié. Ces grandes agences ne représentant qu'une faible partie du marché, nous focalisons notre recherche sur la pratique numérique et plus particulièrement paramétrique des PME, représentatives de la pratique architecturale de près de 80% des bureaux en Belgique. Pour y parvenir, il est intéressant de commencer par établir un panorama des pratiques numériques actuelles afin de contextualiser les outils de modélisation paramétrique dans ce champ et ainsi déterminer les changements qui pourraient avoir une incidence sur la pratique des architectes. Les questions de recherche qui émergent sont les suivantes :

1. Comment les architectes utilisent-ils les outils numériques en général ? Quelles sont les combinaisons de logiciels les plus utilisées ? En quoi les architectes considèrent-ils que ces outils ont complexifié leur pratique architecturale ?

De la sorte, nous pouvons nous interroger quant à la manière dont les outils de modélisation paramétrique sont perçus par les architectes, et repositionner ces perceptions par rapport à leurs connaissances numériques générales.

2. Les architectes manifestent-ils de l'intérêt pour les outils numériques et plus particulièrement pour les logiciels de modélisation paramétrique ? Comment la modélisation paramétrique est-elle perçue ? Quelles sont les postures des architectes vis-à-vis de cette typologie d'outils ?

Nous verrons que les architectes ont tendance à considérer que ces outils engendrent des changements majeurs, voire que cette technologie prédétermine un certain formalisme architectural. Nous questionnons les limitations réellement induites par ces outils.

3. D'après les architectes, dans quelle mesure les outils de modélisation paramétrique influencent-ils, voire déterminent-ils l'architecture conçue ? Quelles différences existe-t-il entre les perceptions à ce sujet et les observations dans des pratiques existantes ?

Au-delà des *a priori* des non-utilisateurs, certains architectes ont fait le choix d'adopter ces outils et ont mis en place des stratégies d'utilisation. Nous relevons les différents usages dans les pratiques observées.

4. Comment les outils de modélisation paramétrique, mais aussi les représentations qui y sont liées, s'articulent-ils dans leurs usages tout au long du processus de conception de l'artefact ? Quels sont les mécanismes du processus de conception influencés par l'utilisation d'outils de modélisation paramétrique ?

Nos résultats identifient comment ces outils, de par leur fonctionnement intrinsèque, favorisent une approche différente, levier et facteur différenciant pour la communication de la démarche architecturale.

5. Compte tenu des spécificités des outils de modélisation paramétrique, quelles sont les raisons qui poussent les concepteurs à y avoir recours ?

Finalement, ces différents questionnements sont abordés en regard de l'expertise des architectes questionnés et observés. Ces différentes questions nourrissent une réflexion plus large :

Comment la modélisation paramétrique, vue comme l'une des technologies numériques émergentes, refaçonne-t-elle et suscite-t-elle de nouvelles pratiques architecturales, des adaptations cognitives et de nouvelles formes d'organisation dans les bureaux d'architecture de petite taille ?

Ces questions de recherche de la thèse ayant été formulées, nous abordons le champ méthodologique afin d'identifier les supports les plus pertinents pour répondre aux problématiques soulevées.

2. Paradigme scientifique

Pour comprendre les choix méthodologiques explicités dans les sections suivantes, il est intéressant de prendre un peu de recul pour situer l'approche scientifique choisie pour cette thèse. Nous décrivons dans cette section le positionnement ontologique et épistémologique de la recherche avant de poursuivre avec la description de la méthodologie des outils de recherche utilisés.

Un paradigme scientifique est « l'ensemble des croyances et des accords communs entre scientifiques sur la façon dont les problèmes doivent être compris et traités » (Kuhn, 1962). Partant de cette définition, nous reprenons les trois caractéristiques d'un paradigme scientifique définies par Guba (1990):

- son ontologie
- son épistémologie
- sa méthodologie

L'ontologie est la branche de la philosophie qui se préoccupe de l'être et de l'existant. L'épistémologie concerne les théories de la connaissance et comment nous en arrivons à la connaissance des choses. L'ontologie et l'épistémologie décrivent la façon dont la connaissance est perçue et comment nous considérons notre relation à cette connaissance, et dès lors les stratégies méthodologiques que nous utilisons pour la découvrir (Patel, 2015). La figure 22 schématise les termes et relations entre ceux-ci. Les méthodes s'intègrent dans une méthodologie qui s'inscrit elle-même dans un contexte théorique, lequel s'appuie à son tour sur des hypothèses épistémologiques et ontologiques.

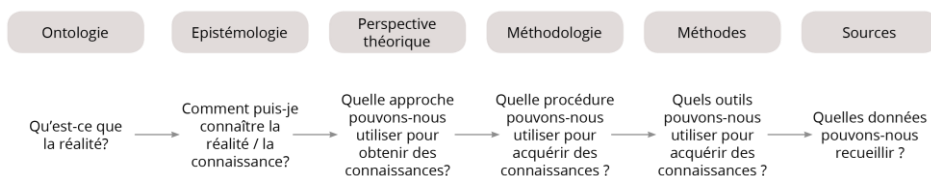


Figure 22. Caractérisation d'un paradigme scientifique. Schéma traduit de Patel (2015), adapté des théories de Hay (2002) et Crotty (1998)

Il existe différents paradigmes définis successivement par les scientifiques. En effet, les paradigmes évoluent et se transforment. C'est ainsi que les explications de la science basées sur la théorie de Newton ont progressivement fait apparaître des anomalies qui ne pouvaient pas être expliquées sous le paradigme en cours à cette époque et un nouveau paradigme, basé sur la physique quantique, a vu le jour. Nous citons trois possibilités de classification paradigmatique qui font écho dans le domaine architectural. Dans la première, Diaz Moore et Geboy (2010) présentent cinq visions du monde selon ces termes : *Traditional science, Technical-rationality, Pragmatism, Interpretivism, and Intuitionism*. Dans leur livre sur les méthodes de recherche architecturale, Groat et Wang (2002), présentent un « cadre tripartite de paradigmes de recherche » : *Positivism/Postpositivism, Interpretive/Constructivist, and Emancipatory*. Nous retrouvons la troisième répartition dans *The Sage Handbook of Qualitative Research* (Lincoln, Lynham, & Guba, 2011) qui présente une répartition en cinq paradigmes également : *Positivism, Postpositivism, Critical Theory et al., Constructivism, and Participatory*.

Ces différentes classifications ont quelques points communs soulignés par Van Steenwinkel (2015). Sur le plan ontologique, elles présentent des paradigmes variant d'une seule réalité connaissable, à l'existence de réalités multiples. Sur le plan épistémologique, ces classifications reflètent des différences dans les relations entre le chercheur et les personnes étudiées. Les classifications partent d'un paradigme basé sur une « autorité » croissante du peuple étudié et d'une « autorité » décroissante du chercheur. Dans le cas le plus neutre, le chercheur reste éloigné du milieu étudié afin de maintenir une position objective et sans jugement de valeur. Enfin les classifications tendent vers des paradigmes pour lesquels l'interaction entre le chercheur et les personnes ou le milieu étudiés est reconnue. Une part de subjectivité est envisageable et doit dès lors être explicitée.

Afin d'expliciter de manière simple et brève les trois principaux paradigmes se basant sur l'existence de réalités bien différentes, nous reprenons les termes de Patel (2015) et de Green et Stinson (1999) qui précisent les objectifs de recherche de chacun de ces paradigmes :

- Les **positivistes** croient qu'il n'existe qu'une seule réalité, qui peut être mesurée et connue. Ils sont donc plus susceptibles d'utiliser des méthodes quantitatives pour mesurer cette réalité. L'objectif est de prédire et d'expliquer.
- Les **constructivistes** croient qu'il n'y a pas de réalité ou de vérité unique. La réalité doit donc être interprétée. Les constructivistes sont plus susceptibles d'utiliser des méthodes qualitatives pour obtenir ces réalités multiples, les décrire et les comprendre.
- Les **pragmatiques** croient que la réalité est constamment renégociée, débattue, interprétée, et que la meilleure méthode à utiliser est donc celle qui résout le problème. L'objectif de la recherche est d'améliorer, d'émanciper et d'intervenir.

Dans cette recherche de doctorat, nous adoptons le constructivisme comme base théorique appropriée pour la recherche. Étant donné les différentes approches et définitions établies, ce qui suit explique brièvement ce que nous entendons en prenant le constructivisme comme base théorique :

*« C'est l'idée que toute connaissance, et donc toute réalité significative en tant que telle, dépend des pratiques humaines, construites dans et hors de l'interaction entre les êtres humains et leur monde, et développées et transmises dans un contexte essentiellement social. »
(traduit de Crotty, 1998, p.42)*

Crotty image ce propos avec le concept de « bricoleur » de l'anthropologue et ethnologue français Claude Lévi-Strauss. Un bricoleur est « *une personne qui fait quelque chose de nouveau à partir d'une gamme de matériaux qui avaient auparavant constitué quelque chose de différent* », et qui se demande « *qu'est-ce qu'on peut faire de ces objets ? Qu'est-ce qu'ils sont prêts à devenir ? Et la réponse à cette question dépend des qualités que l'on trouve dans les objets à portée de main.* » (Crotty, 1998). Ce sont ces qualités que le chercheur tente de saisir. La connaissance est façonnée par les matériaux à portée de main avec lesquels le chercheur est préoccupé et cherche à développer des affinités.

Dans le constructivisme, deux types de collecte de données sont envisageables : d'une part du quantitatif et d'autre part du qualitatif. La recherche quantitative a tendance à être associée aux nombres et à produire

des tableaux et des graphiques : il s'agit plutôt de compter et de mesurer les choses, voire de générer des statistiques. La recherche qualitative n'inclut pas de chiffres. Les mots, les pensées et les images sont la base de l'analyse et révèlent des éléments qui ne sont pas facilement quantifiables.

Ces deux approches de recherche sont utilisées dans cette thèse afin d'élaborer une méthodologie pertinente et complémentaire en regard des questions soulevées. Les choix méthodologiques ont été faits dans le but de questionner l'existant et de donner une voix aux architectes. Nous construisons donc de manière empirique les connaissances. L'approche quantitative est d'abord utilisée afin de construire un panorama des pratiques numériques actuelles et dès lors de comprendre le quotidien des PME. L'approche qualitative, élaborée ensuite, révèle les *a priori* des concepteurs et questionne les pratiques existantes. Les résultats de la thèse apportent un éclairage pour mieux comprendre les expériences réelles des concepteurs. La section suivante énumère les outils développés et décrit succinctement les apports pour la recherche afin de comprendre l'articulation des différents corpus.

3. Articulation et retranscription des corpus analysés

3.1. Articulation des corpus analysés

Divers supports ont été mobilisés afin d'identifier d'une part, l'impact des outils paramétriques sur les processus cognitifs et organisationnels des bureaux d'architecture de petite taille et, d'autre part, d'identifier les freins à l'usage de ces outils. Selon Wolcott (2001), la démarche de recherche peut faire appel à une combinaison de techniques ou à une technique unique. Dans notre cas, la complémentarité des questions de recherche énoncées exclut un protocole de recherche basé sur une seule méthode. C'est donc en questionnant le terrain mais également en l'observant que nous construisons notre analyse. Nous avons donc fait appel d'une part à la recherche quantitative pour constituer notre propre état de l'art des pratiques numériques en Belgique, d'autre part, nous avons eu recours à différentes méthodes issues de la recherche qualitative pour questionner les pratiques paramétriques existantes. Pour sélectionner ces approches qualitatives, nous nous sommes référés au travail de Wolcott (2001) établissant quatre familles méthodologiques dissociables d'un point de vue de la collecte des données : l'observation participante ou non-participante, les entretiens, l'analyse documentaire. De ces quatre familles, nous retenons principalement l'observation non-participante et les entretiens afin de construire notre méthodologie qualitative. Nous développons ce choix dans les sections suivantes.

Dans le cadre de cette recherche, les supports quantitatifs et qualitatifs utilisés sont les suivants :

- Un questionnaire en ligne diffusé largement

Relevant d'une méthode quantitative, ce questionnaire en ligne a été diffusé largement auprès des architectes et ingénieurs architectes belges. Ce questionnement de masse sonde leurs pratiques numériques actuelles et notamment les outils numériques qu'ils utilisent quotidiennement, le sentiment des architectes à l'égard de ces outils numériques et l'impact qu'ils ont sur le processus de conception architecturale. De plus, le questionnaire sonde le niveau de connaissance concernant les outils de modélisation paramétrique ainsi que leur usage actuel.

- Des questionnaires sur une journée de formation au paramétrique

Ces questionnaires, distribués en début et fin d'une journée de formation, cherchent à saisir le changement d'appréhension possible des outils de modélisation paramétrique à l'issue d'une seule journée de formation et sont complétés par la collecte de données via des tables rondes.

- Des entretiens approfondis ciblés

Issu des approches qualitatives décrites par Wolcott, l'entretien a pour but d'obtenir la description d'une pratique menée par la personne interrogée. L'interprétation de ce discours permet alors de décrire un phénomène. La population interrogée issue du questionnaire en ligne a été divisée selon deux critères formant dès lors six groupes distincts. Ces entretiens ont été menés en vue de cerner les freins potentiels à l'usage des outils de modélisation paramétrique.

- Des entretiens rétrospectifs sur des projets paramétriques

Ces entretiens ont été menés rétrospectivement en regard de processus de conception architecturale passés et réalisés à l'aide d'outils paramétriques. Cette méthode vise à saisir davantage la diversité des pratiques existantes, diversité qui n'aurait pas pu être observée en situation « réelle » dans les délais de la recherche. Les discours récoltés à l'issue de ces entretiens permettent de cerner les aspects cognitifs et organisationnels qui entrent en jeu lors de l'usage d'outils de modélisation paramétrique.

- Des observations in situ d'une pratique paramétrique

L'observation d'une pratique paramétrique appliquée à différents projets au sein d'un bureau d'architecture cherche à identifier les critères cognitifs et organisationnels potentiellement impliqués dans la pratique d'une petite structure. Ces observations permettent d'étudier une pratique réelle parmi d'autres pratiques envisageables.

Ces différentes méthodes nous permettent d'affiner notre analyse en passant de la caractérisation de la pratique numérique (observée sous un angle général pour en comprendre les usages, les appréhensions et les complexités) à l'analyse des pratiques de la modélisation paramétrique dans des petits bureaux d'architecture. Ainsi, les méthodes mises en place construisent notre

compréhension globale, puis, de plus en plus fine, des mécanismes d'adaptation et d'usage des outils de modélisation paramétrique.

En termes de choix méthodologiques, le recours exclusif à des sujets professionnels doit être justifié. En effet, certains auteurs s'opposent de manière virulente à l'observation d'étudiants en situation de conception. Cette position est évoquée notamment par Norman (2010) d'une manière plus tranchée que le regard que nous portons : « [...] *I am continually amazed that the research community believes that the study of naïve, unskilled students tells us anything at all about problems of design in a large company, with multiple constraints and requirements, working in teams [...]* ». Les étudiants peuvent en effet être une source de connaissances non négligeable. De notre point de vue, ils restent cependant éloignés d'une pratique réelle orchestrée par les contraintes du métier et qui plus est, dans un contexte de petits bureaux d'architecture aux marges de manœuvre généralement limitées.

Les sections suivantes présentent de manière détaillée les méthodes auxquelles nous faisons appel pour outiller notre analyse : les questionnaires (section 4), les entretiens (section 5) et l'observation *in situ* (section 6).

Nombreuses données recueillies par ces différentes méthodes doivent être retranscrites pour être ensuite analysées. Pour ce faire, nous proposons à la section suivante, une explication des codes de retranscription que nous déterminons et appliquons à notre corpus.

3.2. Retranscription

Le traitement des propos recueillis passe par la retranscription, l'analyse et la restitution des connaissances acquises (Brinkmann, 2014). Dans le domaine de la recherche, les entretiens sont généralement retranscrits intégralement de manière à conserver la communication originale. Cette pratique rigoureuse est chronophage et peut prendre jusqu'à six heures de retranscription pour une heure d'échanges (Lallemand & Gronier, 2016).

Chaque parole est retranscrite de manière précise, incluant également parfois des informations non verbales (ton de la conversation, silences, soupirs, rires, ...) qui sont autant d'éléments susceptibles de modifier le sens du texte. Compte tenu du sujet et de l'objectif de recherche, la méthode de

retranscription varie. La transcription doit être faite en fonction de ce qui peut être omis ou doit être considéré, tels que les pauses, les répétitions, les faux départs, les hésitations.

Les données audio de cette recherche de doctorat contiennent d'une part des entretiens téléphoniques, qui donnent accès aux points de vue des architectes interrogés et qui doivent être saisis dans la transcription autant que possible et d'autre part, les séquences des observations *in situ* qui ont été sélectionnées car elles sont représentatives d'une réflexion décisive dans le processus de projet. Par conséquent, nous avons considéré important de rester proche des mots prononcés afin d'omettre le moins possible de contenu significatif.

Jefferson (2004) est une référence en matière de transcription. Cependant les codes de retranscription proposés par cet auteur sont complexes par rapport au contexte qui nous occupe. Pour les enregistrements audio-visuels effectués, il est justifiable de ne pas faire usage de certains codes définis par cet auteur, comme par exemple les gestes. De même, alors qu'une représentation phonétique pourrait être pertinente pour les chercheurs qui étudient le langage, dans d'autres recherches, elle pourrait rendre la transcription trop détaillée et illisible (Bleyen & Van Molle, 2012).

Dans notre cas, nous avons conservé certaines expressions et caractéristiques langagières au même titre que les hésitations et les phrases non achevées. Leur conservation informe sur la tonalité du discours tenu. Les transcriptions comprennent donc des expressions comme "euh" et "oh", pauses, le ton et le volume de l'expression et l'indication de mots inintelligibles. Ces formulations ont été conservées de manière à pouvoir observer, par exemple, des hésitations « communes » à la suite d'une question particulière. Les intonations généralement retranscrites par ces symboles « / », « \ », sont retranscrites, dans notre cas, de la manière suivante [*intonation*] afin de mettre en avant l'émotion qui accompagne le propos. Les autres codifications employées sont les suivantes :

- (.) micro-pause
- (2.1) pause en secondes
- : allongement vocalique

- mot, phrase coupés par l'intervenant lui-même.
- ` indique qu'un mot a été tronqué, abrégé de manière orale.
- () mots prononcés de manière inaudible

Une fois les méthodes de collecte de données définies, celles-ci ont pu être mises en œuvre. Les résultats des questionnaires ainsi que les résultats et retranscriptions des entretiens et des observations menés constituent alors le corpus pour l'analyse des données. Le chapitre suivant regroupe l'ensemble des données effectivement recueillies et sélectionnées qui édifient les résultats de ce travail.

4. Les questionnaires

4.1. Méthode générale

Le besoin de recueillir des informations sur une population définie existe depuis très longtemps mais l'utilisation du questionnaire comme outil de collecte de données date des années 40. Cette méthode est encore plus largement reconnue depuis le déploiement d'Internet (Schonlau & Fricker, 2002) et notamment dans le domaine des sciences humaines et sociales.

Le questionnaire est une technique d'enquête pour le recueil d'informations de tous ordres, de données sociodémographiques jusqu'à l'expression de besoins (intérêts, habitudes, usages, expériences) sur une population cible (Lallemand & Gronier, 2016). Lallemand et Gronier définissent le questionnaire comme un outil de collecte de données qualitatives et quantitatives. Les questionnaires peuvent effectivement répondre à différents objectifs. Ils permettent de confirmer des hypothèses par exemple au début du processus de conception, ou d'identifier des tendances et ainsi de permettre le déploiement d'autres méthodologies adaptées à l'affinement des tendances soulevées. Il permet aussi d'obtenir une validation quantitative d'une situation questionnée, de recueillir des données démographiques et factuelles. Contrairement à la plupart des méthodes, les questionnaires peuvent être diffusés à un très large échantillon de participants et permettent également de recevoir un grand nombre de réponses dans un temps relativement court.

Afin de mettre en place un questionnaire structuré, différents critères sont à considérer. Il faut définir son objectif, élaborer le questionnaire et le structurer, pré-tester le modèle établi, sélectionner et contacter les participants. Le contenu des questions ainsi que leur format ont un impact important. Il est également nécessaire d'envisager dès le départ le traitement statistique qui sera mis en place pour l'analyse des données et de manière plus générale l'exploitation des résultats qui est attendue.

La conception d'un questionnaire est une phase importante du processus pour qu'il corresponde aux utilisateurs ciblés, et dès lors pour obtenir le meilleur taux de réponse possible et que les données recueillies soient exploitables. Lallemand et Gronier (2016) recensent quatre parties qui

structurent généralement un questionnaire. L'introduction et les consignes vont dans un premier temps présenter brièvement l'étude, expliciter les règles déontologiques et éthiques et suggérer une durée nécessaire pour compléter le questionnaire. Une fiche signalétique placée en début ou en fin de questionnaire reprend ensuite des questions sociodémographiques (âge, sexe, profession, ...). Le corps du questionnaire est constitué des questions qui touchent directement à l'enquête. Des remerciements et coordonnées de contact sont placés à la fin de l'enquête.

Concernant l'introduction et les consignes, celles-ci font mention du respect de la vie privée, de la confidentialité et de l'anonymat, qui sont des principes clefs des études impliquant des utilisateurs. Les données recueillies doivent également être stockées de manière anonyme et confidentielle. Tout participant à l'étude doit donner son consentement libre et éclairé (Lallemand & Gronier, 2016). Le participant doit donc être informé sur les objectifs de l'étude (comment, pourquoi, par qui) et le déroulement de la session à laquelle il décide de participer.

Le corps du questionnaire peut ensuite répertorier de nombreuses formes de questions. Trois formes de questions sont généralement utilisées et sont exploitées dans le cadre du questionnaire mis en place dans cette recherche : fermées, ouvertes, semi-ouvertes. Lallemand et Gronier (2016) les définissent comme telles :

- Les questions fermées donnent le choix entre deux réponses (dichotomiques) : oui/non, satisfait/mécontent, faux/vrai, bon/mauvais ;

- Les questions semi-ouvertes ou en éventail proposent plusieurs possibilités de réponse ou invitent à formuler une réponse libre succincte pour détecter des variations plus fines. Ce sont les plus courantes en raison de leur facilité de traitement et de leur potentiel pour des analyses statistiques (Visser, Krosnick & Lavrakas, 2000) ;

- Les questions ouvertes sont adaptées pour des questions d'opinion avec une grande diversité et dont les possibilités de réponses ne sont pas définies. L'enquêté utilise son propre vocabulaire pour répondre à la question.

Finalement, le profil des participants est à prendre en considération dès le début de la conception du questionnaire. En fonction de la question posée et de

l'objectif à atteindre, le but est de définir le profil des participants - l'univers professionnel dans lequel ils s'inscrivent, le sexe, l'âge, l'expérience, ... - qui seront les plus à même d'amener des réponses pertinentes.

Le choix du support du questionnaire peut être conditionné par cette population ciblée. Il est généralement plutôt administré par papier ou en ligne que par téléphone. Un questionnaire papier sera par exemple privilégié pour interroger des profils peu ou pas familiarisés aux technologies. Nous faisons usage de ces deux principaux supports, papier et en ligne, dans cette thèse.

Une fois le questionnaire conçu, celui-ci peut souffrir de biais liés aux répondants ou à la formulation des questions. Un pré-test est donc nécessaire. Ce pré-test consiste à identifier les questions ambiguës et dont le sens pourrait porter à des interprétations différentes ou encore à mesurer le temps nécessaire pour compléter l'ensemble des questions.

La section suivante vise à développer la méthode utilisée pour construire et analyser rigoureusement l'enquête quantitative mise en place dans cette recherche.

4.2. Méthode appliquée : le questionnaire en ligne

L'usage des outils paramétriques est rarement évalué en regard de la pratique numérique générale des bureaux d'architecture. Des enquêtes à large spectre sont rarement exploitées dans la littérature pour tester et mesurer l'impact réel des outils paramétriques dans la pratique quotidienne des concepteurs. Le questionnaire en ligne a donc été fondé sur la lecture de l'état de l'art décrit au chapitre 2 pour confronter les propos de la littérature avec le ressenti et la pratique architecturale belge.

Afin de questionner et dès lors de cerner au mieux les pratiques actuelles ainsi que les problématiques existantes, une des premières étapes de la méthode a été de définir la population à étudier. Il fallait envisager l'échantillon le plus large possible de manière à recueillir le plus de diversité et de croisements de points de vue.

Pour ce faire, une vaste enquête a été adressée à tous les architectes et ingénieurs architectes inscrits aux Ordres des Architectes en Belgique, c'est-à-

dire au Conseil francophone et germanophone ou au Conseil flamand. Ils ont été questionnés quant à leur pratique numérique générale et leurs connaissances sur la modélisation paramétrique. Cette vaste opération établit de manière empirique l'état de l'art des pratiques réelles des bureaux d'architecture belges.

La méthode invite près de 13.000 architectes et ingénieurs architectes, inscrits à l'un des Ordres belges sur les 14.482 membres inscrits en 2016 (Ordre des Architectes, 2016), à répondre à un questionnaire en ligne. Au vu de la grande quantité de personnes concernées, nous avons opté pour un questionnaire en ligne structuré en trois sections principales comme l'illustre la figure 23. La première partie du questionnaire recueille les données démographiques des participants afin de contextualiser chaque profil et de tester la représentativité de l'échantillon de répondants. Dix questions sont formulées (1 question ouverte, 7 questions semi-ouvertes et 2 questions fermées) et sont liées au genre, à l'âge, à l'expérience, aux principales tâches courantes de l'architecte, ainsi qu'à la taille de l'agence. La deuxième et la plus importante section questionne quant à elle la culture numérique des concepteurs, les outils numériques qu'ils utilisent, leur sentiment à propos de ces outils numériques et de leur impact sur le processus de conception architecturale. Ont également été formulées des questions spécifiques sur la complexité, telles que « *Enumérez les 5 facteurs principaux qui, de votre point de vue, rendent votre pratique actuelle plus complexe ?* » ou « *Pensez-vous que les outils numériques rendent votre pratique actuelle plus complexe?* ». Cette section contient 26 questions dont 6 questions ouvertes, 10 questions semi-ouvertes et 10 questions fermées. La section finale aborde la conception et les outils paramétriques. Elle est structurée autour de 9 questions (1 question ouverte, 1 question semi-ouverte et 7 questions fermées). Cette section demande, par exemple, de classer les difficultés rencontrées lors de l'utilisation d'outils paramétriques, en fonction des priorités de l'architecte ; elle sonde également si les concepteurs se sentent concernés par l'arrivée de nouveaux outils de conception appelés « paramétriques » et dans quelle période de temps ils envisagent de se former à l'utilisation de ces outils paramétriques. L'entièreté du questionnaire est disponible à l'annexe 4.



Figure 23. Structure du questionnaire en ligne

Le questionnaire a été prétesté auprès de trois architectes, ce qui nous a permis de clarifier le sens de certains énoncés, d'adapter certaines réponses à choix multiples et de tester le temps nécessaire pour remplir rigoureusement le questionnaire.

Après ce questionnaire d'essai, nous avons conclu que si un questionnaire rempli répondait à l'un des critères suivants, il serait considéré inutilisable et ne serait donc pas inclus dans les prochaines étapes de notre recherche :

- L'enquête a été complétée beaucoup trop rapidement et n'a donc pas pu être prise au sérieux. L'enquête d'essai a démontré que la limite de 15 minutes était la bonne limite ;

- Seule la première section de l'enquête sur les données sociodémographiques a été complétée (les deux autres étant complètement ignorées). Aucune donnée sur les outils de conception numérique ou paramétrique n'a donc été fournie. Cela signifie que certains questionnaires, où seules quelques questions ont été rejetées sur l'ensemble, sont considérés comme valables (dans ce cas, une notation « pas de réponse » ou NA apparaît pour les quelques questions rejetées) ;

- En ce qui concerne la taille de l'entreprise, nous avons mis de côté les participants travaillant dans des structures de plus de 100 personnes. Ces personnes, comme le révèle la section « tâches principales », sont pour la plupart des architectes qui travaillent uniquement comme enseignants ou qui font partie de structures d'entreprise plus grandes, ce qui n'entre pas dans le cadre de nos recherches.

D'un point de vue éthique, le questionnaire est anonyme. La dernière question du questionnaire « N'hésitez pas à laisser votre adresse email pour

recevoir les résultats et conclusions du questionnaire ou pour participer à un entretien (facultatif) » laisse cependant la possibilité au participant d'être recontacté par email, uniquement dans le cadre des deux thématiques énoncées. Cette liste de contact a été utilisée pour procéder à la phase d'entretiens téléphoniques explicitée à la section 5.2. Les premiers résultats publiés au travers de l'article « How Do Small and Medium Architectural Firms Deal with Architectural Complexity ? A Look Into Digital Practices » (Stals, Jancart, & Elsen, 2016) ont été diffusés à tous les participants ayant marqué leur intérêt.

D'un point de vue de la confidentialité, les résultats anonymes de cette enquête ont été utilisés uniquement dans le cadre de cette recherche, tel qu'annoncé aux participants avant le début du questionnaire.

L'état des pratiques numériques et des connaissances sur le paramétrique a donc été interrogé au travers de ce questionnaire. Nous approfondissons ensuite l'appréhension par rapport à l'usage des outils de modélisation paramétrique. Celle-ci a été approfondie en deux phases : une des deux méthodes est de questionner les participants d'une formation continue dont l'une des sessions sensibilise à l'usage de ces outils (méthode décrite à la section 0) l'autre méthode interroge les perceptions *a priori* de la modélisation paramétrique de certains architectes ayant pris part au questionnaire en ligne. Cette méthode est décrite à la section 5.2.

4.3. Méthodologie appliquée aux formations continues BIM

De nombreuses connaissances ont été produites relatives aux outils de modélisation paramétrique et leur influence potentielle sur le workflow des designers (explicité à la section 2.4 du chapitre 2). Cependant, l'appréhension de ces outils n'a, à notre connaissance, jamais été mesurée parmi un échantillon de professionnels. Cette phase exploratoire de la recherche questionne les connaissances des participants au début d'une journée de formation et à l'issue de celle-ci. L'objectif est de mettre en évidence l'évolution de l'approche des designers vis-à-vis de cette typologie d'outils numériques.

La Faculté d'Architecture de l'Université de Liège organise depuis 2017 un certificat d'université en Building Information Modeling (BIM) pour petites et

moyennes structures. Le but de cette formation continue est de former des « BIM coordinateurs » à se confronter au processus collaboratif BIM et à implémenter le processus dans la structure où ils sont actifs. Les participants proviennent de différents horizons dans le secteur du bâtiment : architectes, ingénieurs architectes, ingénieurs spécialisés ou corps de métier. Le corpus est enseigné en 8 journées de cours se répartissant en 7 thématiques d'enseignement, l'une d'elles étant nommée « le BIM et l'architecture paramétrique ». Quatre sessions ont eu lieu sous le même format (avril et octobre 2017 et juin et novembre 2018). C'est lors de ces séances que nous avons recueilli des données sur l'impact d'une journée de formation à l'usage d'outils de modélisation paramétrique en architecture. Le logiciel enseigné lors de cette immersion est le plugin Grasshopper© associé au logiciel Rhinoceros©.

La formation rassemble plusieurs objectifs. Il est d'abord question, d'une manière générale, d'élargir la culture numérique des participants. Pour ce faire, nous présentons sommairement l'évolution du numérique jusqu'à l'arrivée du paramétrique en architecture. Nous faisons découvrir des projets de petite envergure ayant fait l'objet d'une modélisation paramétrique et exposons le taux de connaissance et de pratique de ces outils en Belgique. Dans le cadre de cette introduction, un des exemples présentés (figure 24) a suscité de nombreuses réactions. Nous le décrivons ici brièvement étant donné son influence considérable sur les participants, et en particulier sur la perception qu'ils ont eue des outils de modélisation paramétrique.

L'exemple en question concerne la conception d'un revêtement de façade, initialement envisagée par ses auteurs à travers une modélisation réalisée via un logiciel de CAO traditionnel et que nous avons reproduite via une modélisation paramétrique sur Grasshopper©. L'objectif est de montrer que la modélisation paramétrique fait sens, même pour des projets de petite envergure. Dans ce contexte, celle-ci permet une plus grande flexibilité et adaptabilité des profils utilisés en revêtement, en fonction des ambitions esthétiques des architectes, de la largeur, de la profondeur, ou encore du pas des profils pouvant facilement être modifié via des curseurs.



Figure 24. Façade d'une habitation unifamiliale (Pygma Architecture) composée de différents profilés en acier

A la suite de cet aperçu, nous procédons à une séquence théorique abordant les grands principes de fonctionnement du logiciel (programmation visuelle, système de données d'entrée et de sortie, composants de l'interface, ...). Rapidement après avoir donné ces explications, nous entamons avec eux différents exercices. En début de séance, le participant est totalement dépendant des explications qui lui sont prodiguées. Le participant est accompagné par deux ou trois encadrants qui vont l'aider à réaliser les exercices demandés. Au fur et à mesure de la journée, les participants trouvent leurs repères et commencent à assimiler les principes fondamentaux. Nous abordons également le rapport avec le BIM et, dans ce cas-ci, la connexion *live* entre Grasshopper© et ArchiCAD© et nous illustrons l'intérêt de cette complémentarité par des exemples explicités oralement.

La pratique personnelle du logiciel leur permet d'être confronté à ce fonctionnement particulier, de développer des premiers mécanismes et de questionner ce type de logiciel en regard de leur pratique individuelle.

A l'issue de cette journée de formation, notre objectif est d'avoir développé leur culture numérique, de les avoir sensibilisé à l'émergence de nouveaux types d'outils en architecture, et de comprendre les grands principes du paramétrique pour pouvoir dialoguer avec des collaborateurs.

Lors de chaque séance « le BIM et l'architecture paramétrique », les participants ont été interrogés sous différents formats et à deux reprises : une première fois avant d'entamer la journée et ensuite à sa clôture. Toutes les données ont donc été récoltées sur place, le jour-même.

Un premier questionnaire papier reprenait deux questions (1 question fermée et 1 question semi-ouverte disponibles à l'annexe 5) qui ont permis de catégoriser les participants selon deux critères : usage ou non-usage du paramétrique et « bonne définition », « définition incomplète », « définition incorrecte » du paramétrique, répartissant ainsi les participants selon 6 types de profils (Tableau 5).

En fonction du profil, chaque participant s'est vu attribuer un second questionnaire en ligne interrogeant ses acquis et perceptions en matière de modélisation paramétrique, sa pratique actuelle et la pertinence de l'usage de tels outils dans le processus de conception de projets par des petits bureaux d'architecture. Les différents questionnaires, fondamentalement similaires, interrogeaient les participants sur les mêmes thématiques mais adaptées à leur niveau de pratique. Un exemple de question est repris ci-dessous accompagné de la question suivante apparaissant automatiquement en fonction de la réponse sélectionnée par le participant. Ces questionnaires sont constitués identiquement aux questionnaires utilisés pour les entretiens téléphoniques. Leur composition exacte est décrite à la section 5.2. (se référer à l'annexe 9 pour les questionnaires complets). Ces questionnaires interactifs en ligne, devaient être remplis au moment-même. La formation en tant que telle n'a démarré qu'une fois les questionnaires complétés.

Avez-vous déjà essayé d'utiliser des logiciels dits paramétriques?

- *Si c'est le cas : y a-t-il des éléments qui vous ont séduit? Si oui, lesquels?*
- *Si ce n'est pas le cas : y a-t-il des éléments qui vous ont séduit quand vous avez entendu parler de ce type de logiciels? Si oui, lesquels?*

En fin de journée, les participants ont répondu à un troisième et dernier questionnaire papier de 7 questions (5 questions semi-ouvertes et 2 questions ouvertes) recueillant notamment leur ressenti quant à l'usage du logiciel enseigné, aux connaissances acquises, à la pertinence de l'usage de tels outils dans le processus de conception de projets par des petits bureaux

d'architecture. Certaines questions permettent de comparer l'attitude et l'aptitude des participants avant et après cette journée de formation. Le questionnaire complet est consultable à l'annexe 6.

Nous avons ensuite proposé et animé une table ronde afin de confronter les avis des participants. Les questions que nous avons préparées pour animer et recentrer la discussion sont pour la majorité identique au questionnaire que les participants venaient de compléter (cfr. annexe 7). L'objectif est de partager les ressentis, les points de vue et d'en débattre collectivement.

A l'image du questionnaire décrit à la section 4.2, les participants étaient libres de participer à cette recherche. Les données ont été rendues anonymes et sont utilisées dans le cadre strict de cette recherche.

L'échantillon analysé ne prend en considération que les profils d'architecte ou ingénieurs architecte ayant répondu à la totalité des questionnaires. Certains participants à la formation n'ont donc pas été comptabilisés dans l'analyse.

Lors des quatre sessions dispensées, 49 participants se sont inscrits et 30 ont répondu aux critères de sélection énoncés. Ces 30 participants sont répartis selon leur usage ou non-usage d'outils de modélisation paramétrique mais également selon la définition qu'ils ont donnée du terme « modélisation paramétrique ».

Une définition a été considérée comme « bonne » lorsque les participants exprimaient nettement le rapport à la gestion de données et la recherche formelle. Par ailleurs, les définitions ont été catégorisées comme incomplètes lorsque cette distinction était moins claire et pouvait faire référence aux logiciels « BIM » tel que le propos suivant : « *Il s'agit de réaliser une maquette 3D, non pas uniquement par le dessin mais également en paramétrant les propriétés des différents objets.* ». Les définitions considérées comme incorrectes exprimaient généralement la méconnaissance totale du participant face à ce terme: « *J'en ai déjà entendu parler mais je ne sais pas de quoi il s'agit exactement* ».

La table suivante reprend la répartition des profils analysés en considérant leur connaissance et usage des outils paramétriques. Cette répartition permet de recueillir et de traiter très spécifiquement la perception de non-utilisateurs à ce type de logiciels.

Table 5. Répartition des profils selon leur usage des outils de modélisation paramétrique et leur connaissance du terme « modélisation paramétrique »

	Bonne définition	Définition incomplète	Définition incorrecte
Usage	3	2	1
Pas d'usage	4	12	8

5. Les entretiens

5.1. Méthode générale

Dans cette section, nous nous intéressons à la théorie de l'entretien que nous avons appliquée de différentes manières dans le cadre de cette thèse (sections 5.2 et 5.3). De manière générale, l'entretien est une méthode de recueil de données qualitatives. Elle consiste en une pratique conversationnelle produisant des connaissances par l'interaction entre un membre de l'équipe et une personne interrogée (ou un groupe de personnes interrogées) en l'interpelant sur son expérience, ses attitudes et ses comportements (Brinkmann, 2014). A l'issue d'un entretien, l'objectif est d'obtenir un descriptif de la pratique interrogée afin d'interpréter ces données et ainsi de décrire un phénomène.

Contrairement aux questionnaires, les entretiens peuvent laisser une plus grande liberté d'expression aux participants et une grande flexibilité aux personnes menant l'entretien (Lallemand & Gronier, 2016). Ces entretiens offrent ainsi des moments de dialogue privilégiés avec les acteurs de la pratique questionnée. Les données se construisent dans l'échange notamment en fonction des propos du participant.

Les entretiens existent sous différentes formes, notamment par téléphone ou par interaction directe. Ces deux formes d'entretien sont exploitées dans le cadre de la thèse. Par ailleurs, l'entretien peut être plus ou moins structuré : entretien non directif (ou exploratoire), entretien semi-directif, entretien direct. Dans le cadre d'une recherche quantitative, l'entretien est davantage standardisé et construit sur des questions fermées tandis qu'une recherche qualitative repose plutôt sur des entretiens semi-structurés ou ouverts. Dans ce second cas, le chercheur établit une série de questions guidant les entretiens avec une structure commune, tout en laissant une certaine flexibilité d'interaction entre chercheur et interrogé (Brinkmann, 2014; Lallemand & Gronier, 2016). Nous avons recours aux entretiens semi-directifs et nous expliquons leur mise en place dans les sections suivantes.

La revue de la littérature met en évidence trois points de débat existants au sujet de l'entretien, auxquels il est important d'être attentif afin de préserver la qualité des propos récoltés : la subjectivité des propos, le profil des participants et l'exhaustivité de l'information recueillie.

La méthode de l'entretien est souvent critiquée en regard de la subjectivité qu'elle peut induire. Lorsque l'interrogé explique son expérience vécue, il induit deux réalités : d'une part la réalité objective, qui est une réalité historique des événements vécus et relatés et, d'autre part, la réalité subjective qui parcourt le vécu de l'histoire racontée (Dessart, 2017). Par ailleurs, une certaine part de subjectivité provient du regard posé par le chercheur lors du traitement et de l'analyse des données.

Le participant est la deuxième source d'influence majeure d'un entretien. Le choix de l'échantillon des personnes interrogées est donc primordial. En fonction du contexte et de l'objectif, les entretiens peuvent être réalisés sur une population lambda ou sur une population choisie de manière spécifique.

La méthode de l'entretien engendre une grande quantité d'informations recueillies. Le traitement de ces données est chronophage : recueil de données, retranscription, analyse, ... Par ailleurs, le traitement des données rejoint la question de la subjectivité. Il faut être capable de retenir les informations à traiter de manière pertinente. Il est donc important de discuter le traitement de ces données dans la section Résultats. Brinkmann (2014) souligne que malgré ces points de débat, la méthode de l'entretien est considérée comme l'instrument de recherche le plus pertinent pour une recherche qualitative et sociologique.

Pour limiter ces dérives, nous avons pris appui sur les traces graphiques des projets abordés, triangulé la sélection des séquences clefs, choisi les participants en fonction de leur expertise. Ces éléments sont plus amplement détaillés dans chacun des cas d'étude que nous décrivons dans les deux sections suivantes.

Pour réaliser un enregistrement audio et/ou vidéo d'une session et dès lors procéder à sa retranscription, il est indispensable d'obtenir la permission écrite des participants. Celle-ci peut être obtenue au travers d'un formulaire de consentement signé par chaque participant. Dans la mesure du possible, il est

recommandé de filmer les participants de dos ou les parties du corps faisant l'objet de l'étude comme les mains (Lallemant & Gronier, 2016).

Une fois les entretiens enregistrés, le chercheur peut analyser les verbalisations selon deux méthodes. L'objectif est soit d'obtenir un complément d'informations par rapport à un recueil qu'il possède déjà et dans ce cas, il n'analyse pas l'entretien en profondeur et relève manuellement les principaux thèmes évoqués, soit le chercheur désire analyser finement un discours avec pour objectif d'en extraire des informations nouvelles ou d'explorer un nouveau champ d'investigation (raisonnement, mode de pensée, organisation, etc.) (Wolff et al., 2005). Dans ce cas, le discours est étudié de manière rigoureuse, ce qui passe par une retranscription complète de celui-ci. Nous utilisons ces deux méthodes dans notre recherche et nous les justifions dans les sections suivantes.

Dans le cas de la seconde méthode, la première étape du traitement des données est la retranscription qui constitue le corpus de base pour l'analyse. La retranscription d'un entretien va elle aussi dépendre de ses objectifs et du niveau de précision attendu. Certaines méthodes de retranscription favorisent une retranscription scrupuleuse de la parole (Jefferson, 2004), tandis que d'autres favorisent la fidélité du contenu (Bernier & Perrault, 1987). Ces derniers éliminent les expressions grammaticalement incorrectes, les erreurs de langage, les hésitations ou encore les amorces de phrases et les phrases non compréhensibles. Elles ne sont conservées que si elles apportent une tonalité particulière au discours. Dans notre cas, nous avons opté pour une méthode qui souligne lorsque c'est nécessaire l'expressivité des interrogés, sans pour autant alourdir la lecture. Nous avons retranscrit l'ensemble des enregistrements selon la codification décrite à la section 3 - Retranscription, à l'exception des conversations qui ne faisaient pas partie de la thématique de l'entrevue (ex : si l'entretien a été interrompu par une conversation entre l'interrogé et une autre personne n'ayant aucun lien avec le sujet questionné).

Concernant l'analyse de ces retranscriptions, celle-ci peut être exécutée manuellement en effectuant une analyse thématique par exemple, ou l'analyse peut être effectuée par un logiciel d'analyse textuelle ou d'analyse de discours (Wolff et al., 2005). Cette deuxième possibilité nécessite une formation de la part de l'utilisateur, tant au niveau des principes qu'au niveau de l'utilisation des statistiques de l'interprétation des résultats délivrés par le logiciel. Le

recueil de propos soutenant la phase qualitative de notre recherche, nous avons opté pour une analyse thématique sans recours à un logiciel, en nous référant à la revue de la littérature que nous avons effectuée.

Tout au long d'une analyse, les données sont progressivement organisées. Dans l'ensemble, toute analyse concerne d'abord un tri des données afin de pouvoir traiter la masse d'informations récoltée et une réorganisation des données sous forme de schémas, de tableaux, de texte structuré. Dans cette thèse, nous avons procédé sous forme de résumés des entretiens et d'identification des éléments clés à retenir pour les séquences d'entretien téléphonique (section 2.1 du chapitre 4). Nous avons identifié les observations majeures pour chaque projet concernant les entretiens rétrospectifs (section 4.1 du chapitre 4). Les données sont ensuite retravaillées. Pour ce faire, nous nous référons à la proposition de Van Steenwinkel (2015) qui considère l'étiquetage de blocs de données comme un moyen « de réfléchir, sinon d'organiser réellement les données » et qui permet une reconfiguration des idées. Le développement de catégories n'est pas seulement un moyen de façonner le produit final de la recherche (un tableau, un schéma, un texte), mais aussi un moyen de rechercher, d'examiner et d'apprendre à connaître les données. Ce qui est important, c'est d'être conscient des différentes sources de catégories : catégories dérivées de théories élaborées antérieurement, catégories destinées à refléter les perspectives des participants, ou catégories construites. L'analyse des résultats des entretiens téléphoniques menés reprend les différentes catégories qui se dégagent et qui sont illustrées par des extraits d'échanges aussi appelés verbatims. Le travail effectué sur les données est présenté et détaillé à la section 2 du chapitre 4.

5.2. Méthode appliquée : les entretiens téléphoniques

Cette technique d'enquête qualitative vient compléter et approfondir la troisième partie du questionnaire général sur le numérique (section 4.2, chapitre 3). Via ce questionnaire en ligne, les participants ont pu signaler leur volonté de s'entretenir plus longuement sur le sujet de thèse. Ces personnes ont donc été contactées afin de procéder à un entretien approfondi sur les perceptions *a priori* de la modélisation paramétrique. Les 13 entretiens menés ont été réalisés auprès d'acteurs ayant répondu favorablement à cette

deuxième sollicitation (répartition reprise dans le tableau 6). Ces personnes, majoritairement des architectes de formation, ne font pas spécifiquement usage de la modélisation paramétrique dans leur pratique architecturale. Il est important de noter que les interrogés, selon leur expertise, ont pu être déstabilisés par certaines questions. Malgré le temps accordé à la réflexion ou la reformulation de la question, certaines réflexions peuvent être incomplètes. La question ci-dessous est un exemple de question qui demande à l'interrogé de prendre du recul par rapport à sa pratique personnelle afin de formuler une réponse plus générale sur la pratique architecturale : « De manière générale, pensez-vous que dans les petits bureaux d'architecture, ces logiciels paramétriques sont pertinents pour tous les projets ou pour certains ? ».

Les entretiens se sont quasiment tous déroulés via une discussion téléphonique. Deux entretiens ont été réalisés en face-à-face. Cette situation semblait convenir davantage aux interrogés et ne remettait pas en question le processus méthodologique mis en place. La prise de notes des réponses est complétée par un enregistrement audio. Celui-ci permet une écoute multiple afin de saisir toutes les subtilités des réponses et d'en retranscrire les verbatims clefs. Les participants ont donc été mis au courant de l'enregistrement de l'entretien. La retranscription exacte des propos d'une personne est sujette à la question de l'éthique. Afin d'avoir une trace de l'accord des architectes interrogés pour pouvoir révéler une retranscription complète de leurs propos, nous leur avons demandé de compléter et renvoyer par email un formulaire pour indiquer leur éventuel non-consentement à cette retranscription. Nous avons procédé de la sorte afin de minimiser la tâche de l'interrogé au-delà du temps déjà consacré à l'entretien. Nous n'avons reçu aucun document complété. L'ensemble des entretiens téléphoniques a donc pu être retranscrit. Le document faisant état de cet accord est placé en annexe 8.

Table 6. Répartition des personnes potentielles à interroger en regard de leurs connaissances

Questionnaire général en ligne		Questionnaire téléphonique	
N'hésitez pas à laisser votre adresse email pour recevoir les résultats et conclusions du questionnaire ou pour participer à un entretien. (facultatif)	Utilisez-vous des outils paramétriques?	Qu'évoque pour vous le terme "modélisation paramétrique" en architecture?	Nombre de réponses / Nombre de personnes à contacter
Email fourni	Non	Définition correcte	1/6
		Définition non complète	3/15
		Mauvaise définition	5/87
	Oui	Définition correcte	1/3
		Définition non complète	2/9
		Mauvaise définition	1/10
Email pas fourni 442/572			

Par ailleurs, pour des raisons d'éthique mais également d'objectivation des données, toutes les données sont rendues anonymes. Les propos recueillis mettent en évidence des processus de conception, de collaboration mais également des opinions personnelles de la pratique architecturale des concepteurs interrogés. L'anonymat nous semble opportun pour éviter tout jugement de valeur des architectes ainsi que pour se détacher de la personnalité de ceux-ci. Cela permet d'accroître l'objectivité des résultats.

Les entretiens téléphoniques enregistrés sont au nombre de 13. Quatre d'entre eux sont déficients (à savoir que l'enregistrement a été enclenché au-delà de la première question ou le bruit de fond a entraîné des séquences inaudibles) et 1 entretien est totalement inaudible. Pour ce dernier cas, seule la prise de notes en direct lors de l'entretien téléphonique est considérée comme un contenu exploitable. Ces 13 entretiens constituent le corpus de données analysées. Les entretiens ont duré entre 08'48'' et 44'17'' avec une durée moyenne de 18'20''.

Les profils interrogés ont été catégorisés en fonction de la justesse de leur réponse à la question issue du questionnaire en ligne : « *Qu'évoque pour vous le*

terme 'modélisation paramétrique' en architecture? ». Afin de considérer la justesse de leur réponse, nous avons eu recours aux trois catégories de réponses définies également pour la méthode de la formation continue BIM explicitée plus en profondeur à la section 4.3. La première concerne les acteurs ayant donné une définition considérée comme correcte de la modélisation paramétrique. Une deuxième catégorie concerne les acteurs ayant fourni une définition incomplète. La troisième catégorie regroupe les acteurs ayant donné une mauvaise définition ou n'ayant pu donner de réponse.

Le cheminement de sélection des participants retenus pour participer aux entretiens téléphoniques est repris dans le tableau précédent. Les participants font donc partie des architectes interrogés via le questionnaire diffusé largement et ayant donné leur adresse email pour être recontactés soit pour un autre entretien, soit pour obtenir les résultats du questionnaire auxquels ils ont participé. Parmi les personnes recontactées, 13 personnes ont donné leur accord pour un entretien approfondi.

La méthode de l'entretien semi-directif a été retenue pour questionner les participants. Ainsi, les 13 participants ont été soumis à l'une des six grilles d'entretien élaborées et disponibles à l'annexe 9. Ces grilles ont toutes été construites selon la même structuration. Le déroulement des entretiens s'agence autour de trois parties, quel que soit le niveau de connaissance des outils paramétriques de l'interrogé.

L'entretien débute par la vérification du niveau de connaissance du participant concernant les outils de modélisation paramétrique et l'origine de cette connaissance. La section contient entre 1 et 4 questions ouvertes en fonction du questionnaire. La première question ouverte posée est par exemple formulée de deux manières différentes en fonction du questionnaire :

« Dans le questionnaire précédent, le terme modélisation paramétrique ne semblait pas évoquer quelque chose de concret lorsque vous y aviez répondu. En avez-vous entendu parler depuis? Si oui, comment en avez-vous entendu parler? »

« Dans le questionnaire précédent, vous aviez donné une définition correcte du terme « modélisation paramétrique ». Comment en avez-vous entendu parler? »

La seconde et principale section de l'entretien se réfère à la justesse de la définition formulée au sujet du paramétrique et l'utilisation ou non des outils paramétriques. En fonction de ces deux critères, le nombre et le type de questions proposées au participant varient. Nous proposons au lecteur intéressé par ces détails de consulter les questionnaires complets à l'annexe 9. Pour les acteurs ayant déjà utilisé ou utilisant un outil paramétrique, les questions ciblaient soit les raisons de l'abandon du paramétrique sur un de leur projet, par des questions telles que « *Pouvez-vous identifier ce qu'il aurait fallu pour que vous adhérez à l'usage d'un logiciel paramétrique ?* », soit les conditions de son utilisation dans la pratique professionnelle de l'architecte, ses avantages et ses inconvénients, sa fréquence, la typologie de projet, etc. : « *Utilisez-vous les outils paramétriques pour tous les projets ?* » ou « *Est-ce que vous les utilisez comme outils de conception et/ou comme outils de représentation ?* ». Pour les acteurs n'ayant jamais utilisé un outil paramétrique, l'entretien fut l'occasion de présenter un logiciel paramétrique au travers de deux courtes vidéos montrant brièvement le fonctionnement de l'outil Grasshopper. Celles-ci peuvent être visualisées sur le site www.adelinestals.be. A la suite du visionnage, nous recueillons les premières réactions du participant découvrant cette typologie d'outils, pour comprendre comment les acteurs interrogés reçoivent un tel outil et imaginent l'impact possible de ce dernier sur l'évolution des compétences et pratiques de collaborations interprofessionnelles.

L'entretien s'achève par une section plus générale sur la potentielle utilisation de ces outils dans les petits bureaux d'architecture. Il est demandé au participant de réfléchir et débattre la pertinence d'un tel usage au-delà de sa pratique professionnelle propre.

5.3. Méthode appliquée : les entretiens rétrospectifs

Les entretiens rétrospectifs ont permis de recueillir des discours relatifs à des projets architecturaux ayant fait l'objet d'une réflexion paramétrique. Ces entretiens ont été effectués selon la méthode de l'entretien semi-directif. Cette méthode de collecte d'informations nous semble adaptée car elle oriente la personne interrogée sur des sujets ciblés tout en lui octroyant une certaine flexibilité, ce qui semble opportun pour la description d'un projet.

Les questions posées ont donc été classées en grandes thématiques qui structurent l'entretien en quatre catégories. L'ensemble des questions potentiellement posées est joint à l'annexe 12.

Le premier groupe de questions à caractère informatif permet de rassembler les informations nécessaires concernant l'agence d'architecture faisant l'objet de l'analyse. Le nombre de collègues, la sensibilité de chacun d'entre eux envers les logiciels utilisés et le mode d'organisation du bureau, sont autant d'informations permettant de définir de manière précise la population interrogée.

La seconde partie délimite l'usage général du paramétrique dans ce contexte de travail. Nous questionnons l'ancienneté de la pratique, l'origine de sa découverte, le niveau de maîtrise de sa pratique ou encore son taux d'utilisation en regard du nombre total de projets suivis par le bureau d'architecture. Tel que suggéré par Wolff et ses collègues (2005), nous abordons au minimum deux analyses rétrospectives de projets menés par le bureau en question.

En amont de l'entretien, il a été demandé à l'interrogé de rassembler le plus de traces possibles du processus (croquis, maquettes, modélisation 3D, ...) de projets au sein desquels les outils de modélisation paramétrique ont été utilisés, même de manière partielle et/ou interrompue. Ces éléments permettent d'aborder le corps principal de l'entretien consistant à retracer l'historique des projets. Les traces permettent en effet un accès plus efficace à la mémoire. Le processus de conception est dès lors retracé le plus fidèlement possible et ancre les verbatims dans un contexte concret. L'accès aux traces n'a pas été possible dans tous les cas. Nombreux projets sont à présent dessinés en tout ou en partie à l'ordinateur effaçant petit à petit l'historique de la réflexion. Le support principal de ce recueil de données est donc constitué des entretiens eux-mêmes. Les questions posées sont ajustées selon l'usage du paramétrique au sein de chaque projet : le bureau d'architecture a renoncé dès le départ à l'usage du paramétrique, il a abandonné en cours de processus, l'utilisation du paramétrique s'est déroulé jusqu'à l'aboutissement final du projet.

La dernière partie de l'entretien, à caractère plus ouvert, consiste à questionner le point de vue de l'interrogé sur l'extrapolation de l'usage du

paramétrique dans sa pratique architecturale, ses espoirs et ses attentes quant à l'évolution de cette typologie d'outils numériques.

La posture attentive du chercheur a permis de favoriser un discours narratif du projet évoqué. En complément de la grille d'entretien utilisée, nous avons eu recours à des questions de relance réorientant le propos sur des descriptions de faits concrets, plutôt que sur des représentations imaginées de ce qu'est la pratique questionnée.

En pratique, tous les entretiens rétrospectifs ont été enregistrés voire filmés, selon l'accord de l'opérateur interrogé. Des photos ont également été prises afin de figer certaines scènes particulières. Pour tous ces cas d'étude, les entretiens ont été entièrement retranscrits. Lorsque les résultats reposent sur une analyse fine des discours, afin de recueillir des expériences, des réflexions, le chercheur ne peut se contenter de ses notes ou de ses grilles d'analyse. Dès lors, les entretiens ont été retranscrits complètement et sont disponibles aux annexes 13, 14 et 15.

Contrairement aux entretiens téléphoniques qui ont été entièrement anonymisés, les entretiens rétrospectifs ainsi que les observations *in situ* ne le sont pas. Dans ce cas-ci, le lien entre le propos et l'interlocuteur apporte une dimension intéressante pour l'analyse. Par ailleurs, chacun de ces interlocuteurs est favorable à l'évocation claire de son nom, évoquant notamment la possibilité pour le lecteur de contextualiser concrètement le propos voire même de pouvoir se rendre sur les lieux pour découvrir la réalité des projets qui figurent dans cette recherche.

Nous avons pu ainsi interroger trois bureaux d'architecture ayant une approche paramétrique également différente. La description (composition, expertise, répartition des tâches, ...) de ces trois cas est détaillée dans la section Résultats. Ils nous ont permis d'aborder trois pratiques distinctes, mais sans cependant pouvoir entrer en profondeur dans les enjeux de chaque manipulation et chaque discussion engendrées par l'usage d'outils de modélisation paramétrique, puisque l'entretien rétrospectif se fait sur base de la mémoire de l'interrogé.

Afin d'observer d'autres facettes d'une pratique architecturale paramétrique, nous avons donc mis en place des observations *in situ*.

6. Les observations *in situ*

6.1. Méthode générale

L'observation est un des moyens de collecte de données sélectionnés car il permet de compléter les informations obtenues au cours des entretiens sous un autre angle de vue issu de l'observateur. En effet, Lallemand et Gronier (2015) considèrent que l'observation ne consiste pas uniquement à « regarder » mais recouvre un champ d'action plus large qui a pour but de « recueillir ce que font réellement les personnes lorsqu'elles agissent librement ». Contrairement à un entretien ou à un questionnaire, l'observation *in situ* d'un individu évite ce décalage entre l'action décrite et ce qui est réellement fait, limitant ainsi la divergence entre les rapports verbaux et le comportement (Blomberg, Burrell, & Guest, 2003). Blomberg et ses collègues attribuent ce décalage à trois effets majeurs. Premièrement, il peut être volontaire afin de correspondre aux attentes du chercheur ou de respecter les convenances. Ensuite, il peut être lié à un défaut mémoriel. Enfin, il peut survenir lorsque le sujet est questionné sur des habitudes ancrées qui lui paraissent évidentes.

L'observation *in situ* est considérée par Baker (2006) comme une méthode issue de l'ethnographie. L'ethnographie est elle-même considérée soit comme une méthode de recherche qualitative, soit comme une manière de voir les différentes activités humaines (Blomberg et al., 2003).

L'ethnographie s'inspire au départ de l'anthropologie, c'est-à-dire l'étude de l'être humain. A l'origine, les ethnographes s'attachaient essentiellement à rencontrer de petites communautés non-occidentales de manière à comprendre leur mode de vie quotidienne et à étudier les us et coutumes en les retranscrivant essentiellement par écrit. A présent, l'ethnographie s'est étendue à étudier d'autres phénomènes sociétaux, comme le monde du travail ou encore les nouvelles technologies dans divers champs disciplinaires (Blomberg et al., 2003).

L'ethnographe cherche à analyser des comportements et/ou des actions peu connus. Il tente dès lors d'obtenir des informations directement par les personnes évoluant dans le milieu étudié. La volonté d'observer des personnes dans leur environnement quotidien repose sur la conviction qu'il est compliqué

de décrire de manière exacte une action si les interrogés ne sont pas dans les conditions où l'action se déroule habituellement (Blomberg et al., 2003). Cette démarche s'oppose également aux approches expérimentales, qui cherchent au contraire à contrôler l'environnement du sujet afin d'isoler un ou plusieurs comportement(s) observable(s) (Lallemand & Gronier, 2016). Cependant, une des limites de l'observation est alors l'accessibilité au terrain d'étude (terrain à risque, privé, peu fréquent, courant, ...).

Le rôle crucial de l'ethnographe dans ce type de recherche peut engendrer des biais qui sont dans ce cas de l'ordre de la perception et de l'objectivité (Lallemand & Gronier, 2016; Martineau, 2005). L'observation est influencée d'une part par l'identité du chercheur et, d'autre part, par le rôle endossé par ce dernier dans l'environnement étudié.

L'observation implique deux enjeux majeurs pour le chercheur. Celui-ci doit trancher entre deux attitudes possibles vis-à-vis des participants : soit garder son anonymat, soit se révéler et expliciter ses intentions. Le rôle d'observateur implique également de s'investir abondamment, et ce, principalement dans le cadre d'une observation participante. Ce positionnement peut mener à un déséquilibre entre le rôle de l'observateur et la personne qu'il est. Le chercheur se doit d'y être attentif.

Le rôle du chercheur dépend de son « engagement dans l'action avec les sujets observés » (Martineau, 2005, p.8). Quatre positionnements sont définis par Gold (1958) : le participant complet, le participant comme observateur, l'observateur comme participant et l'observateur complet. Baker définit également le rôle de non-participant (2006).

Nous résumons chaque positionnement et développons le positionnement adopté dans le cadre de cette recherche dans la section suivante.

Le **participant complet** dissimule ses objectifs et sa véritable identité aux yeux des personnes qu'il souhaite observer. Les avantages sont que l'observateur expérimente lui-même certaines activités et récolte ainsi des informations essentielles (Blomberg et al., 2003) ; sous couverture d'anonymat, il s'assure la spontanéité des observés (Baker, 2006). Cependant, ce positionnement empêche le chercheur de prendre des notes en temps réel. Cette temporalité laisse place à des oublis voire des erreurs lorsque le chercheur doit se remémorer les événements a posteriori (Blomberg et al.,

2003). Des problèmes d'éthique émergent également, liés à l'anonymat du chercheur. L'immersion totale peut aussi engendrer une perte d'objectivité (Bastien, 2007). Certains sociologues tels que Bourdieu émettent des doutes quant à la pertinence méthodologique de l'observation participante. Comment être à la fois le sujet et l'objet ?

Le **participant comme observateur** prend le même rôle que le participant complet. La différence est que le chercheur ne travaille pas dans l'anonymat. Les observés connaissent donc les objectifs de la recherche. La problématique majeure issue de ce positionnement est que l'acceptation du chercheur par les observés peut prendre du temps. Une fois celle-ci acquise, une forme de sympathie pour le chercheur peut s'installer jusqu'à l'inversion possible des rôles entre observateur et observés (Gold, 1958).

L'**observateur comme participant** passe plus de temps à observer qu'à pratiquer (Baker, 2006). Le chercheur mène ses observations et les complète en participant si besoin. Le chercheur a donc plus de recul que dans les deux premiers positionnements où sa participation est complète. Ce rôle laisse également le temps au chercheur de prendre des notes dans le vif de l'action (Blomberg et al., 2003).

L'**observateur complet** a la particularité d'adopter un rôle passif et d'éviter toute interaction avec les sujets (Baker, 2006). Ce type d'observation sert généralement de point de départ à d'autres types d'observation en étant considéré comme une opération de reconnaissance (Gold, 1958). Pour ce dispositif, les observés ne sont généralement pas tenus au courant des objectifs de l'observation. Les observés peuvent développer un sentiment de malaise engendrant de la méfiance vis-à-vis de l'observateur. Bien que nous ayons opté pour ce positionnement, nous avons adapté sa mise en œuvre au cadre de recherche qui nous occupe.

La **non-participation** est l'observation de personnes depuis une autre pièce ou grâce à des caméras cachées. Les sujets observés ne sont donc pas conscients d'être le centre d'une étude. Ce positionnement permet d'observer de manière non intrusive. Les résultats issus de ces observations manquent parfois de profondeur (Baker, 2006). A l'image du participant complet, ce positionnement engendre des problèmes d'éthique en raison de l'anonymat et

du caractère dissimulé de l'opération puisque les sujets sont observés à leur insu.

Lors de la phase d'observation, le temps consacré à la collecte de données est un moment essentiel de la recherche. Afin de soutenir au maximum la captation de données, l'observateur est amené à s'outiller. La pertinence des outils employés est d'une grande importance. Différents moyens sont à sa disposition pour l'aider dans sa démarche. Lallemand et Gronier (2016) relèvent cinq outils à la disposition du chercheur lorsque ce dernier mène des observations : la fiche ou grille d'observation que nous explicitons à la section suivante, l'enregistrement audiovisuel qui permet un visionnage complet et un travail sur les données brutes, l'enregistrement d'entretiens complémentaires auquel nous avons procédé au travers d'entretiens rétrospectifs, l'analyse des artefacts utilisés par les participants, logs ou fichiers comprenant les actions d'un système informatique par les systèmes de tracking, qui n'a pas été retenu pour outiller nos observations. Afin de faciliter nos observations, nous avons mis en place une grille d'observation. Au-delà de ces outils, nous avons eu recours au séquençage des enregistrements afin d'analyser les données brutes. Nous expliquons notre méthodologie propre à la section suivante.

6.2. Application à nos cas d'étude

La méthode de l'observation *in situ* a été employée afin d'accéder à des pratiques paramétriques réelles et en cours dans un bureau d'architecture de petite taille. Comme nous l'avons précédemment évoqué dans la section sur le contexte d'étude du paramétrique, les recherches actuelles se concentrent majoritairement sur les grandes agences d'architecture ayant un workflow bien établi. Nous avons également vu que parmi les nombreux répondants au questionnaire diffusé largement en ligne, seuls 22 bureaux annoncent utiliser ce type de logiciel. Nous accédons donc à un terrain peu exploré et rare en Belgique au vu du faible nombre d'agences de petite taille utilisant des outils de modélisation paramétrique. Par ailleurs, le temps nécessaire à l'établissement d'un contexte de travail propice est considérable. De ce fait, nous nous sommes focalisés sur deux bureaux d'architecture ayant des projets dont les stades

d'avancement et les éléments concernés par la modélisation paramétrique sont différents.

Cette dernière phase de la recherche repose donc sur deux modes de production de données (figure 25) : d'une part les entretiens, transformés en données par la transcription de ceux-ci, et d'autre part, les observations *in situ* transformées en données par leur description. Les verbatims illustrent les propos des interrogés, les représentations qu'ils se construisent de leur propre pratique. Par ailleurs, les descriptions sont la trace d'actions et d'interactions auxquelles le chercheur a assisté.

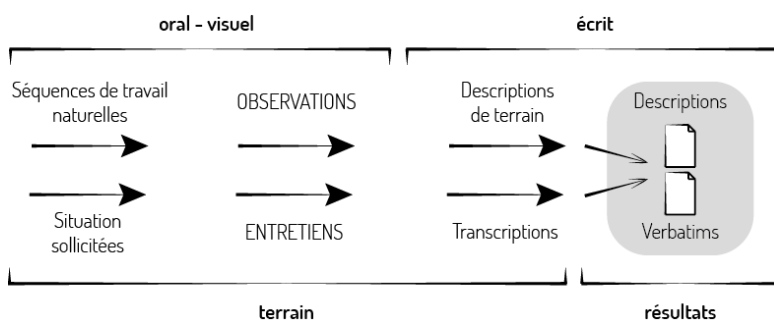


Figure 25. Mode de production de données

Nous avons ainsi réalisé un entretien avec le fondateur du bureau afin de percevoir la vision globale de l'agence et son positionnement par rapport aux évolutions technologiques notamment. L'entretien a été enregistré sous format audio et sa durée est de 1 heure 39 minutes. Sa transcription complète est disponible à l'annexe 26, avec l'accord du sujet.

Notre attention, pour les observations en elles-mêmes, s'est portée sur un membre de l'équipe en particulier, Antoine Maes, expert en modélisation paramétrique au sein de cette structure. Nous avons pu l'observer durant plusieurs demi-journées, au sein même du bureau en *open-space* et également lors de sessions spécifiques dans un environnement externe au bureau. Les observations filmées et enregistrées, les entretiens et sessions d'entretien rétrospectif et leurs analyses rétrospectives, ont rythmé notre étude qui s'est étendue sur près de huit mois. Celles-ci sont disponibles aux annexes 18 à 25.

Du point de vue du positionnement du chercheur adopté lors de cette phase de recherche, nous nous sommes positionnés en tant qu'observateur

complet. En effet, le rôle de participant n'était pas envisageable car la période d'acceptation par les sujets observés peut être longue. Ce positionnement n'aurait pas non plus permis de garder une objectivité suffisante sur l'observation. Il aurait également été difficile de déceler quelles sont les raisons d'une prise de décision sur un projet sachant que le chercheur aurait été inclus dans le processus décisionnel et influencé par les technologies utilisées.

Cependant, il n'aurait pas été possible d'accéder au terrain sans dévoiler l'identité du chercheur. La transparence du positionnement pour lequel nous avons opté a d'abord permis d'accéder au terrain. Par ce positionnement, nous avons également établi un cadre éthique dans lequel le chercheur dévoile son identité et explique clairement les enjeux de la recherche aux différents sujets. Les activités observées étant en partie cognitives, il était nécessaire que le chercheur puisse interagir de temps en temps pour questionner le sujet observé si nécessaire. Ce positionnement franc nous a permis d'établir une relation de confiance avec l'observé principal.

L'observé s'est ainsi laissé aller à la méthode de pensée à voix haute dite *think aloud*, ce qui nous a permis d'accéder à davantage d'informations sur le processus cognitif mobilisé. Nous avons pu également mettre en place des séances d'entretien rétrospectif qui mettent le participant face à sa propre activité, préalablement enregistrée sous forme de vidéo. Lors de ces séances, le participant commente et justifie ce qu'il a fait (Mollo & Falzon, 2004).

L'observation *in situ* peut entraîner une certaine forme de subjectivité. Deux objectivations ont été effectuées : une objectivation de la position du chercheur et une objectivation du choix scientifique des données recueillies.

Concernant l'objectivation de la position du chercheur, cette phase de la recherche a été menée en tant qu'observateur complet, telle que nous venons de la décrire, afin de conserver un recul par rapport à l'action observée.

Malgré ce recul d'observateur complet, le chercheur est immergé dans le milieu observé, ce qui peut engendrer une forme de subjectivité. En regard de cette possible subjectivité et afin d'objectiver le plus possible le corpus de données à analyser, une triangulation a été effectuée pour sélectionner les moments clefs parmi les enregistrements audio et vidéo. Tandis que ces enregistrements soutiennent l'analyse a posteriori, la grille d'observation aide l'observateur à se focaliser sur quelques éléments clefs lors de l'action. Nous

commençons par présenter la grille d'observation mise en place pour simplifier la prise de notes lors des observations menées dans le cadre de cette recherche, avant de nous pencher sur la méthode du séquençage.

Un des inconvénients de l'observation *in situ* est l'« observer effect » qui apparaît lorsque l'observé est perturbé par la présence de l'observateur et n'agit plus de manière spontanée. Au fur et à mesure que la relation de confiance s'établit, cet effet s'atténue. Un second inconvénient apparaît dès lors sous le terme d'« habitude » de l'observateur qui perd alors de son objectivité (McDonald, 2005). C'est pour limiter cette subjectivité du chercheur que le découpage séquentiel a été réalisé par la méthode de la triangulation explicitée à la section 6.2.2.

En regard du point de vue théorique développé précédemment (chapitre 2 Etat de l'art), nous avons d'abord procédé à une observation dans un bureau d'architecture afin de confirmer les éléments sur lesquels il est important de focaliser l'attention lors de l'observation, et ainsi d'ajuster la grille d'observation en fonction. Cette observation reprise comme expérimentation 0 est décrite ci-après. Nous avons ensuite choisi de nous focaliser sur l'observation d'un bureau d'architecture, d'une part en raison du temps important nécessaire pour accéder à un terrain, d'autre part, parce qu'il y a une période d'ajustement nécessaire entre observé et observateur tel que discuté dans le chapitre méthodologique. Si nous nous référons aux propos de Martineau (2005), l'intérêt d'un temps d'observation long, est d'obtenir des données plus complètes et de meilleure qualité. Par ailleurs le recueil de témoignages reflétant la diversité des pratiques est garanti par les entretiens rétrospectifs menés et décrits précédemment.

6.2.1. Grille d'observation

Lallemand et Gronier (2016) regroupent trois types d'informations qui structurent généralement une grille d'observation :

- Des informations génériques : lieu, date, heure ;
- Ce qui a été observé : quelle est la situation, sur quels éléments est centrée l'observation ;

- Tous les patterns observés : actions de l'utilisateur, réactions, verbalisations, comportements, etc.

Chaque grille d'observation diffère en fonction des objectifs de l'étude. Avant de commencer les observations sur son terrain de référence, le chercheur va donc mener des observations « tests » de façon à mettre en évidence et/ou confirmer les éléments sur lesquels l'attention devra être portée. Cette phase permet d'affiner la grille d'observation proposée comme support pour outiller la prise de notes de la période d'activités observée (Martineau, 2005).

De manière pragmatique, les grilles d'observation sont complétées rigoureusement en temps réel lors de chaque séance d'observation. Au total, nous avons effectué ce travail pour environ dix heures d'enregistrement vidéo. Le codage effectué reprend de la manière la plus fidèle possible les actions réalisées lors de l'observation. D'autres informations sont par ailleurs simplement cochées afin de préciser davantage le sens de l'action. Certaines informations sont omises en raison de contraintes de temps de prise de notes notamment. Quelques cases d'intitulé sont laissées vides afin de pouvoir faire évoluer la grille en fonction des besoins *in situ*.

La structure de notre grille d'observation est constituée de grandes catégories telles que moment, date, qui, quoi, illustration, outils utilisés, actions et sujets abordés sont issus de ce travail (figure 26). D'autres catégories ainsi que les sous-catégories ont été fixées en fonction des questions de recherche énoncées et confirmées à la suite de l'observation 0 qui a été menée. Pour rappel, l'objectif de cette phase d'observation *in situ* est de comprendre en quoi les outils paramétriques ont un impact d'un point de vue cognitif et organisationnel sur l'individu et l'organisation.

La grille contient essentiellement quatre types de renseignements. Tout d'abord, dans une visée descriptive, nous complétons différentes informations référençant et contextualisant le moment observé. Ensuite, nous identifions les outils utilisés à chaque moment. Pour appréhender l'usage des outils, nous tentons de distinguer l'action qui est en cours. Ces actions sont identifiées principalement par la verbalisation spontanée du concepteur qui extériorise ses pensées. Afin de comprendre la dynamique entre les outils et l'action menée, nous caractérisons la thématique à laquelle l'action se rapporte.

2	N °	DATE	QUI?	H O T S / P O S	QUOI?	B U G	I L L U	E C H A N G E S	OUTILS UTILISES MAK NUM	ACTIONS	SUJETS ABORDES
3	A C T I O N				QUOI?				C R O A A R A R S H A R S H G Q U U T C K I H N U T H P N O G I O I S S T	P R O O P C M O T T E N D E I P C E S M A E L T I F V I E S O S R E S I I E R E L R R R R E	C O R M F O R A O S N N R T D I M R U P
4					Trop de calques sur le fichier Rhino. Il doit trouver ceux qui lui conviennent : "ça c'est le genre de problèmes qu'on a. Tout ça de calques dedans quoi et que moi je dois exactement retrouver ce qu'il me faut."						
5	1	15h04	Antoine	P					X	X	X



Figure 26. Extrait du codage d'une vidéo enregistrée pour le projet FH

Nous détaillons les catégories et plaçons à l'annexe 17 les sous-catégories constituant la grille d'observation :

Qui ? : cette catégorie précise qui a réalisé l'activité décrite et/ou qui y prend part de manière passive (personne de passage qui crée une distraction, personne écoutant une interaction, ...).

Hot Spot : moment charnière dans le processus de conception. Ce type de moment se manifeste souvent par une posture corporelle, un comportement pouvant s'exprimer entre autres par la parole. Pour indiquer la présence d'une réflexion intéressante filmée ou en prise de notes directe servant un point clef de la démarche, la case sera remplie d'un « V » pour notifier l'existence d'un verbatim important. Ces « hotspots » sont donc détectés de manière subjective.

Problème vs solution : cette catégorie précise si le moment observé correspond plutôt à un problème qui est posé et exprimé ou à une solution à un problème donné. La case est complétée par un « P » ou par un « S » en fonction de la sous-catégorie dans laquelle le moment est attribué.

Quoi ? : ce critère permet de décrire précisément l'action qui s'est déroulée au cours du processus de conception.

Bug : indique la présence d'un dysfonctionnement d'un programme informatique.

Illustration : description illustrée par une photo prise au moment de l'activité ou représentant le sujet décrit dans la catégorie « Quoi ? ». Elle précise ainsi certains aspects observés et décrits. L'existence de ce support est annotée par une croix lors de l'observation et remplacée par l'illustration en post-traitement.

Echange : tout échange prenant cours durant la tâche observée : conversation entre les acteurs de l'action, interaction éloignée impactant le comportement de l'observé.

Outils utilisés : catégorie reprenant le ou les outils utilisé(s) par les acteurs pour aborder le sujet. La grille d'observation compte 8 familles d'outils utilisés.

Actions : catégorie permettant de distinguer l'objectif de la tâche en cours. Cinq tâches ont été identifiées et constituent les sous-catégories.

Sujets abordés : catégorie reprenant le ou les sujets abordé(s) par les concepteurs lors de leur activité. Elle se divise en 4 sous-catégories.

Les grilles d'observation transcrites sont disponibles en annexes 18 à 20. Au total 6 grilles ont été créées en fonction du nombre de projets et des différents moments d'observation. Ces grilles ont été complétées sur place et ajustées a posteriori à l'aide des enregistrements vidéo et des photographies prises sur le terrain. Ce traitement a posteriori sur base des enregistrements permet notamment d'isoler les verbatims clefs et de reVISIONNER les séquences afin de ne pas passer à côté de certains détails sur lesquels le chercheur ne se serait pas arrêté.

Le traitement des données s'articule autour de deux étapes successives. Le chercheur transcrit ses observations dans la grille, puis il les analyse en fonction de critères spécifiques. La grille d'observation guide l'observateur et canalise ainsi ses efforts sur une trajectoire définie. Cependant son évolution reste possible et sa gestion se fait de manière itérative. La grille est adaptée en fonction des besoins rencontrés sur le terrain. Il faut néanmoins rester vigilant en recourant à ce type d'outil. L'observateur doit être capable d'aller au-delà de cette grille afin de ne pas manquer des propos et faits intéressants. Il est donc important de rester ouvert (Martineau, 2005). Pour analyser les données, nous avons recours au séquençage. Afin que celui-ci soit le plus objectif possible et pallie à la subjectivité éventuelle liée à la grille d'observation, nous triangulons le séquençage. Cette méthode est explicitée dans la section suivante.

6.2.2. Séquençage

Pour structurer l'analyse des enregistrements audio-visuels des observations *in situ* et faire d'une situation observable, un observé, un séquençage doit être effectué (de Sardan, 2008).

Le repérage des événements significatifs peut être validé scientifiquement de différentes manières. Une première possibilité est de confronter l'acteur à l'enregistrement de sa pratique et qu'il sélectionne de lui-même les moments clefs. Cette méthode est fréquente en sociologie car elle permet aux participants de prendre conscience de leurs propres attitudes (Flanagan, 1954). Deux raisons nous poussent à définir les séquences via la triangulation des données. Tandis que l'acteur semble le plus à même d'effectuer ces choix, cette première méthode implique des biais liés aux souvenirs qu'a l'acteur des événements. Afin de minimiser ce caractère subjectif d'une part et la

subjectivité induite par le chercheur lors du traitement des données et de l'interprétation qu'il en fait, le traitement des données s'est opéré par triangulation. Les données ont été traitées par trois personnes expertes afin de définir les espacements temporels de chaque séquence et de faire communément émerger les moments clefs. Pour définir ces séquences, les experts s'appuient sur « un flux social déjà prédécoupé » (de Sardan, 2008, p.147) correspondant à des changements d'outils, de tâches, de raisonnements notamment, qui justifient le passage d'une séquence à une autre. L'expert complète, par son expertise, ce découpage inhérent à l'événement observé par un « découpage ajouté » (de Sardan, 2008, p.148).

Les grilles d'observation ont ainsi, ultérieurement à l'observation, été complétées par trois éléments présentés à la figure 27. Les séquences peuvent reprendre plusieurs actions. Ensuite, l'explication inclut le repérage temporel de la séquence et un bref descriptif du contenu de celle-ci. Finalement, la dernière colonne indique la numérotation des moments clefs retenus comme significatifs dans le déroulement du processus observé. Ces moments clefs sont alors transcrits intégralement selon la codification établie à la section 3.2. Retranscription. Ces verbatims soutiendront l'analyse développée au chapitre 4. Un extrait de la segmentation des séquences est présenté à la figure 27 et est accompagné de la retranscription des deux moments clefs répertoriés dans cet extrait.

CROQUIS	OUTILS UTILISES						M · REF · REF N	ACTIONS					SUJETS ABORDES			SEQUENCES	EXPLICATIONS	MOMENTS	
	MARKUM							PREPARATION	CONCEVOIR	MODELLISER	TESTER	OPTIMISER	MANIP	FORM	CONSTRU				RENDU
	AUTO	ARCHI	SKP	RHINO	GH	MICROST													
			x	x	x				x				x				01:18:42 - 01:18:53 Degré d'évaluation et d'approximation	[1]	
				x													01:18:53 - 01:30:46 Modélisation par essais erreurs		
				x					x				x				00:00:00 - 00:13:20 Modélisation par essais erreurs, objectif difficile à atteindre		
			x	x					x	x			x	x			00:13:20 - 00:22:52 Impact logiciel sur morphologie	[2]	

A_M_1 Degré d'évaluation et d'approximation

« Est-ce que c'est un sinus ? Oui j'ai l'impression que oui. »

A_M_2 Impact logiciel sur morphologie

ANT « Je vais vraiment dessiner un Nurbs quoi. Et en fait on a le point de départ et le point d'arrivée et ça on sait dire qu'ils sont justes. Je vais simplement déplacer ça. Là on a un point de contrôle d'un Nurbs. [...] Bricolage [soupon]. »

AS : « Sauf que tu ne sais pas où tu vas devoir mettre tes points de contrôle ? »

ANT : « Ben justement on va pouvoir jouer un peu avec. De toute façon y a aucun document qui correspond. [...] Tant que l'on a le passage nécessaire. »

Figure 27. Séquençage des observations et retranscription de deux moments clefs

Nous avons abordé les différentes méthodes mises en place pour constituer notre corpus de données. Nous avons également explicité les traitements de données que nous avons sélectionnés et adaptés pour soutenir notre recherche. Nous pouvons dès lors traiter nos données et formuler les résultats de notre recherche. Le chapitre suivant s'attèle à présenter nos résultats.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

Dans le cadre de cette thèse, des connaissances sont produites pour identifier les changements tant organisationnels que cognitifs dans le flux de travail des petits bureaux d'architecture intégrant des outils de modélisation paramétrique. Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord l'état des pratiques numériques et paramétriques en Belgique recueillies au travers d'un questionnaire en ligne largement diffusé. Cette analyse met en évidence les problématiques du numérique de manière générale. La question est d'envisager le paramétrique comme une potentielle réponse aux besoins des architectes. Nous faisons dès lors état des connaissances réelles concernant ce type d'outils. La section 2 est alors consacrée à l'approfondissement de la compréhension des perceptions *a priori* et des freins à la modélisation paramétrique au travers d'entretiens téléphoniques. Nous analysons ensuite, à la section 3, l'évolution de l'appréhension de ces outils à l'issue d'une journée de formation. Au-delà des réticences, certains architectes ont adopté ces technologies. Nous nous attardons alors à l'observation des pratiques de ces PME à la section 4.

1. Etat des pratiques numériques et paramétriques en Belgique

Cette section se penche sur les défis auxquels sont confrontés les architectes travaillant dans les petits et moyens bureaux d'architecture lorsqu'ils utilisent des outils numériques, et plus particulièrement des outils de modélisation paramétrique au cours de leurs processus de conception. Elle souligne en quoi leur perception et leur compréhension de ces outils divergent des tendances actuellement discutées dans la littérature.

Après avoir décrit l'échantillon de notre questionnaire, nous organisons les résultats du questionnaire en ligne selon deux axes, à savoir les questionnements concernant les outils numériques et ceux dédiés au paramétrique. Nous commençons par décrire l'utilisation des outils numériques en général, l'origine de la complexité décrite par les utilisateurs et l'impact de ces outils sur la pratique architecturale. Dans la deuxième section, nous détaillons le sens du mot « paramétrique » tel que l'entendent les designers belges, afin de cerner la complexité perçue derrière ce type d'outils numériques (en termes de définitions multiples, de confusions existantes entre différents logiciels commerciaux). Nous envisageons finalement les différents impacts des outils numériques et paramétriques sur la pratique architecturale, notamment en ce qui concerne la diversité des formes conçues. Cette comparaison met en évidence les complexités générées, induites ou maîtrisées par chaque type d'outil.

1.1. Echantillon du questionnaire en ligne

Tel que décrit à la section méthodologique 4.2, nous avons contacté près de 13.000 architectes et ingénieurs architectes belges et nous les avons invités à répondre à notre questionnaire en ligne. Plus de 700 réponses ont été recueillies et 572 réponses ont finalement été retenues et analysées après nettoyage des données (selon les critères d'exclusion explicités dans la section méthodologique 4.2). Cette sélection représente 4,1% des architectes inscrits aux trois Ordres des Architectes en Belgique. La proportion homme-femme observée est proche de celle recueillie par une enquête menée en 2018 par le Conseil des Architectes d'Europe (68% d'architectes masculins en 2018 en Belgique) (Architects' Council of Europe, 2019). Dans notre cas, 72,9% des

questionnaires ont été complétés par des hommes et 26,8% par des femmes (tandis que 2 personnes ont préféré ne pas répondre à cette question). Les participants de moins de 40 ans représentent 49,3%, ce qui confirme également la relative jeunesse des designers, comme cela a déjà été observé par l'enquête parue en 2019. Parmi les répondants, 32,9% exercent leur profession principale depuis moins de 10 ans, 27,3% l'exercent depuis 10 à 20 ans et 38,3% depuis plus de 20 ans. En ce qui concerne leur fonction principale, 52,6% des répondants sont des architectes indépendants isolés (c'est-à-dire travaillant en leur nom), 22,0% sont des architectes indépendants travaillant pour un collaborateur, 5,5% sont des architectes employés, tandis que 3,9% sont des ingénieurs-architectes et 2,6% sont des enseignants (les autres participants se répartissent entre diverses autres professions de manière non significative). Nous regroupons ce panel de participants sous le terme de « designers ». Ces différents chiffres sont repris à la figure 28. L'indication N représente pour chaque figure le nombre de répondants à la question posée et NA indique le nombre de personnes n'ayant pas répondu à la question.

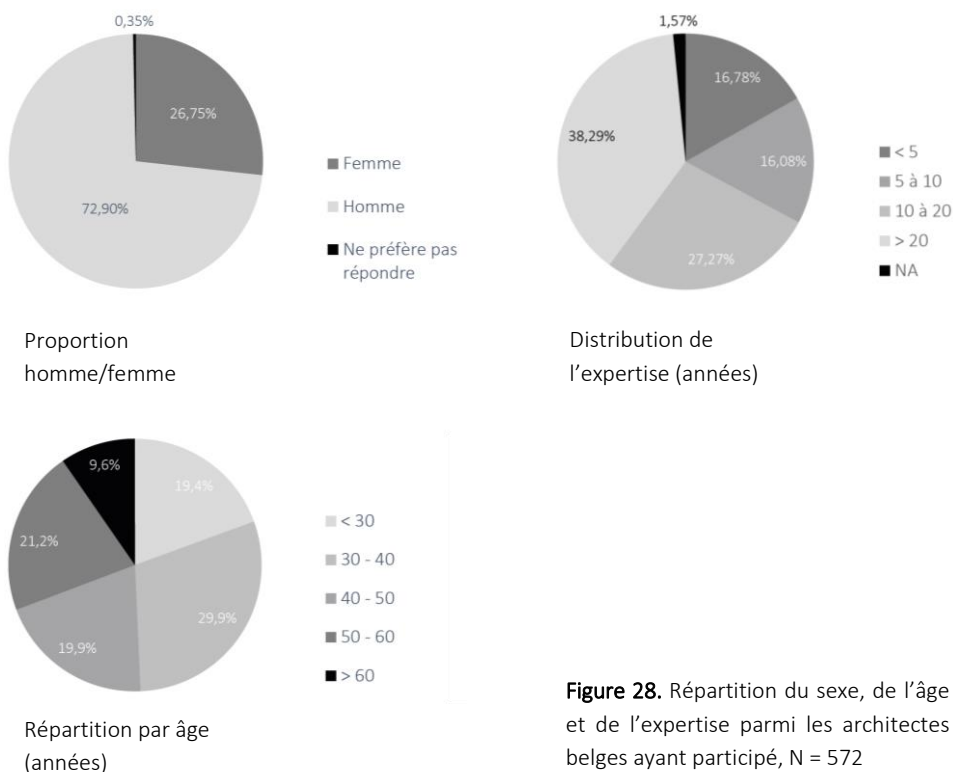


Figure 28. Répartition du sexe, de l'âge et de l'expertise parmi les architectes belges ayant participé, N = 572

L'intérêt porté sur les petites structures se justifie d'autant plus que l'enquête du Conseil des Architectes d'Europe, présentant des données démographiques tout à fait similaires à l'échantillon étudié ici, a démontré que la quantité de bureaux de taille moyenne diminue continuellement, en faveur de structures encore plus petites. La table 7 illustre donc la pertinence du cas belge et l'intérêt d'un recentrement de la recherche sur des structures de plus petite taille, puisque, selon notre enquête, 42,7% des répondants travaillent dans une agence d'une ou deux personnes et près de 80% des participants travaillent dans une structure accueillant moins de 10 personnes. Ces tendances confirment l'importance de comprendre en profondeur le travail quotidien des petits et moyens bureaux d'architecture, qui représentent donc la majeure partie du panorama professionnel belge.

Table 7. Distribution de la taille des bureaux en Belgique selon notre étude.

Taille du bureau (nombre de personnes)	1 à 2	3 à 5	6 à 10	10 à 20	20 à 50	50 à 100	NA
Pourcentage	42,7%	22,6%	12,4%	11,9%	5,2%	3,7%	1,6%
	77,7%						

L'analyse des données se concentre principalement sur les résultats quantitatifs traités afin de délimiter les tendances générales, étayées par des tests statistiques spécifiques et des données qualitatives pour examiner de plus près certaines de ces tendances. Les éléments d'analyse constituent des résultats qui ont une vocation de généralité au vu du nombre d'acteurs interrogés.

1.2. Usage des outils numériques en Belgique

Dans cette première partie de l'analyse du questionnaire en ligne, nous nous concentrons plus spécifiquement sur les sujets liés aux outils numériques et à la perception de la complexité par les architectes.

Considérant les différents contextes éprouvés par les chercheurs (expérimentations « sur mesure » dans un cadre scolaire ou avec des professionnels, retours d'expérience de spécialistes dans de grandes agences), nous reprenons certaines caractéristiques avancées dans la littérature et questionnons les architectes belges à ce sujet. Avant de nous focaliser sur les outils de modélisation paramétrique, nous les repositionnons dans un panorama plus global d'outils numériques actuellement disponibles.

Les premiers résultats révèlent que 76,9% des participants utilisent des outils numériques pendant la phase de conception. Ce pourcentage confirme que notre recherche répond aux réalités actuelles du travail quotidien. Il faut cependant souligner que l'utilisation des technologies numériques diminue à mesure que l'âge augmente : 17,8% des designers âgés de 55 ans et plus déclarent ne pas utiliser d'outil numérique, alors que seulement 5,9% des moins de 55 ans déclarent ne pas utiliser d'outils numériques.

Les concepteurs ont ensuite été interrogés sur les outils numériques qu'ils utilisent et comment : « De quelle manière utilisez-vous les logiciels 2D, 3D ou paramétriques listés ci-dessous ? ». La figure 29 montre à cet égard que les concepteurs utilisant des outils de conception uniquement pour le dessin 2D utilisent principalement AutoCAD© (56,2%), suivi de Vectorworks© (19,6%) et ArchiCAD© (14,8%). ArchiCAD© est également utilisé comme outil de modélisation 3D (22,8%) mais Sketchup© reste la référence pour la modélisation 3D en conception architecturale, du moins pour 52,3% des répondants. Les logiciels paramétriques tels que Grasshopper©, Generative Component© ou Digital Project©, sont actuellement totalement ou largement ignorés par la population belge. Parmi ceux-ci, Grasshopper© est le plus utilisé.

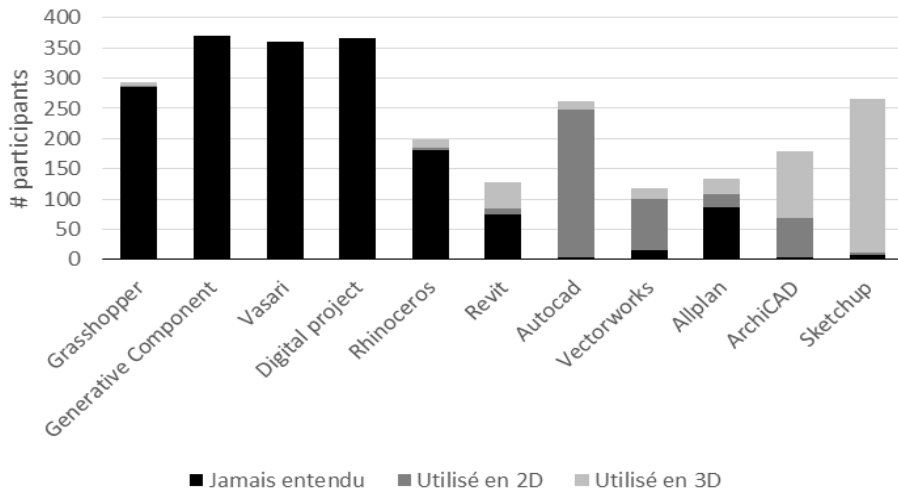


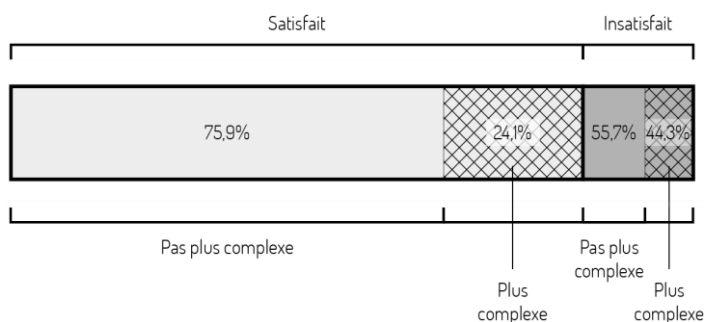
Figure 29. Niveau de connaissance et usage des outils numériques dans les bureaux d'architecture belges

Par ailleurs, le sondage a offert aux participants la possibilité de donner leurs appréciations sur les aspects et les fonctionnalités des logiciels qu'ils utilisent. Certains concepteurs affirment que « *le projet peut être rapidement modélisé en 3D* » grâce à des outils de conception numérique, en particulier grâce aux bibliothèques de données, et qu'il existe des moyens simples d'utiliser un seul logiciel pour créer simultanément 2D et 3D. Un autre avantage perçu des outils numériques est que « *les changements sont plus faciles à réaliser sans coûts importants (temps, énergie)* ». Le modèle 3D leur permet également de « *vérifier l'impact des choix architecturaux* » et « *l'intégration urbaine* », tout en permettant une meilleure compréhension et visualisation du projet de la part du client et de l'administration notamment. Les logiciels permettent également des « *échanges plus rapides* » avec les partenaires, à l'extérieur et au sein du bureau (comme discuté plus loin). Alors que certains designers soulignent les avantages des outils intégrant notamment le BIM (Building Information Modeling), d'autres catégorisent toujours ces outils comme la simple « *extension de leur table à dessin* ».

Parmi les aspects négatifs les plus couramment signalés par les participants, le fait qu'il y ait « *trop d'outils disponibles* » est considéré comme un défi en termes de rythme de travail au quotidien. Les « *prix élevés des logiciels* », les

« mises-à-jour trop fréquentes » qui nécessitent des « périodes d'ajustement contreproductives » et « l'achat de nouveaux équipements informatiques » sont par ailleurs fréquemment mentionnés. Certains argumentent le fait qu'ils consacrent « trop de temps à travailler », car les outils numériques poussent à « dessiner trop précisément dès l'esquisse ». Un autre critère considéré comme crucial est que « les formes complexes sont difficiles à représenter » (ex. les courbes) et que produire un « élément non standard est complexe », poussant à « moins de créativité ».

En effet, en examinant l'impact des outils numériques sur la pratique architecturale (notamment en ce qui concerne la satisfaction de l'utilisation et la complexité perçue), nos résultats montrent que 83,5% des répondants sont satisfaits des outils numériques qu'ils utilisent, laissant 16,5% des concepteurs insatisfaits. Alors que 58 personnes (13,5%) n'ont pas répondu, 27,4% trouvent que les outils numériques ont rendu leur travail plus complexe en général. Parmi les designers satisfaits, 75,9% d'entre eux sont non seulement satisfaits mais considèrent que les outils numériques ne rendent pas leur travail plus complexe (figure 30).



La question « Êtes-vous satisfait des outils numériques que vous utilisez en conception architecturale ? Oui/Non » est croisée avec « D'une manière générale, considérez-vous que l'arrivée des outils numériques ait complexifié votre travail ? Oui/Non/pas d'avis »

Figure 30. Les architectes et leurs outils numériques : perception de la satisfaction et de la complexité, N = 431

Si on demande aux architectes d'énumérer les principaux facteurs qui complexifient la pratique de l'architecture de nos jours (en réponse à la question « Listez 5 facteurs qui d'après vous complexifient la pratique de l'architecture aujourd'hui »), les outils numériques (41 occurrences) figurent parmi les six premiers facteurs qui reviennent le plus souvent, au même titre que les formalités administratives (285 occurrences), les réglementations (et plus particulièrement les règlements d'urbanisme - 230 occurrences), la certification « PEB » (134 occurrences), l'évolution des techniques du bâtiment (111 occurrences) et les demandes des clients (107 occurrences).

Si l'on approfondit l'analyse de la complexité perçue au sein du processus de conception, la figure 31 montre que la perception de la complexité en architecture en regard des outils numériques augmente globalement avec l'âge. Un effet de génération est néanmoins observé pour le groupe d'âge 41-45 ans dont 67,1% trouvent que les outils numériques ne rendent pas leur travail plus complexe : la raison principale étant que les outils numériques leur ont permis de gagner du temps notamment grâce aux visualisations 3D et à une collaboration plus aisée avec les acteurs. Nous pouvons exposer quelques verbatims représentatifs tels que : « *plus d'encre de Chine, de lames de rasoir et de couches...* », « *rapidité de conception, conception assistée, changements rapides, échange de données* », « *C'est un grand pas en avant dans la présentation visuelle des fichiers. Le client s'immerge directement dans le projet et le comprend directement. La 3D peut aussi améliorer vos créations* », « *une meilleure coordination entre les disciplines* ». Il faut aussi noter que les architectes entre 41-45 ans sont moins enclins à trouver que les outils numériques ont complexifié leur travail, la proportion étant proche de la catégorie « moins de 30 ans ». Cela pourrait atténuer en partie l'effet de génération globalement observé.

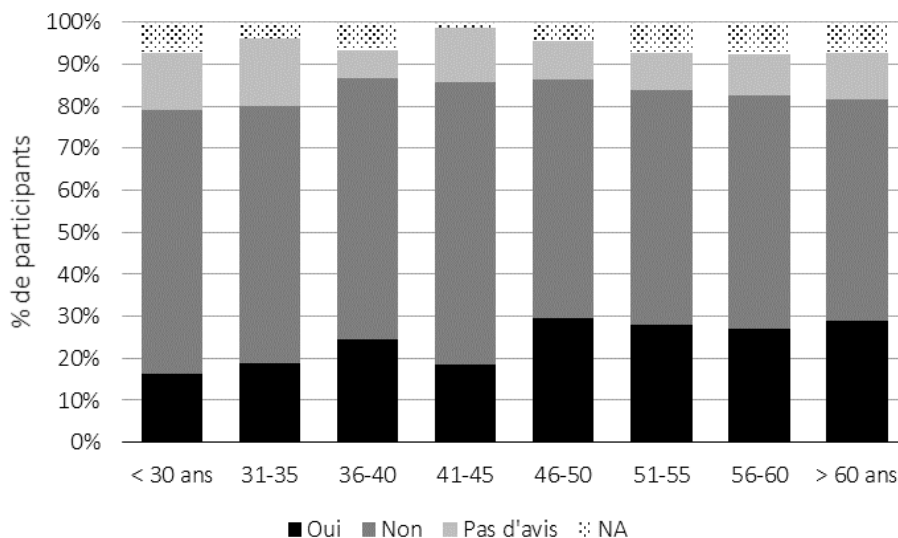


Figure 31. Perception croissante de la complexité du travail d'architecte avec l'avènement des outils numériques, en regard de l'âge, N = 570

L'enquête demande en outre aux participants d'évaluer l'impact des outils de conception sur plusieurs facteurs de leur pratique architecturale. La figure 32 confirme de manière quantitative ce ressenti en réponse à la question « Les outils numériques que vous utilisez en conception architecturale dans le cadre de vos projets ont... [pas du tout / légèrement / fortement / pas d'avis] 1. augmenté votre vitesse d'exécution d'un projet 2. favorisé la diversité des formes produites 3. facilité les échanges avec les intervenants 4. facilité la mise en œuvre des projets » (N = 539). La plupart d'entre eux s'accordent à dire que les outils numériques ont fortement accéléré l'exécution des projets (218 réponses), facilité les échanges avec les parties prenantes (323 réponses) et la mise en œuvre des projets (208 réponses), mais les répondants s'entendent sur le fait que les outils numériques ne favorisent majoritairement que légèrement (155 réponses), voire pas du tout (207 réponses), la diversité de la forme conçue et produite. Des extraits de réponses ouvertes telles que « *plus de détails possibles, moins d'erreurs matérielles, mais certainement appauvrissement de la forme* », « *La créativité néanmoins est cadrée car on agit dans les limites de ce qu'on sait faire avec le programme* » apportent un soutien qualitatif à ce résultat.

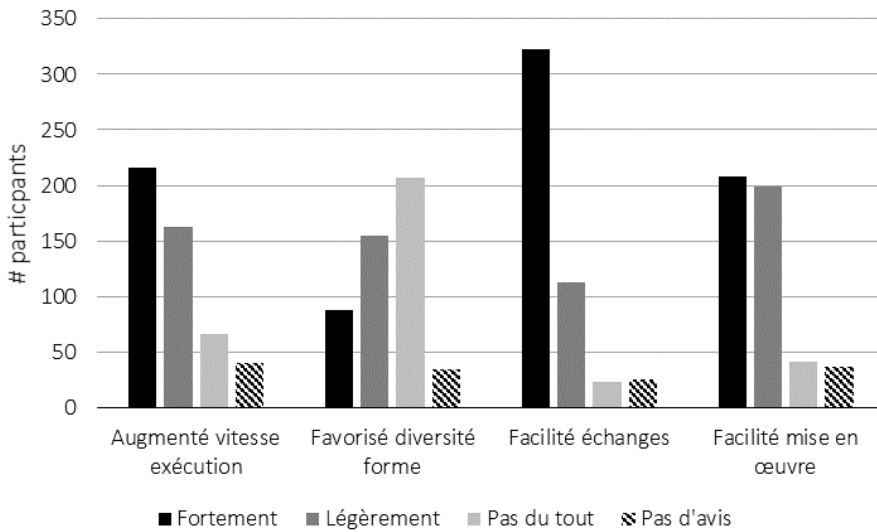


Figure 32. Influence des outils numériques sur plusieurs facteurs de la pratique de la conception architecturale selon les designers belges en réponse à la question : « Les outils numériques que vous utilisez dans la conception architecturale dans le cadre de vos projets ont... », N = 539

Pour bien comprendre l'influence du facteur numérique, nous ajoutons ici quelques résultats en examinant comment les outils numériques modifient le rôle des architectes, de leur point de vue. Les concepteurs semblent d'abord divisés lorsqu'il s'agit de l'intention du concepteur et de l'impact que l'ère numérique a pu avoir sur l'architecte (38,3 % entièrement d'accord - 25,0 % légèrement d'accord - 27,6 % pas du tout d'accord - 9,0 % sans opinion, en réponse à la question « Considérez-vous que les outils numériques modifient le rôle de l'architecte dans le processus de conception ? », N = 460). Ils sont plutôt d'accord (52,8% sont d'accord - 23,5% légèrement d'accord) quant au fait que les outils numériques aient modifié leur contrôle sur la mise en œuvre du projet (15,6% pas du tout d'accord, 8,0% sans opinion), et en même temps, ne sont pas certains de l'impact sur le contrôle des coûts de construction (30,9% sont d'accord - 22,4% légèrement d'accord - 35,2% pas du tout d'accord - 11,5% sans opinion).

Si nous revenons à la facilité des échanges avec les intervenants et à l'impact sur les formes produites, la figure 33 reprend les facteurs et acteurs

préétablis considérés comme influençant la forme conçue selon les designers belges. Les règles d'urbanisme et les exigences des clients sont considérées comme des critères d'influence majeure. Le logiciel 3D est le quatrième facteur le plus influant en matière de morphologie architecturale. Ces trois leviers – logiciel 3D, client, administration – retiennent notre attention puisque l'impact des outils numériques sur le processus de conception est le cœur de notre travail. Par ailleurs, nous reviendrons sur l'importance de la place du client et de l'administration à l'issue de l'analyse de nos résultats (cfr. Section Discussion).

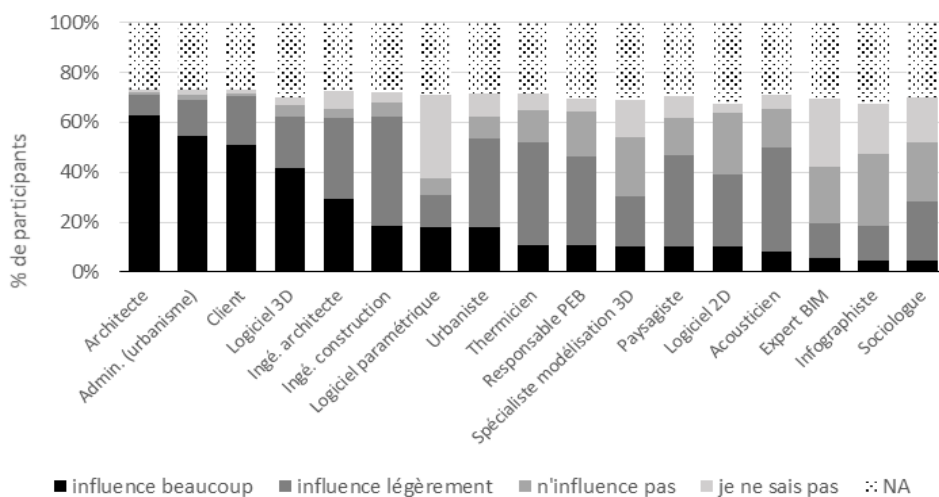


Figure 33. Facteurs et acteurs influençant la forme conçue et produite, N= 572

Il est aujourd'hui largement admis que de plus en plus d'acteurs sont intégrés au processus de conception : 33,6% des participants considèrent le manque de temps comme principal facteur les contraignant à externaliser des tâches ; la complexité de la forme est la seconde raison les poussant à externaliser certaines tâches, au moins pour 17,3% d'entre eux. Ces derniers s'accordent sur le fait que l'interdisciplinarité est totalement bénéfique au développement du projet (85,4%), mais affirment que cette interdisciplinarité est difficile à gérer du point de vue humain (pour 50,1% des répondants - 181 NA supprimés) et technique (50,4% - 181 NA supprimés). D'un point de vue pratique, les designers belges considèrent que les outils numériques ont fortement facilité l'échange avec les intervenants (figure 32). Si l'on regarde de plus près ces échanges, la figure 34 révèle que les architectes externalisent

rarement les étapes de conception (l'architecte étant le consultant interne le plus courant), tandis que l'ingénieur en construction est le consultant externe le plus demandé. Le spécialiste de la modélisation 3D est plus fréquemment sollicité en interne (c'est-à-dire faisant partie intégrante de l'équipe de conception), ce qui démontre une étroite proximité de travail avec l'architecte.

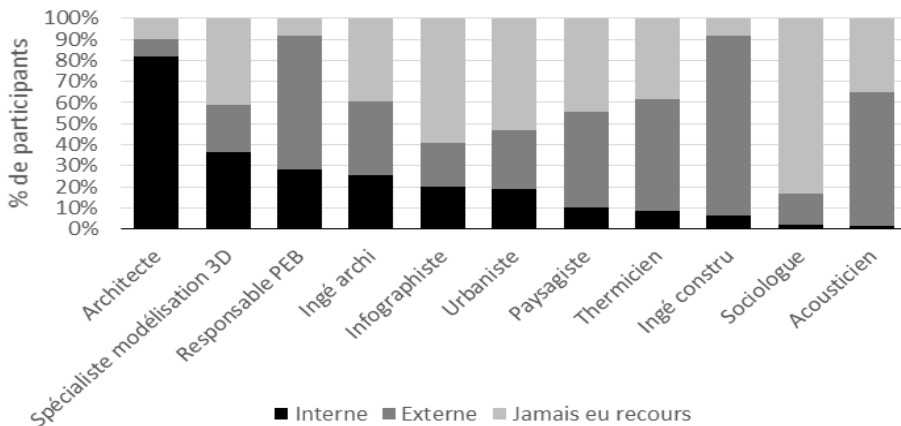


Figure 34. Comparaison des intervenants consultés en interne ou en externe, N = 399 (173 NA supprimés)

L'infographiste est légèrement plus consulté en externe qu'en interne, indiquant que la proximité entre les deux professions est cette fois moins importante. En outre, les spécialistes de la modélisation 3D sont consultés environ deux fois plus en interne que les infographistes. Cette tendance a déjà été illustrée dans la figure 33 : les spécialistes de la modélisation 3D sont considérés comme ayant plus d'influence sur la forme conçue que les infographistes. Toutes ces observations sont soutenues par une autre information quantitative: 46,8% des architectes considèrent la modélisation numérique comme enrichissant la conception d'un projet architectural, même lorsque cette tâche n'est pas assignée à la personne qui a principalement conçu le projet. Pour mieux comprendre ce résultat, nous devons distinguer les architectes qui considèrent la modélisation 3D comme faisant partie intégrante de leur propre processus de conception, et ceux qui considèrent que les modèles 3D ne sont utiles que pour produire des images « commerciales ». Les architectes du premier groupe, s'ils ne génèrent pas leurs modèles eux-mêmes,

s'appuient généralement sur des spécialistes de la modélisation 3D considérés comme des collègues de proximité. Certains d'entre eux ont commenté: « *la modélisation fait partie du processus de conception et évolue avec elle dans un processus itératif* ». Les architectes du deuxième groupe, d'autre part, préfèrent recourir aux infographistes travaillant souvent à distance. Certains architectes reconnaissent que le fait de confier la tâche de modélisation 3D à un consultant externe pourrait favoriser « *différents points de vue, idées ou conseils* »; « *les architectes ne peuvent plus tout assumer* » et doivent apprendre à « *déléguer en donnant les bonnes informations* » par « *des échanges réguliers* ».

Cette section nous a permis d'identifier les pratiques numériques réellement implémentées dans la pratique architecturale actuelle en Belgique et les complexités qui en émergent. Nous nous intéressons à présent aux outils de modélisation paramétrique.

1.3. Intérêt et compréhension des outils paramétriques

Après avoir parcouru les résultats du questionnaire concernant l'usage d'outils numériques dans le processus de conception, nous nous penchons sur les outils de modélisation paramétrique.

Tout d'abord, suite à la question suivante « Qu'évoque pour vous le terme *modélisation paramétrique* en architecture ? », notre étude montre que plus de la moitié des répondants (51,5%, N=369) n'ont jamais entendu parler du terme *modélisation paramétrique*. En ce qui concerne l'évocation de ce terme, il y a une légère tendance croissante à mieux comprendre la modélisation paramétrique avec l'augmentation de la taille du bureau. La même tendance est observée à la figure 35 en ce qui concerne le taux d'intérêt des outils paramétriques. L'axe X de la figure reprend la taille croissante des bureaux, l'axe Y représente le pourcentage de participants qui, respectivement (de haut en bas) ont un intérêt, n'ont pas d'intérêt et n'ont pas d'avis sur cette question. Pour valider ces tendances, nous avons vérifié si les réponses *oui* et *non* étaient également réparties selon la taille des bureaux. Pour ce faire, nous avons utilisé le test statistique de Mann-Whitney U qui rejette, de façon très significative, l'hypothèse selon laquelle *oui* et *non* seraient répartis également quelle que soit la taille des entreprises (p-value = 7,293/10000). On peut donc affirmer que, du moins à l'heure actuelle, plus les bureaux sont petits, moins ils s'intéressent aux

outils paramétriques. Nos résultats soulignent par ailleurs que globalement, seuls 14,4% des personnes interrogées se disent « préoccupées » par l'arrivée de ces outils paramétriques sur le marché, laissant 38,6% des participants non concernés et 47,0% sans opinion. Nous ouvrirons des pistes potentielles pour expliquer ces résultats à la fin de ce travail.

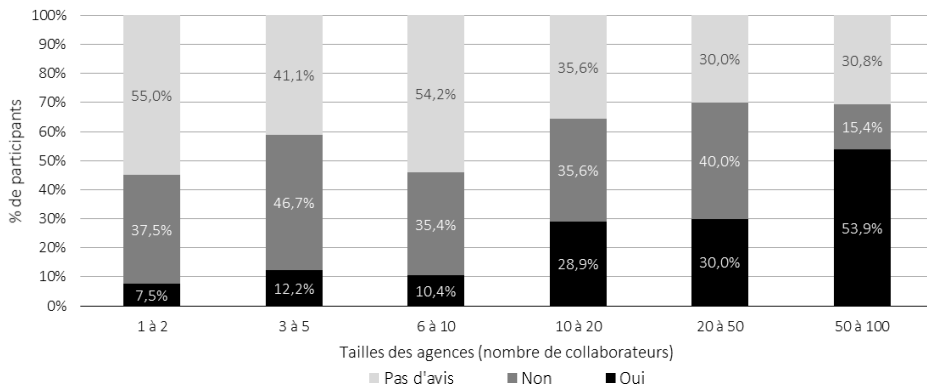


Figure 35. Taux d'intérêt des outils paramétriques en fonction de la taille des bureaux, N = 376

En ce qui concerne la perception du terme « outil paramétrique » (entendu ici comme logiciel avec interface de programmation visuelle), parmi les 87,5% des répondants déclarant ne pas utiliser d'outils paramétriques (à la question : « Utilisez-vous des outils paramétriques? »), 57,5% indiquent n'en « avoir jamais entendu parler » tandis que 2,1% préfèrent passer cette question. En revanche, 40,4% de ces « non-utilisateurs » essaient de donner une définition. Parmi ce groupe de non-utilisateurs donnant une définition, 18,8% l'associent au processus BIM au vu des définitions qu'ils fournissent comme par *exemple* « logiciel de dessin tel que BIM », « BIM ou la possibilité d'extraire des données du modèle de projet ». Finalement, 53,6 % donnent une définition incorrecte. Des réponses telles que « capacité à afficher 3D, 2D et coupes dans un modèle unique », « complexité des formes », « caprice des années 2000 » sont en effet des propos considérés comme peu représentatifs de ce qu'est réellement la modélisation paramétrique. En ce qui concerne les 27,6 % restants, les définitions fournies sont plus adéquates bien qu'incomplètes. On retrouve par exemple : « l'encodage de règles qui se traduiront par une ou plusieurs formes,

des changements de paramètres pour changer la forme », « un énorme pouvoir de paramétrisation de forme ».

De manière générale, on peut observer que les concepteurs sont en mesure d'expliquer la méthodologie, mais ne saisissent pas la valeur ajoutée des outils paramétriques pour leur propre pratique. Ils associent au terme une notion mathématique forte générant une impression de complexité (l'un des répondants, par exemple, cite : « *une modélisation de formes complexes à l'aide de formules mathématiques* ») et une certaine crainte à se l'approprier. De plus, la modélisation paramétrique est évidemment associée par certains des non-utilisateurs à des architectes ayant des projets de grande envergure: « *un avantage pour les grands projets* », « *mauvaise, laide et inintéressante architecture comme NOX et Zaha Hadid ou comme l'architecture très générique* », « *Le terme évoque pour moi quelque chose qui n'a rien à voir avec le métier que j'exerce aujourd'hui... Comme toute technologie, sa valeur dépend de l'usage qu'on en fait.* ». Les architectes belges interrogés associent en effet généralement le terme *paramétrique* à trois architectes de renom : Zaha Hadid, Frank Gehry et Foster and Partners.

A l'inverse de ces non-utilisateurs, 83% de ceux qui ont franchi le pas de l'utilisation d'un logiciel paramétrique (tel que nous l'entendons), et qui utilisent un plug-in tel que Grasshopper©, sont conscients de faire de la conception paramétrique.

A cet égard, 95,7% des architectes utilisant activement les outils paramétriques ont donné une explication de ce que ce terme signifie pour eux. Parmi eux, 3,3% fournissent ce qui peut être considéré comme une réponse erronée sans égard à la valeur ajoutée réelle du paramétrique. Le propos suivant manque ainsi de développement : « *image créée sur la base de points définis sur les axes X et Y* ». Ensuite, 2,8% associent le terme paramétrique uniquement au processus BIM et 93,9% de ceux qui utilisent des outils paramétriques donnent une définition complète, par exemple : « *concevoir en utilisant certains paramètres (voir par exemple Grasshopper). Le terme est surtout associé aux formes flamboyantes d'architectes comme Zaha Hadid ou Frank Gehry mais la technique pourrait aussi être utilisée pour des conceptions moins extravagantes, c'est-à-dire pour concevoir un système de façade, un schéma de végétation dans un plan de paysage...* ». Il semble donc que plus on utilise d'outils paramétriques, plus la définition du terme est cohérente.

Si nous revenons sur l'utilisation actuelle de ces outils dans la pratique belge (figure 36), 12,5% des participants (N=376) déclarent utiliser des outils paramétriques régulièrement. Parmi ces participants, ceux qui font des calculs d'ingénierie sont les utilisateurs les plus fréquents des logiciels dits paramétriques (figure 36), suivis par ceux qui pratiquent la modélisation 3D (18,6%) et ceux qui conçoivent des ouvrages publics (17,8%), correspondant souvent à des projets plus imposants. La conception de projets résidentiels arrive en dernière position (11,9%), alors que ce type de projet représente 37,4% des tâches entreprises par les architectes belges au quotidien.

Considérant les effets perçus des outils numériques analysés à la figure 32, nous nous interrogeons plus spécifiquement sur l'impact des outils paramétriques sur le processus de conception par cette question : « Selon vous, les outils paramétriques... [à compléter] ». La figure 37 énumère plusieurs impacts potentiels que les outils paramétriques pourraient avoir sur le processus de conception (tels que documentés par Oxman & Gu, 2015), et présente comment les participants à notre enquête évaluent ces impacts (de « cela facilite » à « cela complexifie » en passant par « je ne sais pas »). La proportion de réponses « je ne sais pas » (bâtonnets gris clair) reflète le manque d'information sur le rôle des outils paramétriques décrits précédemment dans la section 2.4 du chapitre 2. En effet, entre 54,1 et 71,4% des concepteurs participants ne connaissent pas la valeur des outils paramétriques, confirmant l'analyse que 51,5% des participants n'ont même jamais entendu parler de « modélisation paramétrique ». Cependant, lorsqu'ils donnent leur avis, les architectes apprécient l'intérêt d'utiliser des outils paramétriques. Nous nous référons à des remarques comme celle qui suit : *« L'utilisation d'un ensemble de paramètres et de diverses fonctions définissant une ou plusieurs géométries et une ou plusieurs interactions entre elles, afin de créer une « forme » finale évolutive, variable et facilement adaptable en fonction de la variation des paramètres de base, contrairement à un modèle à croquis direct, plus difficile à modifier ultérieurement, et non « réalisable » ».*

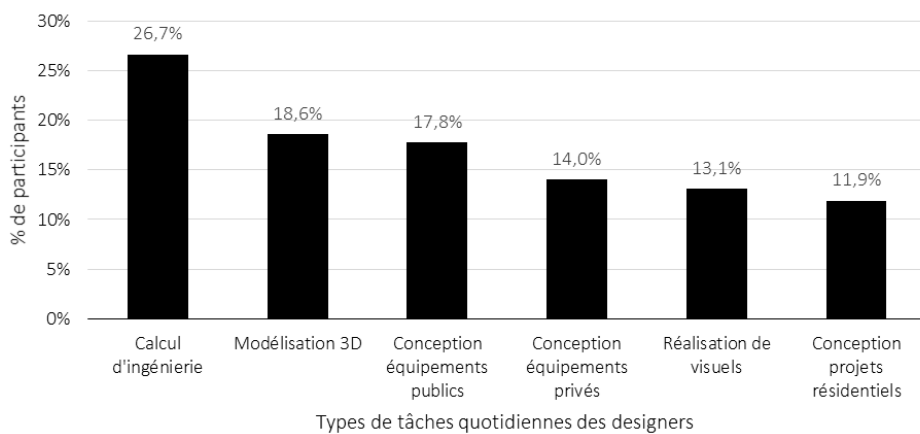


Figure 36. Types de tâches et utilisation respective (en % de répondants) des outils paramétriques

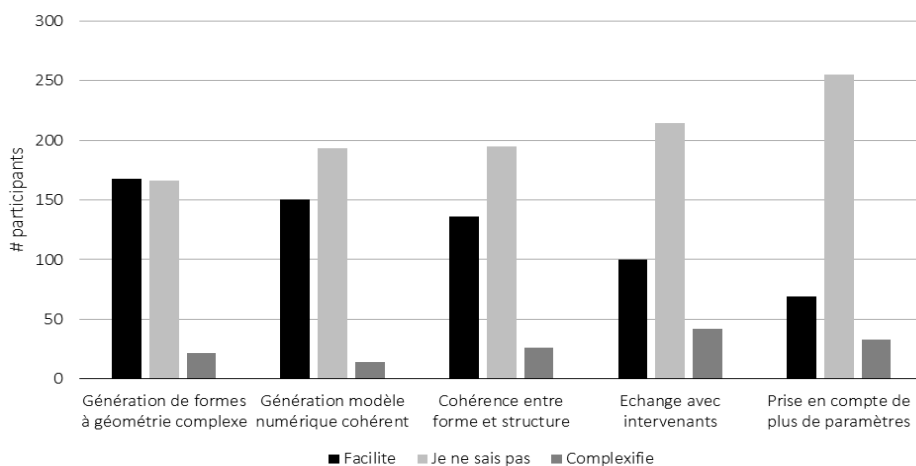


Figure 37. Influence des outils paramétriques sur plusieurs facteurs de la pratique de la conception architecturale selon les designers belges, N= 357

Nous pouvons à présent comparer l'impact des outils numériques (figure 32) avec les effets des logiciels paramétriques (figure 37). Même si la figure 32 montre qu'une grande partie des concepteurs interrogés s'accordent à dire que les outils numériques n'ont pas du tout favorisé la diversité des formes produites, la figure 37 démontre que les outils paramétriques, par contre, facilitent la génération de formes à géométrie complexe. Les bâtonnets noirs sur la figure 37 indiquent que les participants pensent que les outils paramétriques facilitent grandement la génération de formes à géométrie complexe (47,2%), tout en générant un modèle numérique cohérent qui conserve et coordonne les changements tout au long du processus (42,0%). D'une manière générale, les participants reconnaissent en outre que les outils paramétriques facilitent différents aspects du processus de conception (prise en compte d'un plus grand nombre de paramètres, échanges entre acteurs, cohérence de la forme et de la structure).

Pour approfondir la compréhension de l'impact des outils paramétriques sur la géométrie complexe, le graphique suivant (figure 38) détaille cette tendance en divisant les participants qui utilisent ou non des outils paramétriques. Pour nous assurer que ces données puissent être comparées, nous avons utilisé le test statistique de Mann-Whitney. L'hypothèse selon laquelle l'utilisation n'a aucun effet sur la perception de l'utilisation des outils paramétriques peut être rejetée de manière très significative (p -value < 0,01). Si l'on considère les données de cette façon, il semble que les concepteurs qui utilisent des outils paramétriques sont davantage d'accord, proportionnellement parlant, avec le fait que les outils paramétriques facilitent la génération de géométries complexes (86,4%), alors que 39,6% des non-utilisateurs pensent plus souvent que les outils rendent cette génération plus complexe (ou 60% disent ne rien savoir).

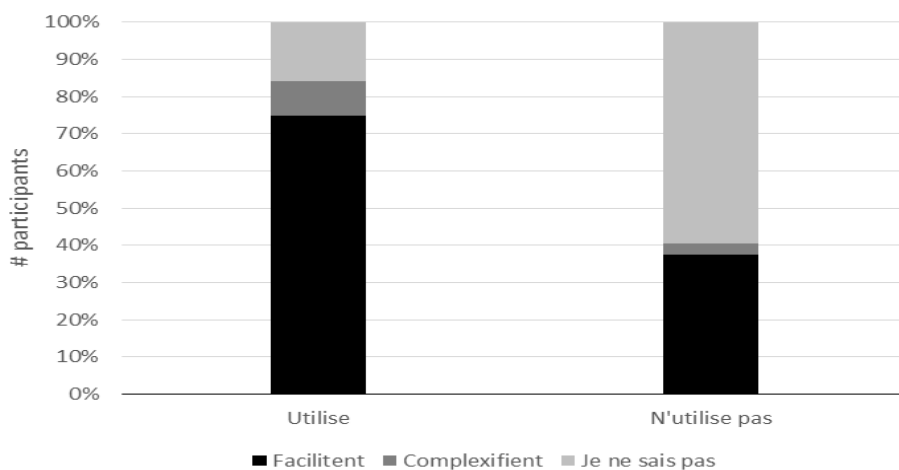


Figure 38. Effet des outils paramétriques sur la génération de formes à géométrie complexe en fonction de l'utilisation de ces outils, N=356

Ce dernier graphique montre que les outils paramétriques peuvent en quelque sorte combler l'écart généré par l'adoption des outils numériques traditionnels par rapport à la diversité des formes, en permettant aux architectes volontaires de faciliter la génération de formes plus complexes.

Comme relevé dans les résultats du questionnaire, la pratique quotidienne du paramétrique contribue à mieux saisir les intérêts. Ce résultat est en corrélation avec une autre question posée pour clore le sondage. Les participants ont classé six difficultés principales rencontrées, définies à la lumière de l'état de l'art, ou auxquelles ces non-utilisateurs pourraient s'attendre, lors de l'utilisation d'outils paramétriques : difficulté de rester à niveau, apprentissage lent et laborieux, interprétations des résultats formels peu aisées, perte de contrôle de la forme par l'architecte au profit du logiciel, processus de travail méthodologique, rapidité d'exécution diminuée. En première position vient l'apprentissage lent et laborieux des logiciels pour 44,3% des répondants utilisant ou non les outils paramétriques. C'est en effet l'un des problèmes rencontrés lors de l'utilisation de logiciels en général. En seconde position, les participants (34,3%) mentionnent la difficulté de rester à niveau en raison des mises-à-jour fréquentes et du coût des formations. Deux difficultés sont ensuite mises en évidence (pour respectivement 30,5% et 18,6% des répondants): la difficulté d'interprétation des résultats formels au niveau

technique et structurel et la peur de perdre le contrôle de la forme conçue en faveur du logiciel. La méthodologie de travail et la diminution de la vitesse d'exécution associées à l'utilisation d'outils paramétriques semblent être considérées comme moins cruciales pour les concepteurs interrogés (cinquième et sixième position pour respectivement 34,3% et 50,5% des participants).

Si nous comparons à présent les difficultés rencontrées par ceux qui utilisent déjà les outils paramétriques et ceux qui ne les utilisent pas encore, nous constatons que la peur de perdre le contrôle de la forme s'atténue fortement, classant cette difficulté respectivement à la troisième position pour 18,7% et à la cinquième position pour 15,4% des participants (classement de la difficulté la plus importante à la moins importante).

1.4. Le numérique, entre défis pratiques et a priori

Suite à cette analyse, nous pouvons affirmer qu'il existe un écart important entre les grandes agences internationales d'architecture et la majorité des architectes belges. Alors que les technologies numériques ont libéré la forme d'une partie des architectes de par le monde, l'architecte belge se sent plutôt aliéné par ces outils. En Belgique, la complexité ne se situe pas encore dans la forme conçue mais dans l'utilisation-même des outils numériques. Avant tout, les concepteurs n'ont pas encore beaucoup recours aux outils 3D ou paramétriques et utilisent plutôt les outils numériques comme un moyen plus rapide que le dessin à la main. Ils ne se sentent pas non plus préoccupés par l'avènement de nouveaux supports de conception puisqu'ils les considèrent plutôt à destination des grands bureaux travaillant sur des projets majeurs tels que des musées ou gares par exemple, et pas du tout adaptés à la conception de projets de plus petite ampleur tels que les logements unifamiliaux. La rigidité des normes et règlements urbanistiques laissent par ailleurs peu de place à l'intégration de nouvelles morphologies au sein du paysage d'après eux. Les exigences accrues dans l'administration, la demande du client et les techniques en évolution sont d'autres facteurs que les concepteurs considèrent comme des paramètres complexifiant leur travail journalier.

L'analyse des résultats révèle que les outils numériques traditionnels ne sont pas considérés comme favorisant la diversité des formes produites. Cependant la nouvelle génération d'outils paramétriques semble constituer une

solution possible pour retrouver une recherche formelle flexible au sein du processus de conception dans le quotidien des petites et moyennes agences d'architecture. Les pratiquants de ces outils en sont conscients mais la méconnaissance générale de l'intérêt de ces outils, notamment dans et pour les PME, reste importante.

Les défis auxquels sont confrontés les architectes travaillant dans les petites et moyennes agences d'architecture, en regard de l'évolution des outils numériques et plus précisément paramétriques, expliquent en partie comment et combien leur perception et leur compréhension de ces outils, divergent des tendances actuelles discutées dans la littérature.

L'analyse de ce questionnaire laisse place à un approfondissement des perceptions *a priori* de la modélisation paramétrique.

2. Perceptions a priori et facteurs d'influence de la modélisation paramétrique

L'analyse quantitative exposée dans la section précédente clarifie la situation des pratiques architecturales belges. Cette analyse révèle les pratiques actuelles et le niveau de connaissance quant aux outils numériques et paramétriques disponibles et/ou utilisés actuellement en architecture. Nous complétons ces résultats au travers d'entretiens téléphoniques pour approfondir et affiner l'analyse quantitative et comprendre les facteurs d'influence qui poussent les architectes à favoriser une pratique plutôt qu'une autre. Nous regroupons ainsi les pressentis de non-initiés aux outils paramétriques et l'opinion de novices ou d'experts travaillant dans des PME belges.

2.1. Recueil des perceptions a priori via des entretiens téléphoniques

Le tableau 8 ci-dessous reprend la liste des entretiens semi-directifs réalisés. Celui-ci témoigne de la diversité et de la qualité de l'échantillon interrogé. Le code attribué à chaque entretien renvoie à un résumé ainsi qu'aux éléments clefs du propos. Certains freins possibles à l'usage du paramétrique sont identifiés par l'analyse de ces entretiens. Un tableau récapitulatif reprenant les réponses à certaines questions du questionnaire en ligne est repris en annexe 10. Celui-ci permet d'avoir une vue plus complète de chaque profil interrogé. Les retranscriptions complètes des entretiens peuvent également être consultées à l'annexe 11.

Table 8. Entretiens téléphoniques semi-directifs réalisés avec des architectes n'utilisant pas spécifiquement la modélisation paramétrique mais d'accord d'approfondir le sujet (par ordre alphabétique)

Entretien avec Marc Bodarwe (architecte, BODARWE Architektur)
Entretien avec Kader Boutemadja (architecte, Atelier AKB) – rencontre physique
Entretien avec Bernard Chambon (architecte, BURO 5)
Entretien avec Daniel Delgoffe (architecte, Atelier Architecture Daniel Delgoffe – Aadd) – rencontre physique
Entretien avec Jens de Schutter (architecte, Carton123)
Entretien avec Nicolas Hubaux (architecte chez Art and Build Architect)
Entretien avec Juan Luis Rodriguez Samper (architecte, bureau ROSAM Architecture)
Entretien avec John Schrayen (architecte, SUBSTRA architectures) – rencontre physique
Entretien avec Julie Taymans (architecte)
Entretien avec Jean Timmerman (architecte)
Entretien avec Ruben Van de Walle (architecte, studioV2)
Entretien avec Johan Van Rompaey (ingénieur-architecte, DAE Designers Architects Engineers)
Entretien avec David Walrave (architecte à l'Atelier Architecture Daniel Delgoffe – Aadd)

Les résumés et éléments clefs des entretiens effectués récapitulent de manière concise les contenus recueillis. Ceux-ci donnent l'opportunité aux lecteurs de saisir rapidement le propos des conversations et aident à contextualiser les verbatims soutenant l'analyse qui en est faite. Afin de considérer les propos à leur juste valeur, les accords de féminin sont supprimés et les verbatims anglophones sont traduits.

Entretien [1]

Résumé de l'entretien : entretien réalisé avec un architecte défendant l'utilisation du crayon en phase de conception d'avant-projet et considérant que le numérique influence beaucoup la forme du projet. Il a déjà entendu parler de Grasshopper et utilise AutoCAD comme outil de dessin. Cet architecte travaille plus spécifiquement sur des bâtiments industriels où les éléments sont déjà optimisés. Il considère que l'outil présenté ne serait pas adéquat pour trouver des solutions adaptées aux problématiques liées à ce domaine de construction. Par contre, il va au-delà des possibilités morphologiques pures pour envisager des applications directes de l'outil à son domaine. Ces applications seraient plutôt comme un support à la prise en considération d'éléments techniques (vent, questions énergétiques, ...). L'intérêt est ici que ces éléments servent la morphologie et non l'inverse. Il relève que ce sont les demandes des clients qui régulent en partie l'utilisation d'outils. La complexité apparente du logiciel le rebute : « *l'outil devenait un objectif et pas un moyen* ». L'outil lui semble pertinent pour des bureaux qui seraient focalisés sur des concours où la construction d'un argumentaire est un atout.

Éléments clefs : malgré sa réticence pour le numérique, cet architecte comprend et questionne l'usage des outils de modélisation paramétrique. Il extrapole les informations pour discuter des intérêts propres à son domaine d'application (ex. calcul des effets Venturi, consommations énergétiques). Il revient sur la question de la maîtrise de l'outil.

Entretien [2]

Résumé de l'entretien : entretien réalisé avec un architecte étant satisfait des outils numériques qu'il utilise. La découverte de Grasshopper l'intéresse afin de « *créer de nouvelles formes* » d'un point de vue des possibilités du logiciel, considérant que la créativité est uniquement induite par le concepteur tandis que le logiciel ne « *reste jamais qu'un outil* ». Cependant, la non-adéquation générale des logiciels avec le système de logique de pensée des architectes et les complexités d'utilisation qui en découlent le freine à adopter de nouveaux outils. Par ailleurs, il n'envisage pas réellement de pouvoir sous-traiter une modélisation paramétrique « *parce que c'est un peu comme le crayon, c'est mieux si on l'utilise soi-même* ». Il questionne l'application du

paramétrique pour les constructions en bois qu'il affectionne afin de lier modélisation et fabrication digitale.

Éléments clefs : l'intérêt émis pour le logiciel paramétrique est atténué par la complexité générale des logiciels proposés sur le marché qui le décourage à découvrir de nouveaux outils. Il préférerait cependant l'utiliser lui-même que de sous-traiter afin de garder une maîtrise de l'ensemble du processus conception – modélisation.

Entretien [3]

Résumé de l'entretien : entretien réalisé avec un architecte considérant les logiciels comme des freins à la créativité. Au premier abord, il associe la modélisation paramétrique à de grands projets architecturaux en raison d'une rentabilité estimée trop faible pour de petits projets. Les éléments qui le rebutent sont nombreux : les formes organiques générées selon lui par ces logiciels ne pourraient pas être mises en œuvre par les entreprises qu'il connaît, l'optimisation possible ne devrait pas être du ressort des architectes, ces derniers se focalisant sur l'esthétique tandis que les corps de métier sont responsables d'optimiser leurs propres matériaux, l'apprentissage nécessaire pour pouvoir utiliser le logiciel est énergivore. Concernant la recherche formelle, le paramétrique serait un outil comme un autre (maquette, programme 3D, réalité virtuelle) aidant à générer de la diversité mais induisant une perte de contrôle du processus entre l'encodage des paramètres et le résultat final.

Éléments clefs : l'optimisation générée par un logiciel lui fait craindre une perte de cohérence esthétique non-maîtrisée par l'architecte. Il se sent dépassé par les possibilités d'usage et craint le recours à des algorithmes « *parce qu'on n'est pas des ingénieurs en informatique* » laissant place à un travail par essais-erreurs, voire au hasard.

Entretien [4]

Résumé de l'entretien : cet architecte, associant le paramétrique à l'architecture de Zaha Hadid ou encore à la facilité de produire des formes complexes, fait cependant une erreur de langage en expliquant que sa pratique

correspondant à un processus BIM. Il discute ensuite la modification du marché de l'architecture qui a mené les maîtres d'ouvrage à faire appel à des constructeurs immobiliers plutôt qu'à des petits bureaux d'architecture. Dès lors, selon ses propos, les petits bureaux d'architecture vont devoir s'adapter et être intégrés dans des équipes multidisciplinaires en tant que spécialistes (suivi de chantier, modèle BIM, ...)

Éléments clefs : l'architecte discute la transformation du métier d'architecte notamment dans les petits bureaux d'architecture en raison de ce qu'il considère être une « *modification du marché* ». La survie des petits bureaux se ferait via l'intégration d'équipes multidisciplinaires gérant la globalité d'un projet.

Entretien [5]

Résumé de l'entretien : l'architecte a été formé au paramétrique lors de son cursus mais le logiciel appris lui apparaît comme « *chinois* », « *pas très sexy* ». L'aspect mathématique prend également une place importante de son point de vue. L'intérêt évoqué est la visualisation directe en 3D des modifications effectuées. Le logiciel paramétrique ne lui semble pas adapté à sa pratique quotidienne même si l'architecte comprend que cela puisse l'être pour les « *gros projets réalisés par Zaha Hadid* ».

Éléments clefs : le point de vue a posteriori de l'usage d'un logiciel de modélisation paramétrique est relaté par le terme « *pas intuitif* ». La pratique du logiciel a été abandonnée car elle est considérée comme inadéquate avec la pratique quotidienne d'un petit bureau d'architecture répondant aux demandes du client.

Entretien [6]

Résumé de l'entretien : cet architecte, ouvert à l'intégration du numérique en architecture, marque un attrait pour le paramétrique, y voyant notamment l'opportunité de trouver des « *solutions de formes* » jusqu'alors contraintes par les logiciels non adaptés à l'architecture ou limitées par l'utilisation du dessin à la main faute de temps. Au premier abord, il ne peut définir une hypothèse de valorisation de l'outil dans sa pratique mais au fil de l'entretien, il entrevoit une

opportunité d'application sur les façades d'un de ses projets afin « *d'anticiper la qualité plastique et esthétique* » de chacune d'entre elles au vu de leur diversité. Il associe ce type d'outils non pas à une taille de bureau ou à un type de projet mais à une « *démarche de recherche* » architecturale. La flexibilité d'effectuer des variations l'intéresse car il considère que c'est généralement laborieux de les effectuer ou bien, « *pour que ce ne soit pas trop laborieux, on, on réduit le niveau de définition de l'image* » afin d'avoir moins de détails à redessiner.

Éléments clefs : en vue d'une intégration du paramétrique dans son bureau, le fondateur veut s'informer sur le fonctionnement et les potentiels tandis qu'il veut former ses collaborateurs à l'outil, se détachant lui-même de cette tâche. L'interactivité potentielle du logiciel génère « *la capacité d'étudier des variations subtiles sans être limité par la contrainte du dessin* ».

Entretien [7]

Résumé de l'entretien : l'architecte s'intéresse au paramétrique afin d'intégrer des formes complexes dans le processus BIM dont il a une certaine maîtrise. Il envisage le paramétrique comme un moyen de maîtriser les formes à partir de paramètres : « *quand on dessine à l'ordi, on dessine des formes et derrière se créent de manière cachée, des paramètres. [...] Et alors le paramétrique, c'est faire l'inverse. C'est avoir accès à ces paramètres-là et les manipuler pour générer des formes plus complexes que celles qu'on fait quand on dessine simplement directement.* ». Il évoque un manque de connaissances de base, en ce qui le concerne, pour pouvoir l'utiliser. La nécessité d'acquérir des connaissances de base, qui lui semble fastidieuse, est l'unique élément qui le rebute à passer à l'utilisation de logiciel paramétrique. La possibilité d'engager un profil expert semble être une solution pertinente dans les conditions de sa pratique architecturale.

Éléments clefs : la définition du paramétrique formulée est intéressante, avec un regard informatique par le biais de la définition d'un paramètre. La recherche formelle dès l'esquisse du projet est un atout qui conforte dès le départ le concepteur sur la faisabilité de son projet. L'interrogé marque un intérêt pour l'outil mais évoque la difficulté d'apprentissage.

Entretien [8]

Résumé de l'entretien : cet entretien est réalisé avec un architecte considérant le paramétrique comme un outil impressionnant mais qui pousse les architectes vers des formes souples, courbes, facilement modélisables sur l'ordinateur mais très difficilement constructibles dans la réalité. Ces formes courbes engendreraient beaucoup de déchets découlant du fait que la production de matériaux est prévue en fonction d'éléments droits. Sa réticence à l'intégration du paramétrique vient également du fait qu'il considère que se préoccuper de l'aspect numérique ne laisse pas le temps de développer l'architecture en elle-même. L'interrogé estime qu'il y a une tendance à ce que le concepteur se retrouve cognitivement contraint par le logiciel, qu'il soit paramétrique ou non. Par exemple, quand il conçoit, il pense automatiquement à la structure en calques du logiciel sur lequel il dessine.

Éléments clefs : cet architecte se considère comme influencé par le numérique d'une manière générale et contraint dans un style architectural par le paramétrique. Il questionne les conséquences d'une telle architecture en regard de la question écologique.

Entretien [9]

Résumé de l'entretien : l'architecte interrogé travaille au sein d'un bureau de 90 personnes. Cet entretien a été conservé afin de pouvoir comparer les niveaux de connaissance et les pratiques en cours. Tout d'abord, la connaissance du paramétrique ainsi que l'usage effectif confirme l'avancée des grands bureaux en la matière. L'usage actuel du paramétrique se fait principalement pour de l'automatisation de tâches et pour modéliser des éléments spécifiques (façade par exemple) et non pour un projet complet car la maîtrise actuelle du logiciel est insuffisante pour modéliser davantage. Il relève qu'une des problématiques est que seules 2-3 personnes s'y connaissent en paramétrique, ce qui limite les possibilités d'interaction. Il considère que le paramétrique va se développer et se démocratiser également dans les petites structures une fois qu'il aura été enseigné dans les écoles.

Éléments clefs : la formation au logiciel paramétrique a été effectuée en interne. L'application majeure du paramétrique est la mise en place de « routines » pour automatiser les tâches fastidieuses (numérotation portes)

mais également pour des parties spécifiques d'un projet (façade). L'enseignement va jouer un rôle primordial dans la propagation de l'usage du paramétrique dans la pratique architecturale.

Entretien [10]

Résumé de l'entretien : l'architecte interrogé a été formé au paramétrique lors de ses études. Deux freins à l'usage sont évoqués : complexité du programme et du métier. Il considère qu'il y a un détachement important de la réalité avec ce type d'outils qui permettent aisément de modéliser et visualiser des formes complexes. L'imprimante 3D pourrait permettre de recréer un lien afin de mieux percevoir l'espace généré. Pour pallier à la complexité de la logique paramétrique, il propose soit de se faire aider par un expert, soit que l'interface soit simple afin d'en comprendre le fonctionnement seul. L'influence du logiciel sur l'intention du concepteur lui apparaît comme un atout dans sa pratique personnelle car en tant que novice, il a pu cerner la limite outil/concepteur. Cependant dans le cadre du bureau, le logiciel est considéré comme un outil de production basculant vers une contrainte de travail, modifiant par exemple l'intention formelle du concepteur au profit de ce qui peut être aisément modélisé. L'interrogé considère que le paramétrique engendre un style d'architecture différent (« *pas rigoureuse, rectiligne* »). En cela, il marque une réticence à son usage avec le besoin d'un temps d'adaptation et une sous-traitance de la modélisation à des experts.

Éléments clefs : un des aspects bénéfiques selon l'interrogé est la visualisation simultanée de 4 vues, cependant il voit l'interface du logiciel comme complexe à découvrir et utiliser. Il ressent un détachement de la réalité par la facilité de modéliser des formes complexes. L'influence de l'outil sur la conception peut être vue comme un avantage ou un inconvénient selon le contexte d'utilisation. Le processus de conception le plus efficace selon lui est le passage du dessin à la main vers une modélisation paramétrique. Il envisage l'externalisation de la modélisation pour se démarquer formellement (ex : marchés publics).

Entretien [11]

Résumé de l'entretien : l'architecte a découvert l'existence de la modélisation paramétrique au fil de recherches personnelles pour comprendre le développement de formes complexes. Il souligne la méconnaissance du paramétrique dans le cursus scolaire et du rejet que cela engendre dans la vie professionnelle. Cet entretien a permis d'esquisser les possibilités de l'application quotidienne possible dans un bureau de petite taille et de saisir l'intérêt de générer aisément différentes variantes diversifiant ainsi la recherche formelle. Ces exemples à une échelle architecturale qu'il pratique le surprennent et l'intéressent.

Éléments clefs : l'interrogé considère le logiciel complexe en apparence. Il regrette une méconnaissance de l'application architecturale possible pour les projets de petite envergure. La génération de variantes à moindre coût et rapidement est pour lui un atout majeur de ce type d'outil.

Entretien [12]

Résumé de l'entretien : cet architecte s'intéresse au paramétrique en raison des possibilités illimitées qui peuvent être modélisées. Le lien avec le logiciel qu'il utilise couramment, notamment pour respecter un processus BIM, renforce sa volonté de travailler avec un outil paramétrique. Sa maîtrise actuelle ne lui permet pas d'énoncer des difficultés précises rencontrées lors de l'usage du logiciel. Il envisage que les tâches de l'architecte évoluent et que des spécialistes en modélisation paramétrique apparaissent car tout le monde ne sait pas programmer.

Éléments clefs : l'architecte s'interroge sur la taille idéale du projet. Cet architecte pense qu'il y a un marché pour les petits bureaux (automatisation du process notamment) dans les projets modulaires, avec des répétitions. Changement du rôle de l'architecte : spécialiste en parametric design, BIM, ...

Entretien [13]

Résumé de l'entretien : entretien avec un architecte utilisant Grasshopper. Il a entendu parler pour la première fois de ce logiciel dans des conférences. Il énonce une définition claire du paramétrique. La facilité de modification du

logiciel qu'il apprécie lui apparaît également comme une difficulté en raison du codage à réaliser. Il utilise l'outil à la fois comme un outil de conception et/ou de représentation. Dans ce deuxième cas, il complète le processus par du dessin à la main, de la modélisation 3D simple ou une maquette physique. La répartition des tâches dans son bureau ne permet pas de faire l'ensemble du projet en paramétrique (« *c'est propre à notre mode de fonctionnement* »).

Éléments clefs : l'interrogé relève la difficulté du codage, de l'interopérabilité et la logique de modélisation différente des outils usuellement utilisés, notamment en raison de la nécessité de réfléchir à l'objet final afin d'utiliser les composants les plus pertinents, tout en cherchant par essais-erreurs. Il y a donc une forme d'opposition entre l'idée précise à formuler et la recherche par tâtonnement. L'architecte souligne qu'il considère que les possibilités de modélisation deviennent infinies en comparaison avec une modélisation traditionnelle telle qu'ArchiCAD. Il indique qu'il envisage le paramétrique davantage pour une portion de bâtiment ou en tout cas une partie du projet (pas un masterplan) dans sa pratique architecturale. Il considère finalement que cette typologie d'outil est dédiée à des projets pour lesquels la recherche formelle prévaut.

2.2. Identification des facteurs influençant l'utilisation de la modélisation paramétrique

Lors des entretiens téléphoniques semi-directifs que nous avons décrits dans la méthodologie (section 5.2 du chapitre 3), les architectes ont évoqué leurs impressions par rapport aux outils de modélisation paramétrique. Les éléments d'analyse qualitatifs proposés ci-après révèlent les postures des interrogés confrontés à une autre pratique numérique. À travers ces propos, nous relevons les facteurs d'influence qui permettent, en partie, d'expliquer la lenteur d'adoption des outils de modélisation paramétrique dans les petits bureaux d'architecture belges. Au-delà d'une évaluation critique des logiciels, les réactions des acteurs interrogés vis-à-vis de ces outils nous ont permis de mettre en avant une diversité de rapports au numérique selon le rôle de chacun dans la chaîne de conception, des manières de travailler et de collaborer et du contexte dans lequel les outils sont insérés. Nous relevons également les intérêts qui se dégagent et qui représentent pour les architectes des pistes

d'amélioration des problématiques liées à leur pratique respective et aux outils qu'ils utilisent.

Le fonctionnement des outils paramétriques tel qu'il a été présenté (se référer à la méthodologie décrite à la section 5.2, chapitre 3) a suscité chez les acteurs interrogés des réactions contrastées. Les postures présentées dans cette section sont considérées en regard de l'expertise des acteurs interrogés. Nous pouvons distinguer d'une part, les propos des interrogés n'ayant jamais utilisé de logiciels paramétriques, ou novices mais ayant abandonné cette pratique et, d'autre part, les propos des architectes dits experts qui utilisent couramment ces logiciels dans leur pratique architecturale.

Les données sont structurées en six facteurs d'influence potentiels énumérés ci-après et qui rejoignent par ailleurs les caractéristiques du paramétrique que nous avons développées dans l'état de l'art à la section 2.4 du chapitre 2 :

- l'apprentissage qui englobe les compétences à acquérir et qui s'assimilent à celles énoncées par de Boissieu (2013) ;
- la maîtrise du processus qui est mal perçue par les non-initiés et associée à un processus de conception par essais-erreurs, qui peut par ailleurs être considéré comme prometteur par certains architectes interrogés ;
- la recherche formelle qui découle de la flexibilité d'un tel processus de modélisation ;
- le contexte professionnel qui va faire émerger les conditions de l'adoption ou non de tels outils ;
- la collaboration qui semble compromise à la fois à l'échelle intradisciplinaire et transdisciplinaire ;
- la typologie des bâtiments, essentiellement de grande envergure dans l'imaginaire commun en raison de la méconnaissance des enjeux de cette modélisation.

Apprentissage :

Devant l'interface et le fonctionnement des logiciels, la majorité des personnes interrogées estime qu'il est nécessaire de posséder une expertise et des compétences spécifiques, que la plupart ne possède pas, afin de pouvoir paramétrer l'outil de manière pertinente et efficace. Au vu de ces propos spontanés et de la littérature, nous établissons l'apprentissage des logiciels de modélisation paramétrique comme un facteur d'influence.

En effet, nous catégorisons dans l'apprentissage les exigences qui rejoignent notamment l'apport théorique de de Boissieu sur les compétences et savoirs spécifiques à la modélisation paramétrique décrit au chapitre 2, section 2.4.3. Cette chercheuse a mis en évidence l'existence et l'importance d'acquérir les compétences propres au paramétrique.

Plusieurs participants non-expérimentés ou ayant abandonné l'usage d'outils paramétriques soulignent cette nécessité d'apprentissage et d'acquisition d'expertise spécifique au paramétrique. Cet apprentissage est vu par certains comme une évidence abordable :

« Il faut juste une bonne formation et une bonne compréhension mais je ne vois pas pourquoi ce serait plus compliqué d'utiliser ça qu'autre chose. » [5-46]

« Une bonne formation. C'est tout. C'est le seul handicap » [7-32]

Tandis que certains sont ouverts à se former, la nécessité d'apprentissage résonne pour d'autres comme un frein à l'usage des logiciels de modélisation paramétrique, comme l'illustrent les propos [3-38,40] et [7-28, 30]. Les participants ressentent l'importance de développer des savoirs spécifiques propres à un logiciel pour connaître l'interface du modeleur ou au paramétrique plus généralement [5-18,20]:

« Ça doit être simple à utiliser [...] il ne faut pas avoir fait des études rien que pour un programme » [3-38,40]

« Tu peux reformuler peut-être en manque de formation de base. [...] Je vais devoir me taper des Youtube et des machins, ça ne me donne pas envie. » [7-28, 30]

« C'était pas très intuitif, enfin pas intuitif du tout je trouve. [...] si t'as pas un minimum de connaissances de formules de math et tout ça, t'es vite largué. » [5-18,20]

Certains propos des interrogés mentionnent donc inconsciemment que les savoirs à acquérir sont de différents ordres et corrélient les savoirs et compétences spécifiques identifiés et discutés dans la littérature. En effet, le premier savoir identifié par de Boissieu est propre aux mathématiques et à la géométrie en particulier et transparaît dans le propos [5-18,20] ci-dessus.

Le second savoir décrit par cette chercheuse est lié à l'informatique et à la programmation. Un des architectes novices interrogés émet la remarque suivante : *« Ça donne l'impression que bien souvent ces outils-là sont créés par des informaticiens et donc du coup, oui, c'est pas la même logique. » [2-69]*

Un expert en paramétrique confirme un manque d'affinité entre les architectes et la programmation : *« De mon expérience, il n'y a pas beaucoup d'architectes qui aiment programmer [...] J'ai un collègue avec qui je fais beaucoup de projets d'architecture et qui est en BIM et je vois qu'il s'arrête quand on doit programmer ou on doit calculer des, des, des portées et tout ça. C'est pas pour lui. [...] Il est le design et moi je suis heu, demi-informatique, demi-architecte [rires]. » [12-89, 93, 95]*

Pour un des architectes interrogés, cette technicité l'inciterait à laisser cette compétence à d'autres profils spécialisés : *« A la limite il faut être ingénieur en math pour vraiment pouvoir faire heu, le truc que t'as envie de faire. » [5-28].* Pour l'un des architectes experts, l'appropriation du paramétrique par les architectes eux-mêmes *« dépendra très fort du niveau d'enseignement des, des étudiants... [...] Pour rendre la technologie abordable parce que sinon elle est quand même très compliquée. » [9-85, 87].* En effet, un autre architecte expert souligne que *« le plus important problème que nous rencontrons c'est le, le, le degré de formation qu'il faut à chaque fois pour entrer dans un projet. Nous sommes une très petite équipe, ce qui fait que nous devons à chaque nouveau projet, refaire un certain degré d'apprentissage. » [4-17].* Ce degré de spécialisation incite à la segmentation des tâches car l'exigence en compétences peut difficilement être maintenue par tous les collaborateurs : *« en fait la connaissance est trop heu chez deux trois personnes et pas plus. » [9-*

43]. Ce propos ouvre la question du dialogue entre les acteurs d'un projet : non-initiés et experts au sein d'un bureau ou acteurs extérieurs au bureau.

Pour la plupart des acteurs rencontrés, le logiciel apparaît donc comme extrêmement technique, avec un nombre important de compétences à acquérir (savoirs liés au logiciel, savoirs mathématiques et géométriques plus particulièrement, savoirs informatiques notamment) et dont il faut connaître précisément la teneur et les enjeux pour être en mesure de les mobiliser et de maîtriser le logiciel. Ces compétences à acquérir demandent du temps, souvent difficile à dégager, pour se former et maintenir ses compétences à jour. Comme le précise un architecte : « *On passe plus de temps à essayer de maîtriser l'outil, si vous voulez, à être performant, à faire des beaux modèles 3D, des images, mais ça n'apportait plus rien sur le terrain, je vais dire.* » [1-38]. Certains architectes considèrent même que « *l'outil devenait un objectif et pas un moyen.* » [1-36].

Cette difficulté d'acquisition des compétences requises peut mener à un sentiment d'incertitude et à un manque de maîtrise du processus. Nous constatons une divergence entre la portée du logiciel telle qu'imaginée par les fabricants et la manière dont les utilisateurs potentiels imaginent son appropriation.

Maîtrise du processus :

Les compétences à acquérir impactent la maîtrise du processus paramétrique. La considération de la maîtrise intervient à deux niveaux : la pertinence de l'usage de l'outil et le contrôle du processus paramétrique.

L'expertise de spécialistes ayant acquis les compétences nécessaires pour interpréter les résultats et pour ré-ajuster efficacement le projet en fonction des données fournies par le logiciel est essentielle pour ne pas perdre les objectifs et concepts définis par l'architecte, révélant qu'un manque de maîtrise du processus peut être crucial en regard des ambitions du projet : « *Et quand on utilise le paramétrable, allez l'optimisation des chutes par exemple, pour les panneaux, souvent ça ne rentre pas en cohérence avec le visuel qu'on veut obtenir.* » [3-22]. En effet, les architectes se sentent démunis face aux spécificités de ce processus de conception et de modélisation.

Bien que la maîtrise du processus par le concepteur, dans le cadre d'une modélisation paramétrique, ait été largement débattue dans la littérature notamment par Bourbonnais (2015), les architectes non-initiés remettent en question la maîtrise « *parce que ce n'est plus nous le maître mais c'est l'algorithme du programme qui est le maître [...] Et on n'a pas de contrôle sur l'algorithme parce qu'on n'est pas des, des ingénieurs en informatique etc. [...] C'est en cela qu'on donne une partie du travail au logiciel, donc on perd cet-cet-, ce contrôle-là dessus. Pas sur le visuel final... [...] Mais sur le processus [...] C'est plus par essais-erreur que par, par réellement par maîtrise* » [3-96, 108]. Les caractéristiques intrinsèques du paramétrique permettent effectivement d'arriver à un même résultat via différents algorithmes. De ce fait, l'architecte hésite devant la multitude de cheminements possibles permettant de parvenir aux résultats. Ce développement par essais-erreurs apparaît comme un processus non maîtrisé. Une des attitudes demandées au concepteur, pour ne pas être déstabilisé face à un tel processus, est de faire preuve de curiosité et d'esprit d'initiative afin de continuer à aller de l'avant malgré les incertitudes et les bugs qui peuvent apparaître au cours du processus.

« J'ai l'impression qu'on fait beaucoup d'essais-erreurs heu, lorsqu'on fait du paramétrique. On a une idée précise de ce qu'on veut et en même temps on va à tâtons parce que... [...] On ne sait pas tout à fait comment le faire tout de suite. Et ce qui est séduisant aussi c'est que j'ai l'impression que les possibilités de modélisation sont quasiment infinies. » [13-44, 46]

Le processus de conception paramétrique se distingue d'autres systèmes génératifs par le fait qu'il permet un contrôle progressif de la forme pendant le processus de conception, ce qui s'avère particulièrement utile lors de l'exploration formelle (Dino, 2012). La réactivité et l'adaptabilité de cette typologie d'outils résonnent comme une perte de maîtrise du processus alors même que cette flexibilité semblait manquer indéniablement aux outils de CAO traditionnels. Il s'établit ainsi un paradoxe lié au ressenti des utilisateurs, là où théorie et pratique paraissent pourtant se rallier.

Recherche morphologique :

L'état de l'art effectué retrace la diversité des études réalisées au sujet de la capacité des logiciels paramétriques à favoriser et/ou faciliter ou non la

recherche morphologique d'un projet architectural. La littérature et les propos recueillis lors des entretiens téléphoniques se rejoignent quant à la plus-value des outils paramétriques par rapport aux outils CAO traditionnels. Il n'en reste pas moins que certains avis divergent. Tout d'abord, certains chercheurs à l'image de Légèze (2016) et certains architectes interrogés sont convaincus que le dessin à la main est toujours l'outil de référence comparé notamment aux outils numériques : « *tout le monde sait quand même que, la liberté de la main, voilà, c'est c'est, c'est une vraie liberté, un gain de temps aussi.* » [10-119]. Selon ce point de vue, le paramétrique est davantage un frein qu'un outil permettant d'aller au-delà du processus réflexif humain.

D'autres architectes interrogés considèrent que « *le paramétrique, ça reste () [bruit de fond] heu de l'ordinateur. [...] qui reste dans ses limites de ce qui est possible heu à calculer [quoi]. Donc heu si l'algorithme est d'une certaine manière, ben le résultat va être de la même manière à chaque fois [...] Donc c'est un petit peu ça la limite de la créativité.* » [3-52, 54, 56]. En effet, le logiciel effectue avec exactitude une même opération. Ce fonctionnement peut être vu comme un avantage, notamment en termes de maîtrise du processus (Bourbonnais, 2015; Dino, 2012), ou comme un inconvénient pour la diversité de la recherche formelle. Dans tous les cas, il est vrai que la structure d'un logiciel (quel qu'il soit), impacte consciemment ou inconsciemment le travail du concepteur : « *organiser vos fichiers numériques... [...] Vous fait réfléchir ou organiser votre logiciel et non pas développer votre architecture. [...] Si vous concevez, vous pensez à la conception ou à la structure de votre logiciel () aux calques* » [8-66, 68, 70]. Cependant, un des interrogés intègre ces différentes caractéristiques de l'outil et examine l'outil dans sa globalité. Un tel logiciel semblerait permettre d'« *objectiver les paramètres et parfois se contredire soi-même. On pensait que, et en, en passant par les filtres du logiciel, il va nous démontrer que, c'était tout à fait le contraire et qu'il faut changer son fusil d'épaule. Mais déjà très tôt dans le projet, pour ne pas être trop loin* » [1-94].

Certains architectes se sentent « libérés » dans leur processus, en comparaison avec les outils de CAO traditionnels : « *parce que ça pour moi c'était typiquement les limitations d'ArchiCAD [...] où tu étais lié à l'outil ou bien tu devais bricoler comme un malade.* » [13-50, 52]. D'autres architectes ont l'impression que les logiciels de modélisation paramétrique ont tendance à pousser le concepteur dans un style architectural spécifique : « *Mais il semble*

que les outils vous mettent vraiment dans une sorte d'architecture « blob » ou de formes sinueuses. » [8-42]. La méconnaissance des logiciels paramétriques et, parallèlement à cela, le développement de son usage dans les grands bureaux d'architecture en charge de projets de grande envergure abondamment publiés, engendrent chez les non-initiés des aprioris. Un expert interrogé émet une opinion plus mesurée considérant que les architectes ne seront « pas plus libres mais ils pourront peut-être faire le des-, heu, un peu plus de recherches aussi bien dans les possibilités de, heu, d'un, un projet, que dans les possibilités de certains éléments du projet. Donc la partie recherche de, de ce que, de notre activité professionnelle pourrait se voir heu, je dirais soutenue par l'utilisation de, de ces outils. » [4-45].

Quant à l'amplitude de la recherche morphologique rendue possible par l'utilisation des outils de modélisation paramétrique, les postures divergent. L'outil paramétrique viendrait en support à la réflexion architecturale que l'architecte développe, lui permettant d'explorer d'autres pistes qui ne se manifestaient pas au départ. L'architecte se sent cependant tiraillé par cette opportunité et les conditions de sa pratique.

Contexte professionnel :

Nous avons pu voir que le contexte est un des éléments clefs de l'adoption d'une technologie par des usagers (cfr. section 3 du chapitre 2). Le contexte prend en compte tout élément externe qui favorise ou au contraire freine, voire entrave, l'adoption de la technologie (à savoir dans cette étude, les outils de modélisation paramétrique).

Deux éléments de contexte semblent se distinguer nettement dans les propos des architectes interrogés : le prix d'achat du logiciel et la demande du client.

Le prix d'achat d'un logiciel est généralement un critère décisionnel clef pour l'adoption d'une technologie. Bien qu'il n'apparaisse pas comme un élément majeur dans les discours recueillis, la dimension économique et le coût d'acquisition d'un nouvel outil sont considérés avec attention par certains architectes. C'est le cas d'un architecte qui relève que « suivant le coût du logiciel, ben heu effectivement, si il est pas trop cher, facile d'utilisation » [2-79], l'outil a davantage de chance d'être acquis par son bureau. Cette contrainte

économique semble d'autant plus manifeste au sein des petites agences. Plusieurs participants insistent sur ce point et soulignent les inégalités potentielles d'accès aux futurs marchés, entre petites et grandes agences si celles-ci se voyaient embaucher des experts : « *ils auraient du mal à amortir () je vais dire, peut-être pas l'achat mais le fait de l'utiliser par quelqu'un.* » [1-64].

Le deuxième élément contextuel qui est largement relaté par les architectes et qui semble décisif est la demande des clients. Premièrement il y a les architectes qui n'adopteront pas la technologie tant que celle-ci n'apparaît pas comme une obligation émanant du client : « *tout simplement le client ne demande pas, n'est pas demandeur de ça.* » [1-18]. D'autres architectes interrogés ne visualisent pas l'adéquation entre ce type de modélisation et la demande de leurs clients pour lesquels ils dessinent généralement des projets de petite envergure, relativement simples formellement : « *Bah plus les grandes échelles ou les projets un peu plus particuliers mais heu, le client qui vient te voir et qui veut juste un bête 4 façades avec des châssis à croisillons* » [5-50]. Les architectes n'entrevoient donc pas « *une application directe par rapport à ce que sont nos commandes et les contraintes dans lesquelles on travaille.* » [6-26]. Ce propos laisse sous-entendre les multiples contraintes qui composent le quotidien du métier d'architecte avant qu'on puisse envisager de diversifier voire de modifier une pratique. Un des architectes, ayant été formé aux outils paramétriques au sein de son cursus et à présent confronté à la réalité du métier, formule la remarque suivante : « *Haa le métier c'est compliqué [rire] [...] Je crois que j'en utiliserai plu:s heu: si souvent.* » [10-20, 22]. Il semblerait que la demande formulée par les clients ne rencontre généralement pas les modalités nécessaires pour franchir le pas de l'usage du paramétrique.

Collaboration :

Une collaboration efficace est d'une importance majeure pour toute pratique de conception. Pour travailler efficacement en tant que concepteurs dans un processus architectural, les différents acteurs doivent collaborer les uns avec les autres.

A ce sujet, tous les acteurs soulignent leur crainte quant à la capacité des outils de modélisation paramétrique à susciter du dialogue et un réel échange entre acteurs du projet, qu'ils soient internes ou externes au bureau. Tandis que les non-initiés relèvent une possible problématique de collaboration

transdisciplinaire, les experts relèvent une problématique de communication intradisciplinaire. Il semble y avoir une incompatibilité d'un tel logiciel à favoriser les collaborations professionnelles de manière globale. Les recherches avancées dans la littérature tergiversent sur cette question. Une étude réalisée par Heumann et Mullenix (2014), regroupant des retours d'expérience au sein d'agences, relate la difficulté d'échanger et d'intervenir sur l'algorithme généré par un collaborateur. A l'inverse, cette même étude montre qu'en analysant la question à une échelle collaborative plus large, les outils paramétriques permettraient de réintégrer le client et les usagers finaux dans la boucle de conception. Les recherches divergent donc quant à la capacité d'un tel logiciel à favoriser les collaborations inter et intraprofessionnelles.

Si nous nous penchons sur les résultats obtenus, un des experts souligne que « *le problème du paramétrique, [...] c'est l'interopérabilité d'un modèle. Le refiler à quelqu'un, c'est pas spécialement une partie de plaisir.* » [13-56], ce qui révèle une problématique de communication intradisciplinaire. Du fait des vastes compétences à acquérir et notamment les savoirs propres aux logiciels identifiés par de Boissieu (2013), les opérateurs ont tendance à utiliser certains composants plutôt que d'autres en fonction de leurs connaissances et expériences, influençant d'une manière personnelle le développement de l'algorithme. Il semble alors compliqué de travailler ensemble sur un fichier partagé. L'identification des savoirs et compétences spécifiques au paramétrique pourrait engendrer que « *le rôle de l'architecte va changer. Il y aura des spécialistes en, en parametric design, BIM, et tout ça et l'architecte sera une autre personne qui n'est pas spécialiste dans ces choses-là mais le commerce donc son process de design va pas changer.* » [12-77]. Il apparaîtrait alors une nécessité de procéder à la répartition des tâches distinctes d'un collaborateur à l'autre. Cette répartition est annoncée par un expert comme « *propre à notre mode de fonctionnement* » [13-124]. Dans ce cas, il reviendrait à chaque bureau de se définir un processus organisationnel propre.

Les non-initiés portent quant à eux un regard plus large sur la collaboration et envisagent l'intégration du paramétrique dans le processus global du projet, prenant en considération les différents acteurs. L'un des architectes non-initiés se questionne quant aux conséquences des possibilités morphologiques plus facilement modélisables via ces outils et notamment « *[...] comment communiquer avec d'autres entreprises* » [3-58] une fois la forme définie sur le

logiciel. Le paramétrique est ancré dans les mentalités de certains architectes comme un outil générant un style particulier. De ce fait, un architecte précise que « *souvent il faut la main d'œuvre qui sait mettre en place quelque chose de pa.; pa () paramétrique. [...] Donc souvent c'est pas le cas dans la région* » [3-44,48]. Cette dernière réaction ouvre la question de la typologie des ouvrages conçus via l'utilisation d'outils de modélisation paramétrique.

Typologie :

Les architectes interrogés laissent sous-entendre qu'il y aurait des typologies de projets davantage propices à l'exploitation de la modélisation paramétrique et qui ne correspondraient pas à la majorité des commandes qui composent leur pratique.

On retrouve chez les architectes non-initiés des propos tels que « *dans les projets que nous on fait, c'est des projets trop petits.* » [3-32] allant même jusqu'à faire penser qu'un style architectural est induit : « *Je serais heu d'abord réticent parce que heu je devrais peut-être m'adapter à une architecture qui n'est pas la mienne au départ.* » [10-121], ou qu'un style architectural propre au paramétrique devient plus pertinent « *si c'est pour des projets de prestige ou de, de allez, d'image* » [3-70]. Ces stéréotypes viennent à la fois de la renommée d'ouvrages internationaux et, d'autre part, d'une méconnaissance du fonctionnement intrinsèque de ces outils : « *Donc ici à part pour des projets de:, vraiment très gros projets à la Zaha Hadid ou heu, des projets d'architecture, dans la vie de tous les jours, c'est encore un peu... [...] Ou en tout cas de ce que moi je connais, c'est pas; c'est pas encore vraiment adapté quoi.* » [5-34, 36]. Ce manque de connaissance induit une incapacité de transférer les potentialités à leur domaine d'expertise car « *je ne vois pas nécessairement dans, dans, des, des hypothèses de valorisation de l'outil.* » [6-24]. La remise en question de ces stéréotypes semble même mettre mal à l'aise un des interrogés : « *peut-être que la question est stupide en soi, y a-t-il un, une utilisation, des utilisations possibles de ce type d'outils, dans des, fin, possibilités, un intérêt (), à utiliser des outils comme ceux-là, dans le cadre d'une production de formes qui sont au fond... [...] Peut-être plus conventionnelles.* » [6-46, 48].

Selon un des experts consultés, la pertinence de l'usage du paramétrique ne serait pas une typologie particulière de projets mais bien la demande d'une

recherche formelle étudiée : « où il y a une recherche formelle un peu plus poussée que... [...] Que 80% de ce qu'on nous fait faire (). » [13-106, 108].

Les postures relatées ci-dessus mettent en évidence les pistes de réflexion soulevées par les interrogés lorsqu'ils sont interpellés sur une nouvelle pratique de modélisation. Ces résultats mettent en évidence les différences de points de vue selon le niveau d'expertise des architectes. La section suivante questionne les changements d'appréhension à l'issue d'une journée de formation aux outils de modélisation paramétrique.

3. Appréhension de la modélisation paramétrique au terme d'une journée de formation

Après avoir cartographié les postures des architectes de PME belges quant à l'utilisation d'outils de modélisation paramétrique, nous examinons ici l'influence de la culture numérique. Au travers de quatre formations d'une journée, nous établissons le changement d'appréhension que des concepteurs peuvent avoir vis-à-vis de cette typologie d'outils après cette première prise en main. Cette expérimentation nous permet d'esquisser les contours d'un potentiel attrait et de confronter l'innovation à l'inertie des pratiques. Il ne s'agit pas ici de mesurer avec précision l'évolution des connaissances en une journée ni de questionner la méthode d'apprentissage du paramétrique, mais bien d'ouvrir la question, de recenser et de catégoriser les attraits et difficultés majeurs liés au niveau de culture numérique des participants.

Nous analysons dans cette section comment est perçue la modélisation paramétrique en début et en fin d'une journée de formation selon la méthodologie explicitée à la section 4.3 du chapitre 3 (description des questionnaires écrits ainsi que les profils des participants). En effet, nous avons vu que le terme *paramétrique* est souvent galvaudé en raison de confusions liées à l'évolution simultanée de technologies émergentes et notamment amalgamé au BIM (chapitre 2 section 2.2). Afin de visualiser l'évolution de la perception des outils de modélisation paramétrique au terme d'une seule journée d'immersion, nous relevons les intérêts et difficultés soulevés par les participants.

Pour structurer cette analyse, nous catégorisons les propos des participants selon trois attributs. Ceux-ci sont définis sur base des caractéristiques du paramétrique établies à partir des discours existants dans la littérature (chapitre 2, section 2.4) et dans le même temps, s'affranchissent de celles-ci pour correspondre aux verbatims des participants.



Nous définissons un premier attribut résonnant avec le concept de *recherche morphologique* énoncé dans l'état de l'art et le nommons « **créativité** » pour correspondre davantage à la terminologie employée par les professionnels interrogés et recensée dans les verbatims, bien que la notion de créativité ne puisse évidemment en réalité être réduite à celle de la *recherche morphologique*. Les

évoqueries relatives à ce champ de réflexion et décrivant l'exploration formelle sont résumées par cet attribut.

Bien que les deuxième et troisième attributs reprennent pour partie les caractéristiques du paramétrique de l'état de l'art, les dénominations que nous leur attribuons sont plus vagues. Les participants étant novices, les remarques qu'ils formulent se rapportent en effet davantage à une comparaison avec des outils numériques traditionnels.



Le second attribut est défini selon un angle pragmatique et recouvre tous les « **aspects techniques** ». Cet aspect est parfois peu considéré en tant que tel dans la littérature. Nous nous attelons ici à recenser les verbatims s'attardant à la technicité même du logiciel, à l'image de Davis et ses collègues qui posent la question de la complexité d'un modèle paramétrique du point de vue de la lisibilité informatique de sa structure, des éléments qui la composent et des relations entre ceux-ci (Davis et al., 2011).



Le dernier attribut est intitulé « **fonctionnalités** ». A l'image des écrits de Yu, Gero et Gu (2015) décrivant les fonctionnalités « pratiques » des outils de modélisation paramétrique, telles que la génération et la gestion efficaces de formes complexes, l'intégration de paramètres et de données externes à la conception pour aboutir à des solutions plus rationnelles, cet attribut regroupe tous les propos des architectes sur ce que permet ou leur semble permettre l'outil.

Nous nous appuyons sur ces trois attributs pour développer l'analyse de cette phase de la recherche.

Au commencement de la formation, les participants (pour rappel, 30 des 49 participants ont été retenus et analysés) ont exprimé leurs intérêts pour les outils de modélisation paramétrique de manière assez factuelle. D'un point de vue des fonctionnalités, il leur semble que le logiciel pourrait leur permettre de gagner du temps et d'avoir une « *meilleure gestion* ». Le logiciel apparaît comme ergonomique, « *user friendly* ». Par ailleurs, les participants évoquent la « *réversibilité* », car le logiciel permet de « *modifier facilement* ». Cette « *flexibilité via les paramètres* » est exprimée comme suit par un des participants: « *Quand on change le « code », on voit directement les*

changements du modèle dans Rhino. ». Au-delà de ces aspects fonctionnels, le volet de la créativité est également abordé. La flexibilité évoquée permet en effet « *d'acquérir une grande liberté de conception* ». Le verbatim suivant exprime ce qui a séduit un des participants: « *le champ des possibles dans la création architecturale par l'introduction de paramètres logiques ou mathématiques qui sont plus difficiles à implémenter par une approche dessin* ». De manière plus directe, certains contributeurs expriment cela comme « *la possibilité de créer des formes non standards* » ou des « *formes complexes* ».

Nous observons qu'en ce début de journée, la catégorie sur les aspects techniques n'a pas été évoquée dans les intérêts.

Concernant les difficultés ressenties avant la formation, les propos émis par les participants sont davantage de l'ordre du pressentiment et du questionnement, abordant spontanément les trois attributs définis.

Concernant les aspects techniques, on parle de « complexité apparente » et notamment un participant complète : « *Quand j'ai vu un aperçu sur le logiciel lors de la modélisation, il me semblait un peu compliqué puisque ça se fait à l'aide des algorithmes mathématiques et non pas des objets prédéfinis* ». Cet « *encodage de données* » est effectivement ressenti comme un frein à son usage. Un autre commentaire se positionne entre une problématique technique et fonctionnelle: « *En tant qu'architecte, l'approche est complètement différente : il faut décomposer toutes les manipulations, cela engendre beaucoup plus d'étapes. Une ligne est décomposée en 3 (au minimum) : un point A, un point B et une ligne qui les relie.* » Il est clair qu'aux yeux de plusieurs interrogés, « *une formation informatique est nécessaire* ».

D'un point de vue fonctionnalité, on peut indiquer que les designers envisagent plutôt d'utiliser ce logiciel « *après l'avant-projet* ». Un seul autre commentaire aborde les fonctionnalités des logiciels de modélisation paramétrique et stipule de manière tranchée que ceux-ci ne sont « *pas pour la pratique classique* ».

Concernant la perception d'une place renouvelée pour la créativité architecturale, certains non-initiés émettent davantage de réserves : « *Ce qui me freine, c'est plus l'intervention de ce type de logiciels dans la conception qui pourrait laisser moins de place à la créativité en amont* ». Cela rejoint la remarque suivante: « *si ils [les outils paramétriques] sont bien maîtrisés et*

utilisés judicieusement au service du projet, d'une idée... mais risquent de donner trop de facilité à certains architectes de développer facilement tout type de formes sans réflexion de fond sur l'architecture, le projet, le contexte. ». Cette réflexion peut être complétée par la suivante: « Même si pour moi la recherche de forme passe en tout premier lieu par le croquis à la main ».

La figure 39 permet de visualiser schématiquement la proportion de propos recueillis par attribut, voire la proportion de propos en recouvrement entre deux attributs. Les différentes fonctionnalités perçues par les interrogés sont considérées comme de potentiels atouts, tandis que les aspects techniques sont plutôt des difficultés à surmonter. Le volet de la créativité est perçu de manière équilibrée, tantôt comme un intérêt ou tantôt comme une difficulté à prendre en considération.

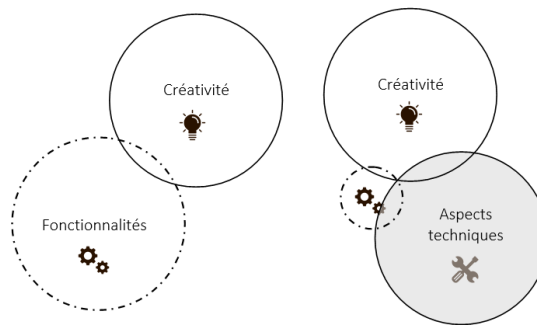


Figure 39. Comparaison des intérêts (à gauche) et difficultés (à droite) perçus en début de formation

Après avoir développé les attraits et difficultés perçus de l'appréhension d'outils de modélisation paramétrique, les participants ont émis quelques pistes de solution pour favoriser l'usage de ce type d'outils. « *Démontrer l'efficacité* » de l'outil et le « *tester sur un cas réel* » sont deux premières hypothèses. Ensuite une « *présentation pour débloquer les a priori* » ou, plus en amont, « *une formation pendant les études* » sont proposées par les participants. Sans avoir eu recours à la formation, les participants sont très enthousiastes à l'idée de s'essayer à l'usage de ces logiciels, par exemple par l'intermédiaire d'un stagiaire qui en aurait la maîtrise (seul un participant ne désirerait pas y avoir recours).

A l'issue d'une journée d'immersion dans l'usage d'outils paramétriques, il a été demandé aux participants de décrire en 3 termes le plug-in Grasshopper®. Les dénominateurs les plus fréquents sont classés selon les trois attributs (créativité, fonctionnalités, aspects techniques) au sein de la figure 40.

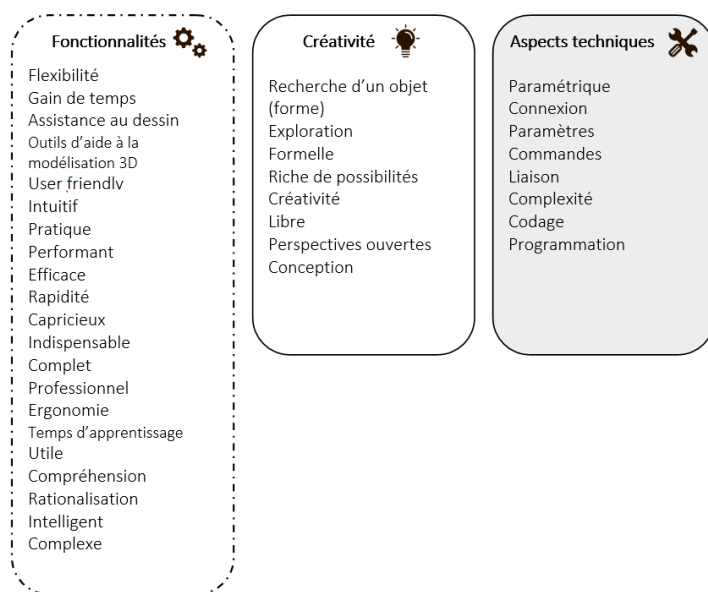


Figure 40. Termes et récurrences définissant le ressenti des participants pour le logiciel Grasshopper® après une journée de formation

Comparons à présent ces dénominateurs avec les intérêts et difficultés explicités par les interrogés en fin de formation.

Premièrement, 26 participants sont d'accord avec le fait qu'une journée de formation leur a permis de mieux cibler les avantages et inconvénients de ce type de logiciel. Vingt-deux d'entre eux recommanderaient même une formation sur la paramétrie à leurs collègues, les autres ne recommanderaient pas la formation car il n'y a « *pas d'application directe et quotidienne dans leur secteur professionnel* ».

En regard du gain de temps évoqué dans les fonctionnalités positives de départ, un participant commente que c'est « *un outil supplémentaire*

permettant d'optimiser au mieux le temps de travail ». On retrouve également la notion de flexibilité dans les modifications permises « *pour explorer les possibilités* ». Cette « *flexibilité permet de faire un grand nombre de tests de façon efficace* » mais également d'effectuer des « *modifications a posteriori* ». Alliant le point de vue technique et la créativité, des commentaires stipulent que ce type d'outils « *permet de réaliser des formes complexes et qu'on trouve des difficultés pour les réaliser par les autres logiciels de modélisation* », « *ça leur [les architectes] libère le choix et permet leur réalisation* ». « *Cela donne une dimension supplémentaire point de vue conception et vitesse* » mais également « *pour apporter une assistance au développement* ». On peut donc voir qu'à l'issue de la journée de formation, la notion de créativité est toujours présente mais accompagnée de commentaires plus techniques, alliant créativité et faisabilité.

Concernant les difficultés ressenties en fin de séance, les architectes soulèvent à nouveau l'aspect technique évoqué en début de journée : « *la difficulté est que la programmation n'est pas à la portée de tous* ». Cela rejoint leur pressentiment de la nécessité d'une approche différente et peut-être d'une formation complémentaire. Par ailleurs, la notion de créativité est nuancée par le commentaire suivant : « *risque de copier-coller d'un projet à l'autre, différent d'une architecture contextualisée, réfléchie, qui répond aux besoins spécifiques de chaque projet* ». On ressent également que la notion de créativité est perçue comme potentiellement aliénée par la fonctionnalité, notamment au travers de ce commentaire : « *la recherche formelle doit découler d'un processus de réflexion, d'un contexte, de contraintes... pas d'outils. L'outil doit rester à sa place d'aide à la modélisation, à la rationalisation mais ne pas prendre le pas sur la conception.* »

Comme l'illustre schématiquement la figure 41, à l'issue de cette formation, les participants perçoivent et défendent toujours l'approche créative procurée par la modélisation paramétrique, vue comme un atout. Les aspects techniques sont discutés aussi bien comme un intérêt que comme une difficulté du logiciel pratiqué. Les fonctionnalités sont quant à elles peu évoquées et uniquement plutôt de manière attrayante.

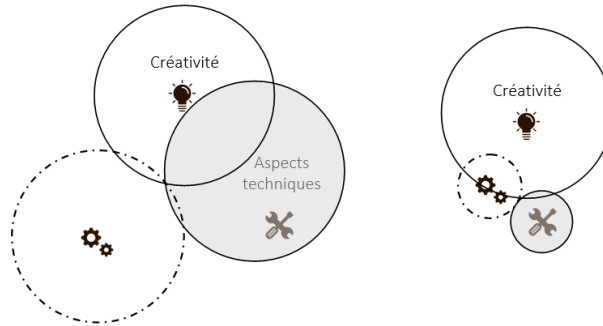


Figure 41. Comparaison des intérêts (à gauche) et difficultés (à droite) perçus en fin de formation

Au-delà de l'examen des intérêts et difficultés des logiciels paramétriques, les architectes présents ont été questionnés quant à la pertinence de l'application de la modélisation paramétrique dans de petits bureaux d'architecture.

Au premier abord, les architectes sont partagés. Certains évoquent l'usage de ces outils pour modéliser des « *projets complexes* », de « *grands projets* » comme des « *bâtiments publics* ». D'autres les envisagent plutôt pour des « *objets de design* » ou des « *éléments du second œuvre* » comme un « *bardage, des garde-corps* ». Au-delà de cette notion d'échelle, leur application est également controversée. Certains interrogés estiment qu'ils sont pertinents pour des « *éléments variables* » tandis que d'autres les imaginent pour des « *séries* », des « *auditoires* », des « *éléments de répétition* ». Ce type de logiciels serait, selon ces participants, davantage utile pour les « *éléments en série* ».

Enfin, des questions ont été posées quant à la pertinence de l'usage de tels outils dans de petits bureaux d'architecture. Certains soulignent le fait que l'usage de ces logiciels est pertinent pour des « *questions d'expérimentation* », « *ceux qui sont à la recherche d'une conception assistée par logiciel mais pour des petits bureaux cela est rare* » ou encore pour des « *projets dont certaines contraintes sont inconnues* ». En début de formation, la pertinence et les applications des logiciels sont envisagées en majorité sous l'angle de la créativité.

A l'issue d'une journée de formation, 26 architectes sur les 30 considèrent les outils paramétriques comme pertinents dans des bureaux d'architecture de

moins de dix personnes. Ils sont également dix-huit à l'envisager dans la pratique quotidienne de leur métier. Cependant, les interrogés entendent toujours plus de pertinence pour les grands projets. Seuls cinq participants estiment qu'il y a un intérêt pour des projets de plus petite échelle.

On retrouve notamment des réflexions se référant à la complexité de l'ouvrage. Un participant argumente : « *certains projets plus traditionnels n'ont pas d'utilité à travailler avec ces logiciels* ». Les logiciels sont pertinents pour tout le projet « *si celui-ci est complexe* ». Ils le sont également uniquement dans certains éléments du projet « *si cela concerne des éléments complexes (garde-corps)* ». L'échelle du projet semble avoir moins d'importance en comparaison de sa technicité. La créativité est également impactée : « *ça peut servir des bureaux axés sur la recherche formelle complexe comme des tours où la plus-value esthétique est réelle* », « *les projets dont les contraintes ou volontés initiales risquent de changer et sont facilement paramétrables* ». La pertinence de l'usage de ces outils paramétriques reste donc un aspect ouvert à débat.

Pour conclure, cette étude a été mise en place dans le cadre d'une formation continue sur le processus BIM. Dès lors, les participants présents à ces quatre journées de formation sont *a priori* des acteurs présentant un intérêt pour l'intégration du numérique dans le processus de projet. Bien que nous ayons pu interroger leur niveau de connaissance concernant la modélisation paramétrique, leur ouverture au numérique de manière générale influence leur réaction face à la prise en main de nouveaux outils et, dans ce cas d'étude spécifique, leur réaction face à la modélisation paramétrique.

A l'issue de cette analyse comparative des intérêts et difficultés avant/après la journée de formation, nous constatons que les avis quant aux trois attributs sont davantage tranchés en début de journée et plus nuancés en fin de journée, un propos faisant alors plus souvent appel à deux attributs dans l'argumentaire. Ce chevauchement est visible sur la figure 42 ci-dessous via l'intersection des attributs « *créativité-aspects techniques* » et « *créativité-fonctionnalités* ».

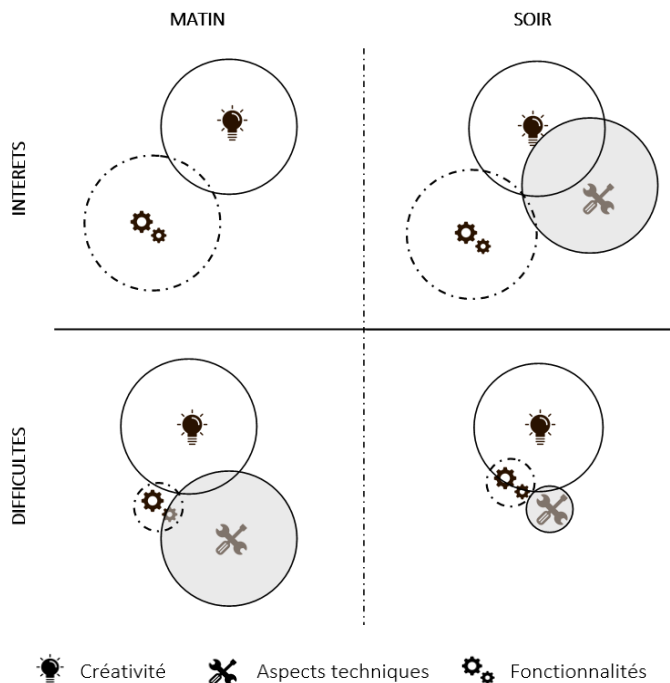


Figure 42. Evolution de la représentativité des attributs pour les intérêts et difficultés avant/après une journée de formation

L'aspect fonctionnel est un attribut largement évoqué en début de journée comme un atout des logiciels paramétriques. Il apparaît également de manière prépondérante dans les dénominateurs choisis par les participants pour décrire le logiciel utilisé et de manière positive dans les réflexions finales des participants. Les participants s'y réfèrent de manière similaire au long de la journée : beaucoup discuté comme positif en début et fin de formation, peu discuté comme difficulté en début et fin de formation. Contrairement à cela, l'aspect technique, qui semblait être entièrement une contrainte au premier abord, s'atténue largement dans ses aspects négatifs et est finalement décrit d'un point de vue plus positif en fin de journée.

L'attribut de la créativité est quant à lui largement discuté tout au long de la journée, aussi bien de manière positive que négative. En effet, les craintes pressenties en début de formation sont toujours discutées mais colorées du point de vue des fonctionnalités. Par ailleurs, la créativité est toujours autant discutée de manière positive et ce, en regard de la constructibilité des éléments

notamment. En effet, d'une manière globale, la technicité informatique de la modélisation paramétrique a fortement impacté la perception sur la créativité une fois les logiciels pris en main.

Par ailleurs, revenant sur les trois caractéristiques du processus de conception paramétrique énoncées par Woodbury (2010), les participants considèrent la première caractéristique, c'est-à-dire la définition des relations logiques pour la création du modèle 3D, comme un frein technique car la « *programmation n'est pas à la portée de tous* ». Les modifications permanentes et les alternatives de conception développables à n'importe quelle étape sont par contre des atouts perçus par les participants. En effet, la diversité de variantes testables grâce à la flexibilité du logiciel est ressentie positivement par les participants en début de séance et se maintient telle quelle à l'issue de la formation.

Nous pouvons également conclure qu'une journée d'immersion dans la pratique d'outils de modélisation paramétrique en conception architecturale ne permet pas d'établir de manière tranchée des typologies de projets spécifiquement adéquates, ni d'établir si une diversité morphologique est réellement favorisée par l'usage de ces outils. Cependant, la prise en main des outils semble avoir été considérée de manière positive. Les participants font dès lors des liens entre possibilités créatives et potentialités techniques et sont majoritairement favorables à l'idée de s'essayer à l'usage de ces logiciels, en particulier par l'intermédiaire d'un stagiaire qui en aurait la maîtrise. Au terme de cette journée d'immersion, il subsiste donc davantage le sentiment d'une complexité cognitive plutôt qu'une complète non-adéquation en regard de la pratique architecturale des petits bureaux d'architecture. De manière générale, les participants relèvent la nécessité de continuer à élargir le champ de la culture numérique des architectes pour instruire les nouvelles technologies et leurs applications concrètes notamment au sein des PME.

4. Diversité des pratiques paramétriques

Au vu du faible développement de la pratique paramétrique dans les petits bureaux d'architecture (pour rappel, nous avons vu que seuls 22 répondants annoncent utiliser des outils de modélisation paramétrique parmi les 700 répondants au questionnaire en ligne), l'étendue des terrains accessibles est restreint. Nous déployons ainsi deux méthodes afin de saisir une partie de la diversité des pratiques paramétriques dans les PME (table 9). Lorsque les projets en cours ne permettent pas une observation *in situ*, nous analysons les pratiques d'agences au travers d'entretiens rétrospectifs. Nous avons par ailleurs observé deux bureaux d'architecture développant différents projets à l'aide d'outils de modélisation paramétrique.

Comme expliqué dans la section méthodologique 5.3, les entretiens rétrospectifs ainsi que les observations *in situ* ne sont pas rendus anonymes pour la description des contextes professionnels sollicités. En effet, le lien entre le propos de l'interlocuteur et la contextualisation de celui-ci dans son environnement de travail et par rapport aux projets étudiés apporte une dimension intéressante pour l'analyse. Chacun des interlocuteurs a donné son accord en ce sens.

Table 9. Synthèse des cas d'étude présentés dans la thèse

Méthode	Référence	Acteurs	Données disponibles	Modeleur paramétrique utilisé	Annexes
Entretien rétrospectif	R1	John Schrayen de SUBSTRA	Discours de l'architecte + enregistrement vidéo	Grasshopper	13
	R2	Theo Sarantoglou Lalis de LASSA	Discours de l'architecte + photos	Grasshopper	14
	R3	Vincent Martin de Bolutions	Discours de l'architecte	Dynamo	15
	A_C, A_L, A_X	Antoine Maes de A2M	Discours de l'architecte + enregistrements vidéos	Grasshopper	20, 21
Observation in situ	D	Atelier d'architecture Daniel Delgoffe	Récapitulatif des entretiens	Grasshopper	16
	A_FH, A_M	Antoine Maes de A2M complété par un entretien avec le fondateur	Enregistrements vidéos + discours de l'architecte + entretien avec le fondateur	Grasshopper	18, 19, 26

Les cas d'étude construisant cette phase de la recherche ne sont pas sélectionnés pour être typiques ou représentatifs d'une pratique. Les données disponibles étant relatives à une diversité des pratiques, les analyses n'ont pas toutes mené au même degré d'approfondissement. Dans tous les cas, notre objectif n'est pas de définir comment les architectes devraient à tout prix intégrer les outils de modélisation paramétrique. Nous tentons plutôt d'explorer la diversité des enjeux de chaque pratique questionnée et d'enrichir notre compréhension de celles-ci. L'objectif de cette phase de recherche est d'initier une réflexion appropriée sur les pratiques paramétriques réelles dans les bureaux d'architecture de petite taille.

4.1. Description des contextes professionnels sollicités

Afin de pouvoir tisser des relations entre les mécanismes cognitifs et organisationnels et l'utilisation du paramétrique de chaque cas d'étude, nous décrivons d'abord la structure organisationnelle des bureaux en nous référant à la théorie des organisations décrite au chapitre 2 section 3. Pour rappel, nous avons détaillé deux divisions du travail ainsi que les mécanismes de coordination pour décrire une organisation, menant à des configurations types d'organisation. La division horizontale forte ou faible correspond au nombre de tâches effectuées par un opérateur. Respectivement la division est forte lorsque l'opérateur est spécialisé tandis qu'elle est faible lorsque le nombre de tâches est élevé et l'opérateur polyvalent. La division verticale caractérise la séparation entre la phase de conception et d'exécution du travail. Elle est dite forte lorsque ces deux phases sont tout à fait distinctes tandis que la division est faible lorsque l'opérateur a en charge les deux phases. La troisième variable pour décrire la structure organisationnelle d'un bureau correspond aux mécanismes de coordination. Ceux-ci correspondent aux moyens et mécanismes mis en œuvre pour coordonner les tâches entre les opérateurs. Deux mécanismes en particulier nous intéressent : l'ajustement mutuel qui correspond à des échanges informels entre les intervenants et la supervision directe qui désigne la hiérarchie entre une personne supervisant le travail d'une ou plusieurs autres.

Décrivant ces trois modalités pour caractériser chaque bureau au sein duquel évoluent les architectes interrogés ou observés, nous leur attribuons une des quatre typologies de configuration décrites plus haut (section 3.2 chapitre 2) : adhocratique, entrepreneuriale, professionnelle, hiérarchisée.

Nous commençons par une description brève de l'historique du bureau, le nombre de collaborateurs et les grandes lignes de leur méthodologie de travail. Nous analysons ensuite l'organisation interne du bureau selon les divisions horizontale et verticale ainsi que les mécanismes de communication mis en place. Nous abordons enfin le positionnement du paramétrique dans l'agence en regard de l'expertise des collaborateurs et décrivons succinctement la pratique existante. Nous terminons le descriptif par un résumé des projets et thématiques que nous avons analysés et concluons par les observations majeures que nous en retirons. Nous développons finalement l'analyse

proprement dite des processus observés à l'aune de la notion de représentation (section 4.2) et de recherche formelle (section 4.3).

Concernant les entretiens rétrospectifs sur des projets paramétriques, ceux-ci ont été mis en place afin de compléter les résultats obtenus par l'enquête quantitative. Ils viennent également enrichir les entretiens téléphoniques effectués en permettant d'interroger une pratique paramétrique existante dans de petits bureaux d'architecture. Les données recueillies en entretien apportent des éléments circonstanciés ancrant l'usage du paramétrique dans une réalité évoquée par les personnes interrogées. Les entretiens rétrospectifs ont ainsi permis de saisir le fonctionnement d'une pratique paramétrique non-observable dans le délai imparti de la recherche. Ces échanges se sont révélés d'une grande richesse et ont permis de comprendre certains usages de la modélisation paramétrique dans des petits bureaux d'architecture. Les trois entretiens sont entièrement retranscrits aux annexes 13 à 15 de ce travail.

Parallèlement aux entretiens rétrospectifs, l'observation *in situ* au sein d'une équipe impliquée dans des projets architecturaux en cours nous permet de recueillir des éléments de contexte d'une pratique réelle et observée. L'objectif est d'observer et d'analyser quels sont les processus cognitifs et organisationnels mis en cause lors de l'utilisation d'outils de modélisation paramétrique dans un bureau d'architecture belge de petite taille.

Les cas d'observation ont été retenus en raison de leur pertinence pour comprendre la diversité d'appropriation de la modélisation paramétrique dans différents bureaux, mais également au sein d'un même bureau. Ils font état :

- d'usage externe de la modélisation paramétrique : c'est le cas du bureau AADD pour la sous-traitance de la modélisation des façades d'un hall omnisport ;
- d'usage de la modélisation paramétrique par un expert détaché de la conception architecturale : c'est le cas pour le projet de la façade Bara [A_FH] et du projet Marcellis [A_M] ;
- d'usage de la modélisation paramétrique en interne pour soutenir la conception architecturale : c'est le cas de la conception du projet immobilier à Cadzand [A_C] ainsi que les projets A_L de pare-soleil et A_X pour le développement d'un plan masse.

Les descriptions des projets produites ci-après assurent deux fonctions majeures qui se recoupent en partie : une fonction illustrative, c'est-à-dire relater les tâches observées, transmettre les ambiances, rendre sensible une action, dépeindre les profils des observés pour mettre en relation le lecteur avec le chercheur, et une fonction exemplificatoire qui permet la contextualisation d'un phénomène plus général au travers d'exemples issus du terrain et dès lors accessibles via leur description (de Sardan, 2008).

Nous entamons les descriptions des pratiques des bureaux SUBSTRA, LASSA et Bsolutions interrogées au travers d'entretiens rétrospectifs. Ensuite nous abordons le processus réflexif mené par l'atelier AADD avant de nous pencher pleinement sur différents projets menés par le bureau A2M et qui constituent le cœur même de notre phase d'observation.

4.1.1. Bureau SUBSTRA

Le bureau : le bureau SUBSTRA s'est constitué en 2015. Il a été fondé par trois ingénieurs architectes qui collaborent avec une stagiaire. Les logiciels de référence de ce bureau sont Vectorworks© pour le dessin en 2D et Sketchup© pour la modélisation 3D.

L'organisation interne : la division horizontale du travail est faible, c'est-à-dire que les collaborateurs travaillent sur l'ensemble des tâches pour faire aboutir un projet. La répartition peut se faire un peu différemment lorsque l'approche numérique est plus présente, auquel cas John Schrayen « *[s]'y colle vu que je suis le plus jeune et le plus au fait de ces choses-là.* » [R1-59] ou lorsque les projets sont de plus grande envergure « *on a pu se permettre le luxe de concevoir à 3 mains à chaque fois et puis après y en a un qui gère le, le projet du début à la fin.* » [R1-65]. Dans tous les cas, le client ne traite qu'avec un seul des architectes. La division verticale du travail est également faible, chaque collaborateur gérant l'ensemble du processus. La configuration de ce bureau peut être qualifiée d'adhocratique.

Le positionnement de la pratique paramétrique : aucune vision en interne n'a été définie quant à la nécessité de former les collaborateurs à ce type de modélisation. L'ingénieur architecte interrogé, John Schrayen, est donc le seul collaborateur à maîtriser un logiciel de modélisation paramétrique, soit le plug-

in Grasshopper. Il accumule deux ans d'expérience avec cet outil et il estime sa fréquence d'utilisation à deux ou trois fois par an. Il indique maîtriser le logiciel dans une certaine mesure car « *pour des objectifs ciblés, faut dire que j'arrive toujours à mes fins jusqu'à présent.* » [R1-89]. Les fonctions de base du logiciel lui apparaissent comme relativement bien définies et « *assez facile de pouvoir les maîtriser* » [R1-97]. Malgré tout, il se sent parfois limité en termes de connaissances et par l'utilisation du logiciel, notamment pour tout ce qui est des plug-in de Grasshopper comme Kangaroo ou Ladybug. Il mentionne que « *au niveau de la formation et des disponibles en ligne, je veux dire il y a toujours des fonctions où il n'y a jamais personne qui les a utilisées et tu sais pas quels sont les input, les output, tu comprends pas pourquoi ça marche pas et y a quand même pour moi un manque de ressources* » [R1-93] qui entraîne que « *pour les lancer, enfin tu perds vite du temps.* » [R1-99]. L'architecte estime que 25% des projets du bureau (sur les 8 projets en cours ou achevés) ont été envisagés en partie via une modélisation paramétrique et ce, davantage pour « *représenter un élément ou pour faire-. On n'a pas vraiment fait de recherche formelle sur un projet avec l'outil paramétrique donc la question ne se pose pas dès le départ. Elle se pose plutôt en cours de route. Pour l'instant en tout cas.* » [R1-109]. En effet, l'usage de ces outils lui apparaît davantage comme un support à la représentation et non à la conception, bien que les deux soient intimement liés : « *Maintenant y a une différence sur ce-, et c'est peut-être sur ça que l'entretien va être articulé en tout cas pour les projets qui nous concernent, autant le mot paramétrique je le, je suis totalement d'accord, autant conception, c'est peut-être à discuter quoi. [...] Parce que les exemples que je vais te montrer c'est, c'était plus dans une démarche de représentation qu'on a utilisé l'outil paramétrique. [...] La conception elle a déjà été faite, en tout cas les bases de la conception ayant déjà été faites en amont. Heu c'est vrai que maintenant heu de représentation on a rebasculé sur de la conception parce que, enfin- [...] Après on est partis dans une autre direction mais je dirais, l'objet de base permettait de faire varier les paramètres et donc finalement de retourner à la conception. [...] Même si à la base c'était juste de la représentation.* » [R1-34,42].

La description des projets présentés : nous avons abordé deux projets de rénovation. Le premier projet que nous avons retracé est l'extension d'une caserne de pompier et le second est un escalier extérieur d'un projet mixte bureau professionnel/maison unifamiliale. Les autres projets de l'agence n'ont

pas fait l'objet d'une modélisation paramétrique car « *il n'y avait pas de recherche formelle qui nécessitait d'utiliser les outils je vais dire non conventionnels ou je vais dire il n'y avait pas de niveau complexe heu qui nécessitait d'utiliser autre chose que les outils traditionnels.* » [R1-472].

Dans le premier cas, les architectes ont décroché un marché public en 2017 pour une extension comprenant deux salles de cours. La forme en question est relativement simple, c'est une toiture trapézoïdale à double pan dont la faîtière est située en diagonale plutôt que sur un axe médian par rapport aux murs longitudinaux (figure 43). Cette forme est liée d'une part à la reprise de rive dont les hauteurs sont contraintes par le contexte, d'autre part à la volonté de générer un volume le plus généreux possible afin de gagner en luminosité et une certaine cohérence graphique. L'intérêt pour une modélisation paramétrique vient du fait que le concepteur a voulu faciliter les changements : « *Le nombre de pièces de bois que j'avais, le volume de matière mis en œuvre, heu, ce que ça impliquait au niveau des rives etc. donc heu ce qui en Sketchup était quand même beaucoup plus compliqué à avoir ou en tout cas dans la répétition de l'opération, le nombre d'itérations à faire. C'était pas gérable quoi.* » [R1-181] et en effet, « *Que ça pouvait être intéressant d'avoir heu un petit modèle qui évoluait facilement pour pouvoir se rendre compte. Parce que heu on se posait beaucoup de questions, des questions qui étaient aussi posées ou on se doutait qu'elles allaient être posées par le maître d'ouvrage, ha ben oui ça va coûter plus de bois de faire une toiture comme ça comparé à une toiture plate etc. donc y a toute une série d'éléments qu'on voulait optimiser pour avoir les réponses et pour aussi simplement savoir quoi* » [R1-185]. Le client a ensuite imposé que la toiture soit plate et plane diminuant le besoin de flexibilité du modèle. Il pouvait alors être géré sur un autre logiciel plus adapté aux attentes des architectes. Cette modification notable de la part du client a donc fait périlcliter le projet et abandonner la modélisation paramétrique en cours. Dans ce cas d'étude, l'utilisation du paramétrique n'a engendré aucune modification du flux de travail traditionnel : « *Non parce que ici moi je l'ai fait heu, en dehors du flux, du flux de travail [...] Du projet quoi. Donc heu je vais dire, les autres, je l'aurais pas fait, ils ne s'en seraient pas spécialement aperçus [...] Ça n'a perturbé en rien ni nos deadlines ni notre travail. Moi, moi c'était vraiment un plus ici parce j'étais bah, je suis dedans. J'étais curieux d'utiliser l'outil pour voir si on ne savait pas avoir une application qui aurait pu nous faire gagner du temps par la suite.* » [R1-280 à 284]

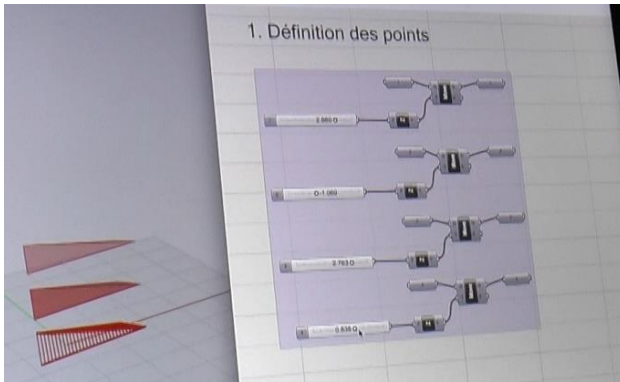


Figure 43. De haut en bas : maquette physique du projet d'extension d'une caserne de pompiers par le bureau SUBSTRA ; modélisation paramétrique de la toiture

Le projet de l'escalier est un projet de rénovation dont la partie modélisée en paramétrique est minime. Malgré tout, celle-ci révèle la pertinence d'intervenir sur un élément en particulier pour faire aboutir les idées initiales des architectes. L'objectif de l'architecte est ici de formaliser un garde-corps pour un escalier extérieur. Celui-ci a fait l'objet de premières esquisses pour que l'architecte mette ses idées en place. Il désire ensuite le modéliser afin d'en maîtriser la forme exacte. Dans ce cas-ci, l'escalier était difficilement modélisable via Sketchup, logiciel de référence du bureau pour la réalisation de modélisation 3D de par la courbure qui était désirée. Ainsi, l'utilisation du paramétrique intervient, dans ce projet, « *en recherche plastique et formelle, ben cette surface-là à gauche qui tourne et qui monte à l'extérieur a été un petit peu compliquée à chercher que ce soit plastiquement avec une maquette physique ou avec une maquette Sketchup* » [R1-360]. L'outil est donc majoritairement utilisé en tant que support de représentation numérique à partir de croquis réalisés à la main (figure 44).

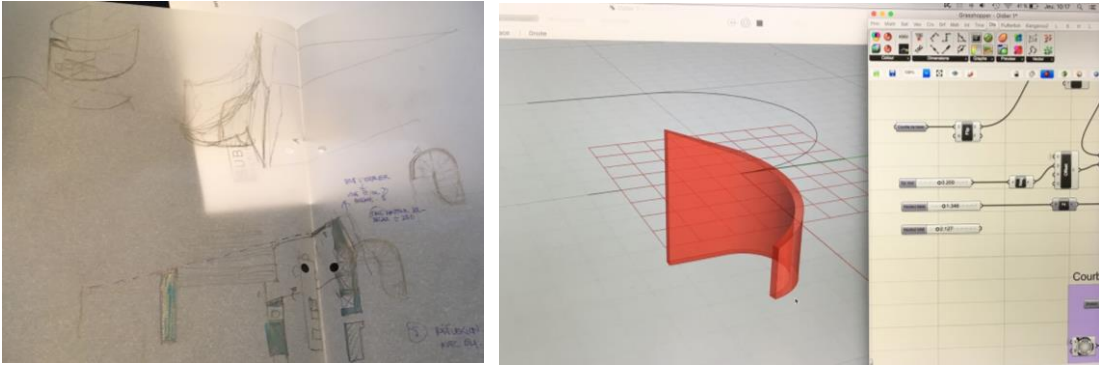


Figure 44. Modélisation paramétrique d'un escalier à partir de croquis - bureau SUBSTRA

Observations majeures :

La modélisation paramétrique comme outil de représentation : dans la pratique paramétrique pratiquée dans ce bureau, la modélisation paramétrique n'a pas sa place dans les premiers instants de conception. Elle intervient une fois que les grandes lignes du projet sont définies et que celles-ci peuvent être traduites en paramètres. L'outil intervient alors pour représenter ces premières idées et entamer un processus itératif réflexif pour faire évoluer le projet. Il devient de ce fait un outil d'assistance à la conception après être passé par une phase de représentation.

L'ascendance du contexte : la modélisation paramétrique n'a pas sa raison d'être en toute circonstance. Une modélisation, bien qu'entamée, reste énergivore. L'architecte veille donc à la pertinence de poursuivre une telle modélisation en fonction des modifications qui sont apportées et imposées au projet au cours de son évolution.

4.1.2. Bureau LASSA

Le bureau : l'agence LASSA a été fondée par deux architectes en 2009 et est composée de six collaborateurs au total. Les deux fondateurs enseignent dans le même temps dans une école d'architecture. Les logiciels utilisés dans cette agence sont Rhinoceros© et son plug-in Grasshopper et la suite Adobe. Aucun logiciel métier n'est utilisé. Cependant, la posture de ce bureau par rapport aux outils est claire : *« On n'est pas, on n'a pas d'orthodoxie par rapport à un outil. [R2-198] donc en fait une chose aussi chez nous, on s'adapte. Donc par exemple, on faisait sur Vassari avant mais maintenant c'est un plug-in de Rhino. [...] Donc nous on s'adapte, on n'a pas de [...] D'allégeance à un software mais ce qui est pas mal avec Rhino, c'est qu'il y a plein de choses qui se rajoutent et d'autres qui disparaissent aussi »* [R2-132,136].

L'organisation interne : la répartition du travail entre les deux associés est équivalente. Chacun d'entre eux gère environ quatre projets en même temps. La gestion consiste à répartir le travail aux collaborateurs, vérifier ce travail, facturer, etc. La conception de chaque projet est par ailleurs effectuée par les deux associés en même temps. On peut ainsi dire que la division horizontale du travail est faible puisque les profils sont polyvalents. Par ailleurs, la division verticale est faible pour les deux associés qui participent à la fois aux tâches de conception et d'exécution, mais elle est forte vis-à-vis des autres collaborateurs qui, via la supervision directe, sont davantage dans l'exécution des tâches qui leur sont affectées que dans la conception. La configuration de ce bureau est caractérisée d'entrepreneuriale.

Le positionnement de la pratique paramétrique : une des conditions pour être engagé au vu du fonctionnement de l'agence est la maîtrise de Rhinoceros©. Cela en fait une compétence élémentaire qui n'impacte pas spécifiquement la division du travail entre les collaborateurs, tous sur le même pied d'égalité. Le co-fondateur du bureau, Theo, utilise Rhinoceros© depuis sa création en 2000. Ce choix est lié au fait que *« Rhino il est pas entièrement paramétrique mais nous on utilise Rhino parce qu'il peut produire des fichiers de production. C'est le file to production qui nous intéressait et heu: donc la capacité à produire et à visualiser en fait en même temps. Et la capacité de dessiner nos propres outils. Par rapport aux demandes du projet. Voilà, alors ça en fait on déteste, il n'y a pas de bibliothèque dans le bureau parce qu'on dessine des systèmes constructifs. (0.3) Parce que par exemple, tous les projets,*

enfin Revit est paramétrique, mais y a une bibliothèque dedans. Tout ce que tu produis, c'est prémédité quelque part. Donc, y a moyen de customiser dans une certaine mesure mais c'est la limite du catalogue qui est la limite de ta créativité. Et c'est très heu: pour des formes non standard, c'est assez contraignant. » [R2-38 à 44]. Concernant Grasshopper, « *tout le monde sait à peu près l'utiliser mais par exemple, si on doit faire un script aussi compliqué que pour la maison Ypsilon, ben y en a un qui est meilleur et qui va passer plus de temps.* » [R2-204]. Le recours ou non à une modélisation paramétrique ne fait pas l'objet d'une discussion en tant que telle avec le client. C'est l'architecte lui-même qui décide de la pertinence d'y recourir. Cependant, l'intégration de données et les analyses qui en sont faites sont présentées au client sous d'autres formes - diagrammes, graphiques par exemple - mais l'utilisation d'une typologie spécifique de modélisation n'est pas abordée car le client averti pourrait avoir tendance à demander davantage de paramètres : « *Normalement heu: pour faire une étude d'ensoleillement, et bien ça fait pas partie d'un service de base de 90% des architectes, donc nous on le fait mais on veut pas non plus, on le fait parce qu'on sait que c'est important pour le budget, pour l'apparence du projet et tout ça, donc heu: mais après on veut pas se retrouver – ceci dit, c'est possible de, de proposer des variantes très facilement* » [R2-150]. L'architecte interrogé reste ouvert à cette proposition et notamment « *même d'utiliser du VR maintenant donc ça on fait pas mal à l'unif. On essaie de voir si on peut pas dessiner dans cet environnement-là.* » [R2-152]. La pratique paramétrique de ce bureau souligne le degré d'efficacité pouvant être atteint, même par une structure de petite taille, lors d'une maîtrise experte du paramétrique.

La description des projets présentés : le premier projet décrit est une tour en Chine comprenant un programme mixte de surfaces commerciales, bureaux, logements (figure 45). La modélisation a été réalisée sur Rhinoceros© et Grasshopper. L'esquisse de la volumétrie du projet a été entamée par des études solaires. La nécessité de procéder à ces études dès les premiers instants découle du fait qu'en Chine, une norme interdit de projeter une ombre sur les parcelles limitrophes pendant plus de quatre heures par jour. Ces premières études ont donc permis de travailler sur la volumétrie de l'enveloppe maximale autorisée. Il a ensuite été question de doter les façades de brise-soleils. Pour ce faire, une des contraintes était le budget disponible, défini comme contrainte dans la définition Grasshopper, l'autre était une étude réalisée sur un autre

logiciel leur fournissant la valeur optimale d'écartement entre deux brise-soleils. La modélisation paramétrique a ainsi permis de générer différentes variantes d'écartement et de trouver un compromis entre budget et confort thermique. Ils ont ensuite passé une semaine à mettre en œuvre des scripts leur permettant d'automatiser le transfert des données sur le logiciel Revit© et de produire les mises en page des plans. Au vu du nombre de collaborateurs et de la taille du projet, ce travail préalable leur permettait d'être réactifs et ainsi de mettre à jour tous les plans en moins d'une semaine si le budget ou la structure étaient modifiés par exemple. : « *Et on a fait ça avec 3 personnes en plus. Moi, j'ai fait pas mal de tours à New-York parce que j'étais directeur chez Asymptote, et on était une dizaine, on était entre 10 et 15 personnes pour ce genre de projet, normalement. Et on l'a fait à 3.* » [R2-86].

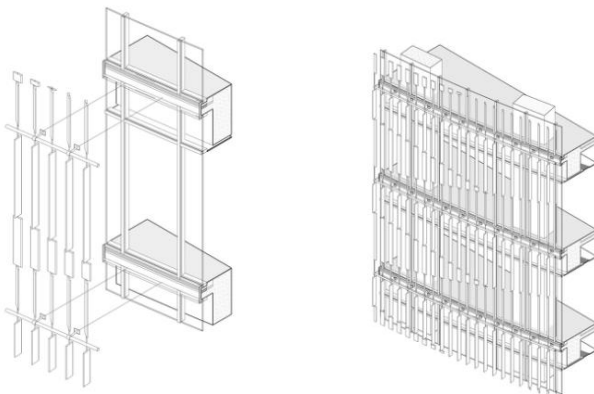


Figure 45. De haut en bas : image de synthèse de Weizhi headquarters, China ; modélisation des brise-soleils

Le deuxième projet présenté par l'architecte est une maison unifamiliale en Grèce, la maison Ypsilon. Le coffrage est paramétrique tandis que la géométrie du bâtiment ne l'est pas (figure 46). Différentes ambitions ont été intégrées et ont induit la forme de la toiture : « *en fait ce qui nous intéresse plus que le paramétrique, c'est l'idée d'intégration.* » [R2-214] qui leur a permis de construire cette maison pour un montant 3 à 4 fois inférieur que par un processus traditionnel. Tout d'abord, il y a une volonté de cadrer les vues par chacune des lignes directrices définissant l'axe des voûtes. Ensuite, les architectes ont opté pour un compromis entre une bonne intégration avec la topographie, la hauteur sous plafond à l'intérieur et le fait de pouvoir marcher convenablement sur la toiture. Les longueurs des auvents ont ensuite été optimisées en fonction de l'ensoleillement. Le paramétrique est intervenu pour modéliser la structure et sous-structure de la toiture. Cette modélisation a permis d'intégrer les contraintes fournies par l'ingénieur et, par ailleurs, d'optimiser les chutes des panneaux en bois en anticipant les emboîtements des panneaux. Par ce processus, ils ont également pu intégrer différents éléments et combiner sous-structure, acoustique et esthétique (figure 49) : « *si on avait découpé des arcs dans la longueur, on aurait un joint à 2.40. On aurait, une ligne droite, ça aurait été laid en plus. En courbant j'ai des panneaux de 2.40 ici, et là j'ai des panneaux de 80 [...] Et donc j'ai moins de chutes. C'est pour ça que j'ai fait les courbes. Après, j'ai donné du sens à ces courbes, donc elles suivent les lignes de flow, enfin de circulation et tout ça mais à la base, la courbure du joint c'est pour économiser du matériau. Et ça on l'a mis, on l'a intégré dans le script.* » [R2-224,226].

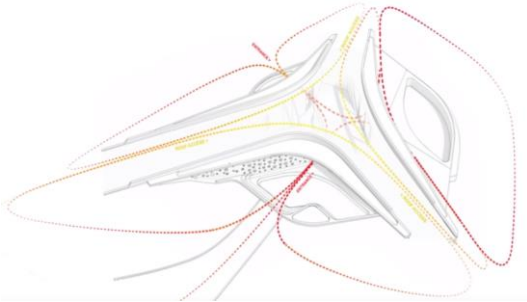


Figure 46. De haut en bas :
maison Ypsilon ; chantier de la
structure paramétrique ;
lignes directrices du projet

Figure 47. Sous-structure de la
toiture servant de coffrage
perdu et dont la courbure
accompagne le tracé des flux
de circulation et régule
l'acoustique

Observations majeures :

Les données externes comme aide à l'esquisse : la posture de ces architectes pour débiter un projet est d'analyser le site via différents paramètres : « *On a tout le terrain en 3D avec un mapping de la végétation et on fait des études d'ensoleillement, des études de vent pour comprendre les paramètres environnementaux du projet.* » [R2-176]. Ces données sont assimilées afin de soutenir les premières esquisses et de définir les grandes lignes du projet : « *D'abord on a, on travaille sur le massing avec des études solaires [...] Parce que en Chine, il y a, c'est ce qui a déterminé la forme des courbes et tout ça, et les directrices du plan.* » [R2-62, 64].

Le croquis pour la mise en évidence de contraintes : le passage par des croquis permet aux architectes d'esquisser le projet et ainsi de définir des contraintes qui seront retranscrites sous forme de paramètres ou de contraintes lors de la génération de la définition algorithmique tel que l'architecte le décrit : « *On dessine beaucoup plus sur papier en fait depuis qu'on, qu'on est, fait beaucoup de croquis en amont et on sketche aussi sur des screenshots. Donc on dessine des choses parce ça met du temps de toujours, surtout parce que-, quand on travaille avec des surfaces courbes, heu: donc parfois on veut visualiser plus rapidement, on sketche dessus, on imprime et on fait une réunion, puis on sketche, puis ensuite si c'est approuvé [...] Ou si c'est bien on passe du temps à modéliser* » [R2-96, 98]. L'architecte insiste également sur la prise en considération de données liées au contexte avant même d'esquisser des ambitions morphologiques : « *On commence toujours par des choses très crues, très, ce sont des contraintes vraiment, puis à la fin on fait le design. Donc on modèle, on ajuste, on connecte ce qui doit être connecté, on déconnecte, on crée des continuités avec le terrain, au paysage, ou des discontinuités quand c'est nécessaire, on crée de l'intimité* » [R2-184]. Ainsi, le concepteur « *travaille de manière intuitive pour se créer des contraintes, donc au fur et à mesure qu'on modélise et qu'on avance dans l'esquisse, à un moment donné on sait quelles sont les contraintes du projet [...]* Et ensuite on remodélise avec plus de rigueur » [R2-108, 110]. Cette phase de croquis va s'étaler « *sur une période heu: la plus longue possible, ça dépend de la deadline mais si on a du temps, c'est quelque chose qu'on va laisser un peu mûrir* » [R2-174]. Ainsi, à l'issue de cette phase, la majeure partie des contraintes sont définies « *mais il se peut qu'il y ait des contraintes qui soient ajoutées mais si le programme ne*

change pas, en général ces contraintes sont gelées avec l'esquisse. Après il y a des contraintes supplémentaires liées au détail, de la panélisation mais c'est un autre niveau de de, c'est des choses qui s'ajoutent » [R2-112].

Prise en considération de la créativité : l'utilisation usuelle de logiciels métiers restreint la créativité aux bibliothèques d'objets proposées par chacun d'entre eux. Cette agence a choisi un logiciel leur octroyant une liberté de dessin importante [R2-42].

Les limites d'usage du paramétrique : bien que les concepteurs maîtrisent les principes de fonctionnement du paramétrique, son usage ne vaut pas en toutes circonstances car *« ça dépend. Grasshopper c'est un outil d'automatisation, de formfinding et ça correspond vraiment à un certain type de demande. On est aussi capable de prendre des décisions subjectives ou objectives par rapport à des contraintes et de les modéliser telles quelles »* [R2-196]. Chaque projet doit donc être considéré individuellement en regard de ses tenants et aboutissants et non en fonction de sa typologie : *« Mais par rapport au dessin de cette courbe, c'était pas paramétrique, parfois c'est pas nécessaire. »* [R2-238].

Le paramétrique pour démocratiser l'architecture et produire de la culture : le recours aux nouvelles technologies issues d'autres domaines que la construction a permis le déploiement de bâtiments d'exception. Le cofondateur s'intéresse à démocratiser ces technologies sur des projets de petite envergure (maison ou crèche par exemple) et considère que ces nouveaux outils de modélisation favorisent le développement d'une architecture de qualité dans des endroits qui n'y étaient pas véritablement destinés *a priori* : *« Parce que tu vois les projets, les projets sur lesquels j'ai travaillé, c'était 800 millions d'euros, [...] et les constructeurs c'était le top mondial. Là on construit des trucs nous-mêmes heu: C'est vraiment, on amène de l'architecture dans des endroits où, tu vois, le bled en Grèce là heu: Ce niveau existe pas même à Athènes. »* [R2-322]. Par l'interaction avec les technologies, les architectes ne produisent pas uniquement de nouveaux savoirs et compétences mais également une certaine forme de culture et de sensibilité architecturale.

La conception intégrée : l'utilisation des technologies et notamment du paramétrique leur permet d'intégrer de nombreux concepts au sein même de la conception architecturale et, par ailleurs, d'aller au-delà d'une standardisation

habituelle des éléments. Tandis qu'une étude d'ensembles est généralement réalisée en dehors de la mission de base d'un architecte, différentes notions sont à présent intégrées au cœur même de la conception architecturale afin que chaque élément réponde à plusieurs critères, permettant ainsi d'aboutir à une seule forme cohérente et non à une addition d'éléments répondant à des parties différentes du problème.

4.1.3. Bureau Bsolutions

Le bureau : Bsolutions est un bureau d'études multidisciplinaire composé d'une centaine de collaborateurs issus de différentes professions. En parallèle du service administratif, neuf sections se coordonnent au sein du bureau, à savoir l'architecture, le bureau de dessin, l'infrastructure, le project management, la coordination sécurité et santé, le développement durable – BREEAM, les techniques spéciales, la stabilité, l'industrie. Nous ne nous intéressons qu'à la section Architecture, seule section comprenant des architectes. Ces seize architectes travaillent en étroite collaboration avec les dessinateurs-modélisateurs au sein de la section bureau de dessin.

L'organisation interne : la division horizontale dans ce contexte de travail est forte. Les expertises sont réparties dans des sections différentes, un architecte ne faisant pas le travail d'un modélisateur par exemple. La répartition verticale du travail est plutôt faible dans le sens où, lorsque les objectifs sont définis, l'acteur spécialisé a une liberté importante pour les atteindre. La répartition du travail se fait sous le mode de la supervision directe. Ainsi, les trois associés supervisent l'ensemble de la société par l'intermédiaire des responsables de discipline. Il y a donc un responsable pour l'architecture. Celui-ci supervise des chargés de projet qui veillent à la bonne gestion financière des projets et supervisent les responsables de projet qui coordonnent 4 ou 5 projets d'architecture. Ces derniers vont finalement superviser des dessinateurs qui reçoivent un planning deux mois à l'avance leur indiquant les projets sur lesquels ils vont devoir travailler. Ce travail se fait alors de manière autonome au vu de leur spécificité. Cette répartition pyramidale et l'autonomie laissée aux modélisateurs fait progresser perpétuellement leur expertise. Au vu de ces éléments, l'organisation se rapproche d'une configuration professionnelle.

Le positionnement de la pratique paramétrique : le déploiement du paramétrique dans cette société n'a fait l'objet d'aucun protocole ou de formation des collaborateurs. En effet, l'architecte interrogé s'est formé au paramétrique au travers de ses expériences antérieures en travaillant sur des projets de grande envergure pour lesquelles l'automatisation de routines était nécessaire pour optimiser le temps de travail sur certaines tâches (ex. : renuméroter toutes les pièces du bâtiment). Il est à présent BIM manager au sein de Bsolutions. Au vu de son expérience, l'architecte a voulu transmettre ses connaissances en matière de paramétrique aux collaborateurs de Bsolutions sachant que le logiciel commun est Revit© et qu'il inclut Dynamo© (cfr. section 2.2 du chapitre 2 pour rappel). Il a donc développé avec un de ses collègues plusieurs routines qui semblaient pertinentes dans ce contexte de travail. Certaines ont à présent été adoptées (affichage d'étiquettes révélant des données implicites du modèle, récupération du Revit ID de chaque élément, localisation de chaque plafond et faux-plafond, génération de ferrailages automatique à partir de quelques paramètres à définir,...), et d'autres ont été laissées de côté (structuration automatique des métrés exportés, génération des chemins d'évacuation incendie,...) car les fonctionnalités ont généralement été intégrées à d'autres logiciels préalablement utilisés et jugés plus pertinents en regard de la pratique du bureau.

La description des projets présentés : la discussion n'a pas été centrée sur un projet en particulier mais sur un flux de travail qui s'est développé entre deux sections qui doivent collaborer pour aboutir à la représentation de l'artefact conçu, à savoir les architectes et les dessinateurs. Bien que la structure de l'entreprise soit différente des deux autres cas d'entretien rétrospectif étudiés, la pertinence de cet entretien provient de la richesse d'informations recueillies concernant la collaboration entre acteurs et les compétences nécessaires dans le cadre d'une modélisation paramétrique.

Les opérations paramétriques ont été majoritairement développées dans un objectif de gestion de données au travers de la mise en œuvre de routines, par exemple, pour automatiser la structuration des données d'un métré, pour renommer des éléments par exemple. Ces routines sont notamment issues du fait que *« c'est les limites du logiciel de dessin qui nécessitent de développer des routines pour pallier à la limite du logiciel. [...] Parce que si on pouvait dès dès le départ dans le logiciel voir les pièces sous forme de volumes, on aurait pas*

besoin de générer une routine paramétrique pour le faire. » [R3-364,366]. Les utilisateurs des routines implémentées, *«ils n'ont plus besoin d'y toucher, il suffit de la faire heu- Toutes les routines qu'on utilise sont opérationnelles* » [R3-114]. Ce processus dissocie totalement le concepteur de la routine de l'utilisateur. Cette segmentation des tâches revient à utiliser un logiciel aux fonctionnalités renforcées. Un des constats de l'interrogé à ce sujet est que *« dans le paramétrique, c'est quand des choses fonctionnent et sont utiles souvent elles se retrouvent en outil [...] Dans le développement des logiciels dans l'année ou dans les deux ans qui suivent. »* [R3-94, 96]. Dès lors, l'entreprise favorise le processus directement intégré aux logiciels métiers plutôt qu'une des routines qui avaient été mises en place, celles-ci étant alors, au fur et à mesure, abandonnées.

Le développement du paramétrique dans ce bureau pose question car *« historiquement le bureau a une vision où un chargé de projet n'est pas un dessinateur et un dessinateur n'est pas un chargé de projet. [...] Donc il y a une scission claire entre les modeleurs [...] qui font les projets sur Revit et les chargés de projet. »* [R3-202, 208] *« enfin le le paramétrique dans dans cette logique-là il va être utilisé surtout pour essayer d'optimiser le temps de travail des modélisateurs. »* [R3-210,211]. Cependant, les principaux utilisateurs de Revit et dès lors susceptibles d'utiliser Dynamo, ne semblent pas réceptifs à cette typologie d'outils *« parce que les dessinateurs n- (.) n'ont, dès qu'ils ouvrent Dynamo ils sont perdus, ils voient des fenêtres partout ils ne comprennent même pas ce qui se passe, voilà. [...] Ce que je peux comprendre mais ils n'ont pas l'intérêt, enfin ils ils ne voient pas l'intérêt et ne le cherchent pas et heu heu et ça c'est un peu dommage. »* [R3-416, 418]. Une hypothèse pour développer un processus intégrant le paramétrique serait que les modélisateurs soient des architectes de formation ayant les compétences nécessaires pour utiliser Dynamo. Par ailleurs, le mode de fonctionnement actuel entre les différents acteurs lui semble pertinent en regard des objectifs de développement concernant le BIM notamment, *« c'est juste que la mise en place et le développement [du paramétrique] il faut comprendre dans quel- il faut à un moment qu'il ait du temps heu et des compétences pour dire là il y a une opportunité d'optimisation, on va générer une routine, on la développe et on la retransmet. »* [R3-498]. Le paramétrique resterait dans ce cas une aide à l'optimisation des tâches pour limiter le temps de modélisation d'un projet.

Observations majeures :

La formation comme origine du développement des compétences : le manager discute des formations des collaborateurs mais aussi de la « culture d'entreprise » dont le fonctionnement en silo induit que les architectes et les dessinateurs ne sont pas amenés à collaborer sur l'utilisation d'outils plus adéquats et performants, comme étant une des sources probables de la non-pérennisation du paramétrique. Si la logique paramétrique et les compétences nécessaires pour parvenir à une certaine maîtrise semblent pouvoir être acquises par des ingénieurs, cela ne semble pas ou peu envisageable par des dessinateurs dont les centres d'intérêt sont autres.

Le paramétrique comme complément de logiciel métier : le paramétrique est avant tout utilisé pour accomplir des fonctionnalités qui ne sont pas intégrées au logiciel de référence de l'utilisateur. Une fois la fonctionnalité disponible dans la version du logiciel, le recours au paramétrique est abandonné.

4.1.4. Atelier AADD

Le bureau : le responsable d'atelier, Daniel Delgoffe, s'est entouré de quatre collaborateurs dont l'un pour la partie administrative. Les logiciels utilisés sont Autocad© pour le traçage des plans en 2D et Sketchup© pour la modélisation 3D.

L'organisation interne : le fondateur de l'agence supervise l'ensemble des projets du bureau. Les projets sont ensuite répartis entre les collaborateurs, chacun d'entre eux gérant dès lors le processus complet d'un ou de plusieurs projets allant de la conception à la réception du chantier tant que cela est possible. Chaque collaborateur est secondé par un ou plusieurs autres au besoin en fonction des phases du projet. Chaque collaborateur a une certaine autonomie de prise de décision par rapport au fondateur. Celui-ci est consulté ponctuellement ou de manière naturelle pour certaines décisions en raison de sa prise de responsabilité, ou simplement pour bénéficier de son expertise. Le fondateur ne délègue donc pas les tâches en les vérifiant par supervision directe. La division horizontale comme verticale du travail est donc faible et la configuration de ce bureau peut être qualifiée d'adhocratique.

Le positionnement de la pratique paramétrique : aucun des quatre architectes n'utilise d'outils de modélisation paramétrique. Cependant, le fondateur du bureau, après avoir pris part à la phase d'entretien téléphonique, s'est interrogé quant à la pertinence d'appliquer ce type de modélisation à l'un de ses projets. La modélisation paramétrique est ainsi envisagée comme un processus effectué par un expert détaché de la conception architecturale. Aucune ambition d'intégrer cette dynamique en interne n'a été évoquée pendant notre mission.

Description de l'observation : suite à la participation du fondateur du bureau, Daniel Delgoffe, à la phase d'entretien téléphonique de notre recherche, cet architecte a entrevu une application pertinente d'une modélisation paramétrique pour l'un de ses projets, à savoir un hall polyvalent (figure 48). L'ambition architecturale de ce projet était de revêtir le bâtiment de profilés en béton. L'atelier d'architecture a donc sollicité l'expertise d'un architecte spécialisé en modélisation paramétrique afin de collaborer sur ce projet. L'expert a été mis en relation avec les concepteurs par l'intermédiaire de la chercheuse.

La collaboration s'est mise en place au travers d'une réunion réunissant Daniel Delgoffe (DD – fondateur de l'atelier), un de ses collaborateurs (J), Antoine Maes (AM – expert en paramétrique), Adeline Stals (AS - chercheuse). Les détails des échanges entre les intervenants sont davantage explicités en annexe 16. La chercheuse a tout d'abord contextualisé cette rencontre puis l'expert a expliqué les tenants et aboutissants du paramétrique notamment à l'aide d'une courte démonstration. Deux éléments à définir dans le projet ont permis d'envisager la modélisation paramétrique de manière pertinente : choisir la matrice des profilés en béton ainsi que les sections et le positionnement des lames en aluminium qui jouent un rôle de pare-soleil devant les baies.

A l'issue de cette réunion, les architectes annoncent qu'une seule matrice de profilé en béton est finalement compatible avec le projet, évinçant de ce fait l'une des deux raisons justifiant la pertinence d'une telle modélisation. Dès lors, la variation uniquement sur les lames en aluminium ne semble pas justifier ce processus aux yeux de l'expert, décision qui fut discutée avec les concepteurs afin qu'ils perçoivent les fondements du raisonnement. Cette discussion a mis un terme à ce terrain d'observation.

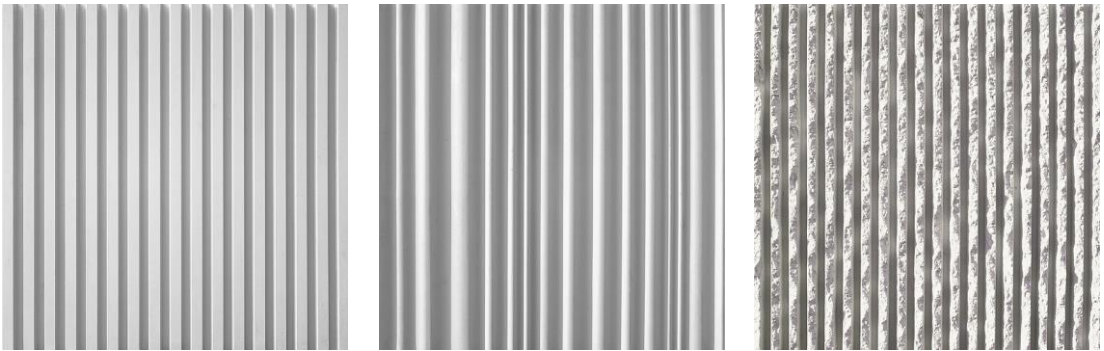


Figure 48. De haut en bas : image de synthèse du hall polyvalent conçu par AADD ; exemples de profilés en béton

Observations majeures :

La problématique du dialogue entre expert et non-initié : cette expérimentation a permis de mettre en évidence les difficultés qui peuvent émerger du dialogue entre non-initiés et experts de la modélisation paramétrique. Tandis que les non-initiés entrevoient des possibilités attrayantes, les experts, de par les compétences et l'expertise qu'ils ont acquises, anticipent certaines pistes de recherche vouées à l'échec ou non soutenables en termes de rendement, considérant le temps nécessaire pour effectuer la modélisation paramétrique en comparaison avec un autre type de modélisation.

Difficulté pour les non-initiés de comprendre tous les enjeux du paramétrique : ce terrain d'étude a souligné la difficulté pour les non-initiés d'estimer notamment l'investissement en temps nécessaire en phase initiale d'une modélisation paramétrique.

Maîtrise du processus décisionnel : ce cas d'étude met en exergue la place de l'architecte dans le processus paramétrique. En effet, celui-ci, de par son expérience et ses ambitions architecturales, reste en maîtrise des choix morphologiques qui sont à faire. On ne peut donc pas parler de perte de maîtrise du processus de l'architecte au profit du logiciel, en tout cas dans ce cas précis.

4.1.5. Bureau A2M

Nous commençons par définir l'agence A2M du point de vue organisationnel. Sachant que ce bureau a pu être observé de l'intérieur, une description plus poussée est réalisée. Le regard du chercheur complète les informations données par le fondateur de l'agence. Dans les autres cas d'étude de pratique paramétrique, seul le regard des architectes interrogés constitue une source d'informations pour comprendre l'organisation.

Le bureau : fondé en 2000, ce bureau d'une quinzaine de collaborateurs est supervisé par quatre « Partners ». Les logiciels qu'ils utilisent sont nombreux car ils intègrent au sein même de l'agence certains calculs énergétiques, structurels, de rendu,... Un logiciel reste cependant central et commun à tous les collaborateurs, il s'agit de MicroStation®.

L'organisation interne : le fondateur du bureau est entouré de ses trois partenaires. Chacun d'entre eux gère l'ensemble d'un projet et délègue les tâches à deux ou trois collaborateurs les exécutant, ce qui est défini comme une division verticale forte. Le mécanisme de coordination est la supervision directe. Le profil expert en paramétrique qui est observé est supervisé quant au résultat délivré mais non quant au processus utilisé puisqu'il est le seul à posséder les compétences pour en juger. Par ailleurs les Partners travaillent également de manière transversale sur l'ensemble des projets d'un point de vue du suivi de chantier pour l'un, de la recherche et du développement durable pour l'autre ou encore pour gérer l'agence développée à New York. Les collaborateurs travaillent ainsi avec un Partner sur un projet et simultanément, chacun d'entre eux dans un autre groupe supervisé par un autre Partner, sur un autre projet. Ce recoupement leur permet d'avoir de la flexibilité lorsqu'un projet demande une charge de travail plus importante. En effet, la taille de l'agence est propice à une bonne communication et des échanges rapides entre les compétences de chacun, chaque membre gardant sa « spécialité » (la gestion de projets, l'évaluation des structures, les calculs énergétiques, etc.) et s'adaptant aux besoins du bureau. L'organisation veut également laisser une marge de manœuvre à chaque collaborateur en fonction de ses affinités avec certains domaines et logiciels comme le souligne le fondateur : *« j'ai jamais pensé et je ne pense pas que les autres le pensent non plus hein dans les partenaires que qu'il y a quelqu'un [frappe sur la table], maintenant tu fais ça et ça et ça. Je ne pense pas que ça marche, c'est plutôt les affinités tu vois. »* [MOR-722]. On peut ainsi dire que la spécialisation horizontale est relativement faible. Cette organisation entrepreneuriale est schématisée par la figure 49 ci-après.

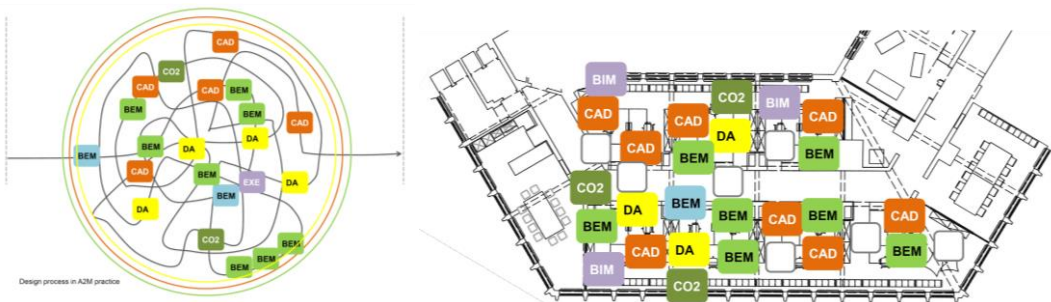


Figure 49. Représentations réalisées par A2M de son organisation interne.
De gauche à droite : relations entre les compétences ; disposition physique dans le bureau

Le positionnement de la pratique paramétrique : l'architecte observé, Antoine Maes, est considéré comme un architecte expert en matière de modélisation paramétrique et généralement nommé en tant qu'expert modélisateur au sein de l'agence. Celui-ci évolue dans un bureau où le paramétrique est en plein déploiement [voir MOR-764]. Les fondateurs sont conscients du potentiel de ce type de modélisation et tentent d'y allouer plus de moyens.

Quatre projets sont parcourus : le projet A_FH consistant en la modélisation de deux façades triangulées, le projet A_M principalement centré sur la modélisation d'une toiture à double courbure, le projet A_C pour définir la volumétrie d'immeubles mixtes, le projet A_L pour modéliser les pare-soleils composant la façade d'un hôtel. Certains projets décrits ci-dessous ont été observés, d'autres ont fait l'objet d'un entretien rétrospectif. L'ensemble est complété par un entretien avec le fondateur de l'agence. Afin de sélectionner les moments majeurs sur lesquels nous nous appuyons et que nous résumons ci-dessous, nous avons mis en place une méthodologie explicitée à la section 6.2.2 *Séquençage*, du chapitre 3.

A - Projet A_FH



Figure 50. De gauche à droite : premier visuel produit lors de la conception originelle du projet ; projet construit

Sujet : ce projet d'hôtel a pour ambition d'être enveloppé par une façade triangulée générant un visuel ondulé (figure 50). L'ensemble du projet a été dessiné en 2D sur MicroStation©. Le permis d'urbanisme ayant été octroyé, le chantier a débuté. Ce permis représente un fil conducteur du projet d'un point de vue esthétique et dimensionnel.

Le projet est donc en phase exécution (niveau de parking en cours) lorsque la 3D de la façade est demandée. Il s'agit d'obtenir l'épaisseur exacte d'isolant en chaque point de la façade (croisements avec les baies, jonctions entre les triangulations) (figure 51). Cependant, au moment de cette demande, l'épaisseur d'isolant minimum n'est pas encore définie car elle dépend des calculs énergétiques PEB en cours.

Outils : MicroStation© en 2D, Rhinoceros© et Grasshopper© pour faire la façade en 3D

Déroulement temporel : lors de la première séance, le dialogue entre observé et observateur était autorisé pour permettre à l'observateur d'entrer dans le projet et la méthode de travail de l'observé. Lors de la deuxième séance, très peu d'interactions ont eu lieu entre l'observé et l'observateur. Les deux séances suivantes sont quant à elles caractérisées par la méthode du *think aloud* qui a découlé naturellement du sujet observé. Cela a permis d'accéder au

plus près à la pensée de l'observé et aux motivations de chaque opération effectuée.

Approche paramétrique : le recours à la modélisation paramétrique intervient en phase finale du projet. Ce type de modélisation est adopté car il procure la flexibilité nécessaire pour effectuer la modélisation en amont et ajuster au dernier moment l'épaisseur d'isolant, et ainsi obtenir les épaisseurs d'isolant en chaque point rapidement une fois l'épaisseur minimale fixée.

Dans ce processus, conception et modélisation sont menées conjointement au sein de l'agence. Cependant, ces deux missions ne sont pas menées par les mêmes acteurs. La conception a été réalisée par l'architecte en charge du projet à partir de dessins 2D, la modélisation paramétrique est développée par après par l'expert paramétrique afin de résoudre une problématique spécifique.

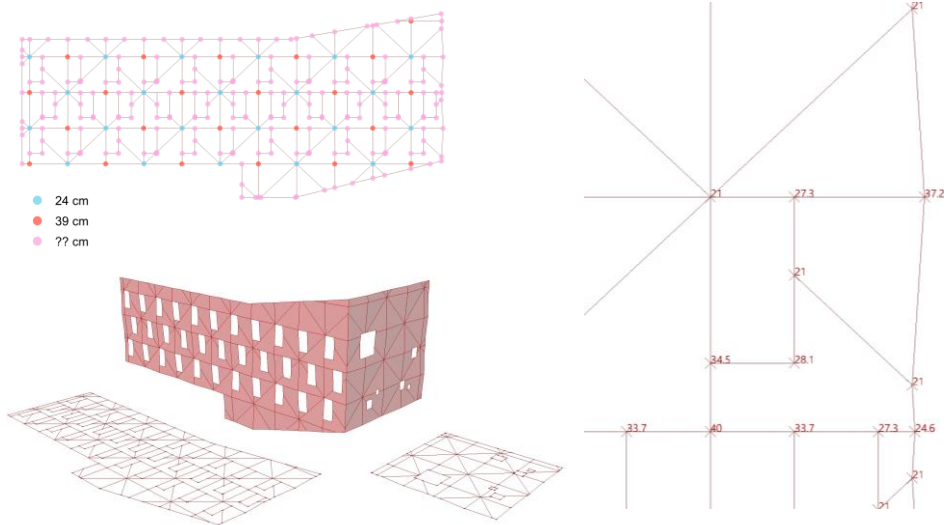


Figure 51. Repérage des épaisseurs d'isolant inconnues ; modélisation de la façade et projection plane ; indication automatique par le logiciel de la valeur exacte à chaque intersection

Processus de modélisation : pour entamer la modélisation paramétrique, Antoine Maes doit partir des fichiers qui ont été dessinés par ses collègues via d'autres logiciels : « *Ça c'est le genre de problèmes qu'on a. Tout ça de calques dedans quoi et que moi je dois exactement retrouver ce qu'il me faut. [...]* Comme on travaille sur des fichiers différents, les origines ne suivent absolument pas donc là j'essaie de retrouver où mon projet est allé. » [A_FH_action 1]. Le document de référence, dessiné en 2D, contient des imprécisions et incohérences selon les vues en plan et, de ce fait, « *tu ne sais pas vraiment sur quoi te baser parce que tu ne sais pas ce qui est bien dessiné et mal dessiné* » [A_FH_1]. Par ailleurs « *c'est du ultra détails. Même en chantier ce ne sera jamais aussi précis. Ce qu'il y a c'est que parfois, le fait que ça ne se touche pas, l'ordi ça le fait planter.* » [A_FH_2]. Le modélisateur va entamer son processus réflexif pour comprendre l'emboîtement des triangulations à l'angle du bâtiment. Pour ce faire, il envisage premièrement une modélisation rapide sur Sketchup©. Ensuite, il va opter pour un croquis à la main afin d'affiner sa réflexion technique, de définir le trait de référence de la modélisation (la paroi intérieure ou extérieure par exemple) et de clarifier l'enchaînement des composants à utiliser [A_FH_3]. Le développement de la définition algorithmique va ensuite être effectué par le biais d'allers-retours entre Rhinoceros© et Grasshopper© [A_FH_4], entrecoupés de moments réflexifs. La place de ce travail réflexif est décrit comme tel : « *Je vais essayer de faire le truc sur cette façade-ci mais le lien avec l'autre façade ce ne sera jamais pour, jamais pour aujourd'hui. Il faut vraiment que je réfléchisse longtemps avant [...]* C'est pas le genre de truc où c'est en réfléchissant sur le moment même que tu vas trouver. T'y penses quand tu es chez toi, dans le train, en train de marcher. » [A_FH_5].

L'expert a interrogé la manière dont pourrait être construit l'angle du bâtiment. Pour ce faire, il s'est appuyé sur son carnet à plusieurs reprises afin d'esquisser des détails techniques et des vérifications géométriques tels que figurés par les moments A_FH_17 et A_FH_20 (figure 52). Ainsi, les croquis reprennent davantage de réflexions quant à la constructibilité du projet. Ces esquisses sont éventuellement accompagnées de moments de réflexion au cours desquels l'architecte assimile la réflexion sur papier pour la traduire en une géométrie paramétrique et ainsi pouvoir construire la suite de la définition algorithmique.

Lors du deuxième modèle paramétrique, effectué afin d'optimiser la modélisation, le découpage du modèle s'est opéré d'une toute autre manière. En effet, Antoine Maes a été confronté à des problèmes engendrés par la jonction des triangulations à l'angle du bâtiment. Le nouveau modèle consistait alors à modéliser à partir de la paroi extérieure du parement comme surface de référence et non la structure portante. C'est à nouveau par allers-retours que cette définition algorithmique a été construite. A l'issue de la modélisation, il s'est avéré que le positionnement des triangulations à l'angle du bâtiment n'était pas similaire à celui représenté sur le permis d'urbanisme [A_FH_11]. Antoine Maes a alors, à plusieurs reprises, utilisé d'autres supports (image de synthèse, croquis, pensée orale) pour soutenir sa réflexion et vérifier si d'autres propositions étaient plausibles et ainsi proposer la solution la plus pertinente au responsable du projet.

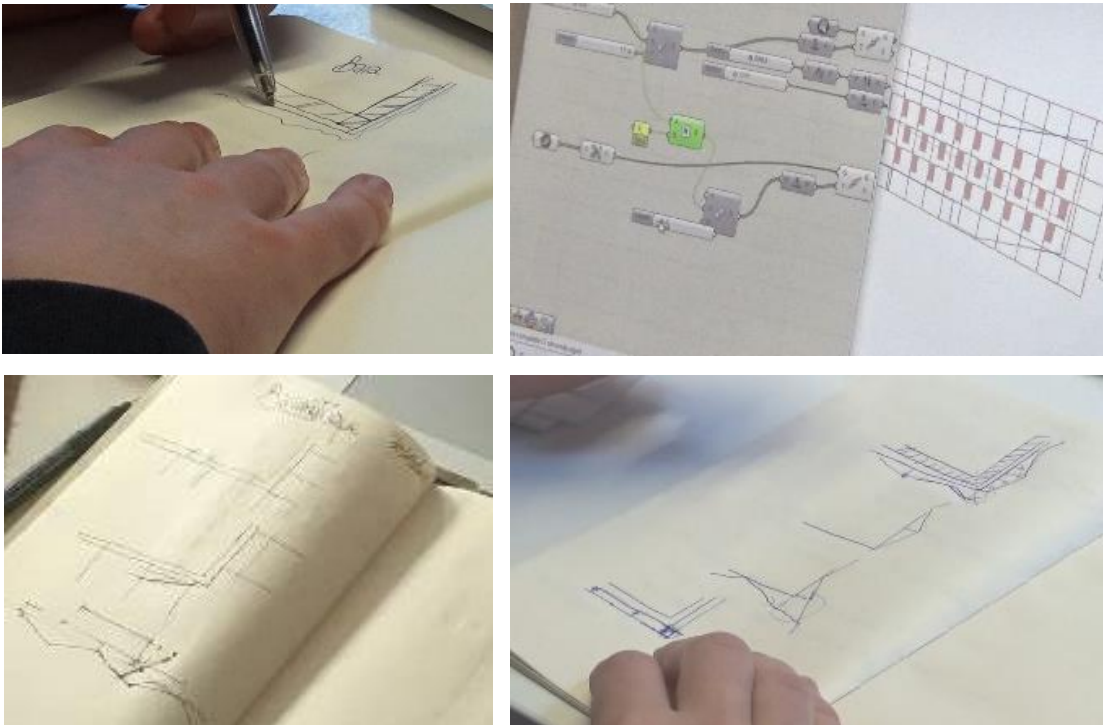


Figure 52. Illustrations de moments clefs de gauche à droite : en haut A_FH_3 et A_FH_4, en bas A_FH_17 et A_FH_20

Observations majeures :

La réflexion comme première étape d'une modélisation : au travers de ce cas d'observation, nous pouvons mettre en évidence l'importance capitale de laisser du temps à une réflexion préalable à toute modélisation paramétrique [A_FH_5]. L'expert lui-même insiste sur ce temps qu'il doit prendre afin de pouvoir délivrer un travail cohérent par rapport aux objectifs attendus de la modélisation : « *C'est pour ça aussi que c'est bien de ne pas commencer trop vite un Grasshopper. Quand tu sais que tu dois faire quelque chose, il vaut mieux le laisser un peu. Comme c'est tellement logique, si tu rushes dessus ce ne sera jamais bon.* » [A_FH_6]. Cela met en exergue le temps nécessaire pour passer d'une représentation interne à une représentation propre au paramétrique, qui semble nécessiter davantage d'incubation que pour externaliser les représentations issues d'autres outils.

Le dessin comme support de réflexion technique : l'observé a systématiquement recours au dessin à main levée pour développer ou valider une réflexion d'ordre technique qui ne semble pas pouvoir être supportée par le logiciel : « *Comme on a [dessine], comme on a l'isolant qui est variable sur le bord. En plan, on a l'isolant qui est bizarre là, qui est bizarre et en fait on doit se caler par rapport à la maçonnerie qui est là. On a un premier isolant qui est droit et ensuite on a un isolant qui est variable qui va de 2cm à, on ne sait pas justement parce qu'ils veulent pouvoir calculer avec 10, avec 15 et tout ça quoi.* » [A_FH_3].

Vue d'ensemble du projet limitée : ce mode de représentation nécessite de centraliser toutes les données en même temps pour produire un modèle unique et précis. Par ailleurs, ce processus de mise en place de la définition algorithmique générant petit à petit la modélisation 3D ne permet pas toujours d'anticiper le résultat de la modélisation. La difficulté de pouvoir répondre à ces exigences entraîne parfois l'architecte dans la génération d'une définition algorithmique contenant certaines erreurs et nécessitant un retour en arrière dans le processus. Dans le cas que nous avons observé, la modélisation de la première façade distinctement de la seconde n'a pas permis d'anticiper un décalage : « *Aucun alignement. Et en fait ce qu'il y a, c'est qu'avant, le décalage des carrés, des grands carrés-là, était différent parce que ce n'était pas une symétrie et donc du coup il n'y avait pas ce coin-là avec tout ça qui coince dedans.* » [A_FH_29].

Projet A_M



Figure 53. De gauche à droite : visuel produit lors de la conception originelle du projet ; projet en phase chantier

Sujet : ce projet est un immeuble mixte comprenant des bureaux et du logement. La parcelle est transversale à l'îlot. Ainsi, deux immeubles sont édifiés de part et d'autre de la parcelle et rejoints au centre par un volume recouvert d'une toiture courbée (figure 53). C'est cette dernière qui fait l'objet de l'étude.

Lorsque les architectes ont eu recours à la modélisation paramétrique, le bâtiment était en cours de construction et les ingénieurs avaient besoin des points de niveau précis afin de pouvoir dessiner le plan de coffrage de la dalle pour pouvoir exécuter le chantier.

Outils : MicroStation© en 2D, Rhinoceros© et Grasshopper© pour faire la toiture courbée

Déroulement temporel : une séance d'observation a été effectuée. Nous l'avons complétée par une séance rétrospective, où l'expert explique les grandes étapes qui ont suivi cette séance d'observation.

Approche paramétrique : la modélisation paramétrique a été adoptée pour générer avec précision la toiture à double courbure. Lorsque les ingénieurs demandent la valeur de chaque niveau, les coordonnées exactes du périmètre de la dalle ne sont pas encore connues (en raison d'erreurs de relevé

préalables). Il faut donc que le modèle 3D soit flexible afin d'être généré préalablement et ajusté aux valeurs réelles en dernier recours.

Processus de modélisation : la modélisation 3D disponible dans les documents du dossier présente plusieurs erreurs (ex. : longueur du bâtiment différente entre les plans et la coupe). Antoine Maes va donc d'abord précautionneusement se renseigner sur les traces de référence sur lesquelles il peut se baser pour entamer sa modélisation. L'expert va travailler de manière très méthodique, en prenant des temps de réflexion assez importants et ainsi poser les bases d'une modélisation régie par des paramètres pertinents en regard des objectifs de la demande. Des stratégies sont mises en place pour vérifier que la modélisation est flexible (ex. : faire varier les sliders de certains paramètres, vérifier la courbure via trois vues différentes). L'expert va être confronté à certaines difficultés pour mettre en œuvre le processus de modélisation, difficultés qui vont en partie influencer la morphologie de la toiture.

Observations majeures :

Le paramétrique comme guide de cohérence : la modélisation antérieure à la modélisation paramétrique ainsi que les plans, de par leur mise-à-jour parallèle et non simultanée, n'ont pas permis de déceler le problème. Via la modélisation paramétrique qui assure la cohérence du modèle global, l'expert se rend compte que l'échappée d'escalier prévue jusqu'alors est trop faible. La courbure de la toiture est alors ajustée tenant compte de l'échappée nécessaire et de la constructibilité de la courbure : « *De toute façon il n'y a aucun document qui correspond. [...] Tant que l'on a le passage nécessaire.* » [A_M_2]. Au-delà du fait que la cohérence de la modélisation ait permis de détecter l'erreur, celle-ci, grâce à sa flexibilité, va permettre un ajustement rapide de la toiture pour répondre aux contraintes de spatialité.

B - Projet A_C, Cadzand

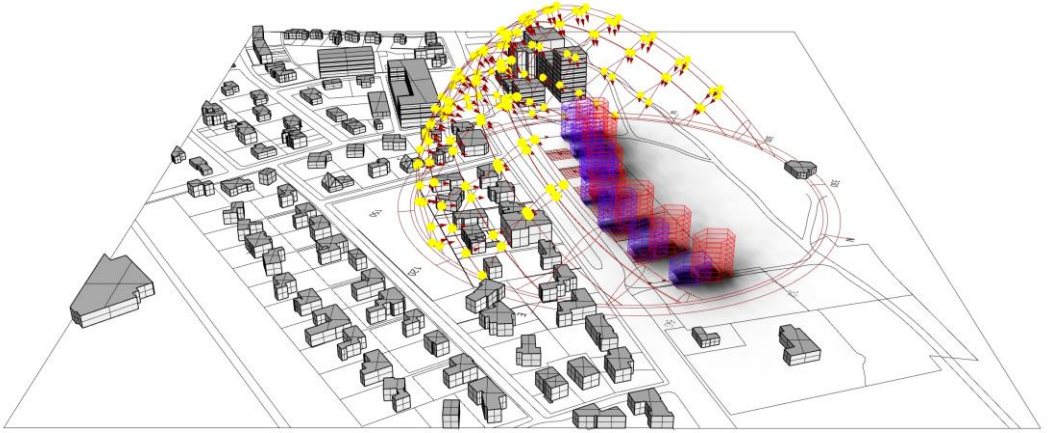


Figure 54. Etude d'ensoleillement pour générer un plan masse, projet du bureau A2M

Sujet : l'objectif de ce projet est de construire plusieurs immeubles en front de mer (figure 54). Dans un premier temps, le travail consiste à simuler différentes propositions pour tester les vues, les ensoleillements de chaque appartement et optimiser les volumétries pour maximiser le nombre d'appartements.

Outils : Rhinoceros© et Grasshopper©

Déroulement temporel : nous avons pris part à une séance de travail de l'expert. Le processus de conception ainsi que la modélisation paramétrique ont été entamé préalablement.

Approche paramétrique : le paramétrique vient en soutien d'une esquisse de volumétrie. L'optimisation est dictée par des règles afin de maximiser le nombre de logements tout en minimisant l'ombrage et en tentant de s'aligner sur les gabarits des bâtiments avoisinants.

Processus de modélisation : le processus de modélisation en lui-même est peu décrit lors de cette séance.

Observations majeures :

Le paramétrique comme renommée : dans ce cas d'étude, l'utilisation du paramétrique a été volontairement annoncée au client afin de lui montrer la complexité de la conception qui était en cours et ainsi de soutenir la réflexion architecturale des architectes [voir A_C_2].

L'anticipation des paramètres d'une définition algorithmique : l'expert en paramétrique se doit d'intégrer les ambitions de l'architecte concepteur et de les restituer selon les fonctionnalités du logiciel de modélisation paramétrique. De par son expérience, il sait également anticiper, en partie, d'éventuelles variations qui sont plus faciles à intégrer dès le départ plutôt qu'une fois la définition algorithmique entamée : « *En gros au départ, il y avait une volonté du boss, c'était de faire, c'était vraiment un mur. Et en gros il voulait qu'il y ait une grosse barre de gauche à droite, vraiment, avec des appartements qui se seraient, seraient en longueur avec une circulation au milieu [...]. Il voulait que l'on puisse que, la ligne ici puisse faire ça par exemple, serpenter. Alors au départ il avait parlé arrondi mais moi je savais déjà que ce ne serait pas arrondi donc j'avais déjà prévu un switch comme on montrait, le oui-non oui-non alors c'était soit arrondi soit pas arrondi.* » [A_C_1]. Dans ce cas-ci, les acteurs de la modélisation paramétrique sont distincts des acteurs de la conception architecturale.

L'optimisation d'objectifs pour recourir au paramétrique : ce cas d'étude figure la pertinence de recourir à une modélisation paramétrique en architecture lorsque différents critères doivent être pris en considération et que ces objectifs semblent contradictoires. Ces différentes données externes peuvent alors être intégrées au projet afin de proposer la solution la plus pertinente pour répondre aux problèmes identifiés : « *C'était réduire l'ombrage au sol. Il y avait maximiser le nombre de logements pour augmenter la vente [...] C'est justement là que c'est intéressant une optimisation, je trouve moi. C'est quand les objectifs se contrarient, parce que si tu augmentes le nombre de logements, tu augmentes l'ombrage. C'est là que c'est un peu créatif et que l'ordi peut te proposer des trucs des fois. Et y avait aussi, essayer de matcher les gabarits sur les côtés parce qu'en fait, le gabarit-là est beaucoup plus grand et le gabarit-ici est tout petit.* » [A_C_3].

C - Projet A_L, Lisbonne

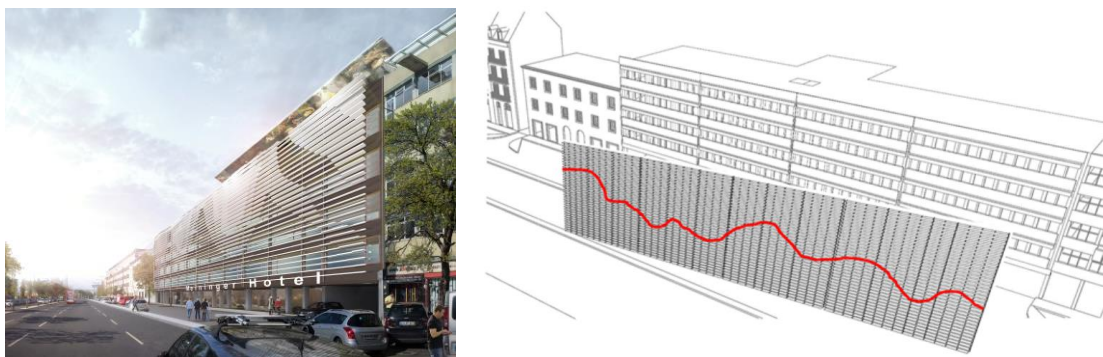


Figure 55. De gauche à droite : visuel de la façade de l'hôtel ; tracé des collines de Lisbonne

Sujet : ce cas d'étude consiste à recouvrir la façade d'un hôtel existant afin de lui redonner une esthétique différente répondant aux besoins énergétiques. La façade est ainsi conçue comme un ensemble de brise-soleils dont les variations laisseraient apparaître le dessin des collines sans entraver de manière significative la vue des chambres (figure 55).

Outils : Rhinoceros© et Grasshopper©

Déroulement temporel : nous avons parcouru ce cas d'étude au sein d'un entretien rétrospectif au cours duquel le modélisateur nous explique les tenants et aboutissants de ce projet.

Approche paramétrique : le recours à la modélisation paramétrique débute lorsque le chantier est en cours. Les concepts esthétiques généraux de la façade ont déjà été validés. Le paramétrique intervient pour soutenir une modélisation précise permettant de maîtriser par ailleurs l'aspect plus technique et constructif. La modélisation est conçue pour pouvoir jouer sur l'inclinaison des lamelles et ainsi trouver un compromis entre les vues et l'ensoleillement, sur la longueur et la largeur de chaque lamelle afin de minimiser le nombre d'éléments différents, et pour modifier facilement le tracé des courbures qui régissent le dessin de la façade.

Processus de modélisation : le projet a débuté en considérant les pare-soleils comme de longues lamelles extrudées de manière irrégulière afin d'obtenir des variations laissant transparaître les courbes du dessin. Le responsable du projet a ensuite suggéré de procéder avec des lamelles de plus petite longueur, de profondeur égale et inclinées différemment. Antoine Maes, lors de sa modélisation paramétrique a fait preuve d'anticipation et a directement intégré la possibilité de faire varier la longueur, la profondeur et l'inclinaison des lamelles. Cette anticipation permet d'explorer de nouvelles pistes non considérées mais n'a finalement pas modifié la solution finale choisie. Par la modélisation paramétrique, une représentation des différentes lamelles et de leur emplacement en fonction de l'instance choisie est visualisable (figure 56). Le dessin des ailettes peut également être facilement adapté en remplaçant les courbes de niveau par un autre tracé.

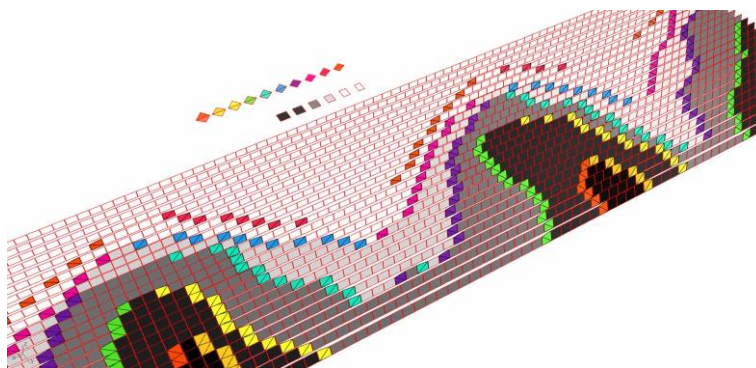
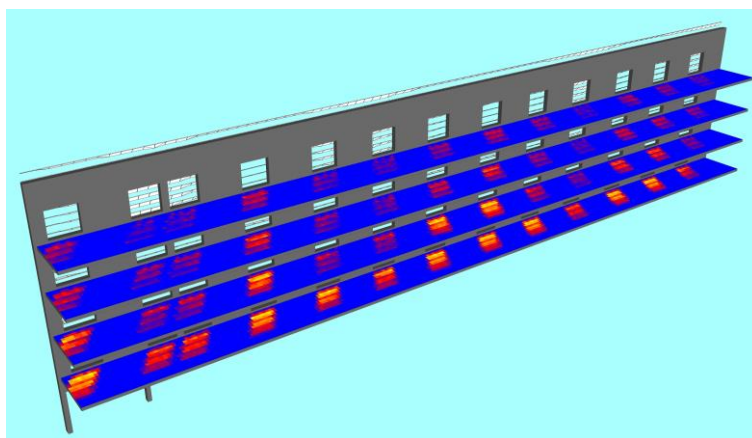
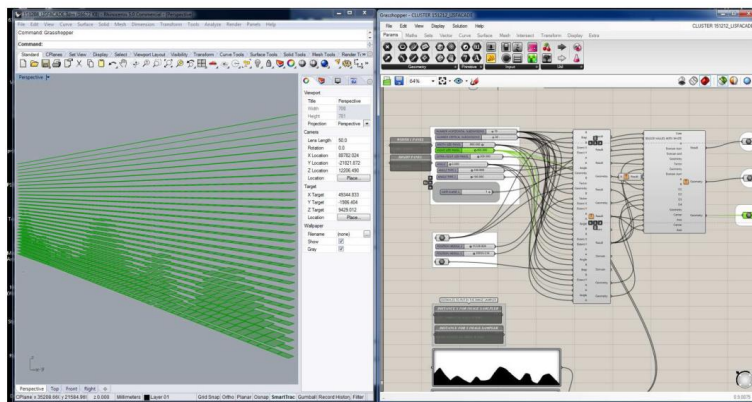


Figure 56. De haut en bas : interface Rhinoceros© et Grasshopper© avec la double représentation de la modélisation ; simulation de l'apport de chaleur dans chaque chambre en fonction de l'inclinaison des brise-soleils ; optimisation du nombre de brise-soleils différents sur l'ensemble de la façade

Observations majeures :

Les données d'entrée comme source de storytelling : la possibilité de pouvoir intégrer différentes données comme paramètres d'entrée pour réaliser un design particulier permet de créer l'histoire de l'édifice : *« Ici, tu peux juste dire il y a une histoire, ça vient de la réduction des apports solaires et ça vient de l'histoire de la ville, et donc ce bâtiment est là et nulle part ailleurs quoi. Et donc tu peux coller une histoire autre que simplement le, les instruments qu'on apprend en atelier. »* [MOR_304]

Les représentations numériques induisent des erreurs de point de vue : *« On va souvent le voir du bas, comme si là c'était la façade, et donc tu es en bas de la façade, tu regardes vers le haut, donc on va être plutôt comme ça à peu près. Tu vois je trouve qu'à l'endroit où on est censé plus voir les courbes de niveau, on les voit le moins. C'est juste une parenthèse sur le design, ça je leur ai signalé et ils l'ont vu aussi, mais ça ne, voilà ça ne les influence pas »* [A_L_120].

Les différents cas d'étude que nous venons de parcourir, qu'ils aient été explicités ou observés, mettent en lumière des spécificités du processus de conception soutenu par des outils de modélisation paramétrique. Nous développons ces observations transversales aux sections suivantes.

4.2. La représentation au cœur d'un remaniement de la pratique architecturale

L'analyse qui suit est transversale en regard des différentes pratiques paramétriques en développement ou établies dans les PME étudiées. A partir des caractéristiques récurrentes reprises pour décrire le paramétrique, et notamment celles que nous avons discutées dans les résultats à la section 2.2 telles que la maîtrise du processus ou la recherche formelle, nous avons recensé chaque moment clef en fonction de ces caractéristiques et du moyen utilisé pour mettre en œuvre l'action (CAO, paramétrique, dessin à main levée, image, réflexif). Le tableau disponible à l'annexe 23 reprend cette classification tandis que la retranscription complète des séquences est disponible à l'annexe 22. Par ce tableau, nous mettons en évidence que les caractéristiques discutées dans la littérature et généralement évoquées par les non-initiés (collaboration, recherche morphologique, contexte professionnel, typologie, maîtrise et apprentissage) ne rejoignent qu'en partie celles observées dans nos cas d'étude. Ces pratiques paramétriques observées ont plutôt fait émerger des liens avec les représentations liées à ce type de modélisation, et ont permis d'ouvrir la question de l'impact des outils de modélisation paramétrique sur le processus de conception. Les autres thématiques soulevées par ces cas d'étude seront abordées dans une discussion plus générale sur les challenges du paramétrique (chapitre Discussion) en regard de l'état de l'art et des autres phases de cette thèse.

Nous nous appuyons à présent sur les moments clefs ainsi que sur les propos issus des entretiens rétrospectifs, de la transcription des propos de l'architecte expert observé et du fondateur de l'agence A2M. Partant de ces données, nous abordons le passage entre représentations internes et externes. Nous envisageons ensuite les outils de modélisation paramétrique comme support technique du projet pour veiller à sa constructibilité. Nous poursuivons par le type de représentation que cette modélisation génère. Finalement, nous envisageons la place de ces outils dans le processus, oscillant entre support du processus de représentation et support du processus de conception.

4.2.1. Méthodologie de structuration du passage entre représentation mentale et représentation externe

Les observations que nous avons pu mener nous conduisent à aborder le processus et les éléments qui entrent en jeu lorsque le concepteur affine et retranscrit ses représentations mentales en représentations externes via des outils de modélisation paramétrique.

Un des experts interrogés relate qu'il y a d'abord la naissance d'une idée : *« Ben les récurrences jusqu'à présent c'était quand même d'avoir une idée assez précise de ce que je voulais modéliser. Donc ça c'est sûr. [...] Je n'ouvre jamais un fichier Grasshopper en me disant tiens je vais voir ce que ça donne 2-3 trucs. »* [R1-416,418].

Un autre propos nous indique que l'émergence d'une idée n'est pas propre au processus soutenu par des outils de modélisation paramétrique. Cependant, nous pouvons souligner que, au-delà de l'idée de base, le concepteur doit identifier un certain nombre d'éléments, tels que les points de la toiture dans ce cas-ci, afin de pouvoir entamer la définition algorithmique : *« Ben l'inconvénient j'ai envie de dire, c'est quelque part si je ne savais pas ce que je voulais modéliser, je n'aurais peut-être pas su le faire [...] Maintenant je ne dis pas qu'en Sketchup j'aurais su le faire aussi. Ça c'est une autre question donc heu, c'est parce qu'on avait la forme déjà de base, qu'on savait que ce serait une toiture trapézoïdale avec heu, heu, une faîtière en diagonale donc à partir de là, oui, moi je suis parti de mes points et j'ai fait tout, tout mon schéma, tout mon fichier Grasshopper. »* [R1-199,201].

Afin d'identifier ces paramètres et contraintes majeurs, certaines attitudes répétitives ont pu être observées. Il semble en effet qu'une action préalable soit nécessaire pour passer de la représentation mentale à la représentation paramétrique. Celle-ci peut passer par la main au travers de la structuration simplifiée de la définition algorithmique par exemple : *« En gros ce que j'ai fait ici donc 1- définition des points 2- définition de la forme globale 3- définition des chevrons porteurs, je l'avais écrit dans mon carnet préalablement. »* [R1-252], *« Mon approche notamment par le passage par un croquis et une structure papier. »* [R1-301]. Un autre architecte utilise davantage le croquis comme nous l'avons souligné dans les observations de la pratique de l'agence LASSA (section 4.1.2), qui entame son processus réflexif sur papier afin de définir les

contraintes qui sont ensuite transformées en paramètres pour contraindre la modélisation paramétrique.

Même si la modélisation peut paraître plus directe dans certains cas, l'expertise de l'architecte joue un rôle dans la maturation de son attitude pour entamer la modélisation : « *Là c'est plus, heu j'y suis allé de manière frontale. Là j'ai pas, je me doutais bien que j'avais besoin de ma courbe, de ma hauteur finale de comment est-ce que je vais me décaler heu et puis en avant quoi.* » [R1-392]. Dans ce cas-ci, la phase réflexive n'est pas observable mais implicite. Dans d'autres cas, celle-ci est même soulignée par l'architecte qui en ressent le besoin « *Je vais essayer de faire le truc sur cette façade-ci mais le lien avec l'autre façade ce ne sera jamais pour, jamais pour aujourd'hui. Il faut vraiment que je réfléchisse longtemps avant [...] C'est pas le genre de truc où c'est en réfléchissant sur le moment même que tu vas trouver. T'y penses quand tu es chez toi, dans le train, en train de marcher.* » [A_FH_5], ou encore « *C'est pour ça aussi que c'est bien de ne pas commencer trop vite un Grasshopper. Quand tu sais que tu dois faire quelque chose, il vaut mieux le laisser un peu. Comme c'est tellement logique, si tu rushes dessus ce ne sera jamais bon.* » [A_FH_6].

Nous avons vu dans l'Etat de l'art que différents rôles ont pu être attribués aux représentations externes. Les représentations paramétriques ne semblent pas pouvoir alléger la charge mentale aussi facilement que d'autres supports auxquels les concepteurs semblent généralement recourir avant d'entamer une modélisation paramétrique. Cependant ce type de représentation est efficace pour étendre la cognition. La présence de paramètres adaptables donne de la flexibilité au modèle et ouvre la porte d'un espace de solutions plutôt que sur une solution unique. L'intérêt n'est plus porté sur le développement d'une instance unique mais sur le processus complet : « *Et donc ça par exemple, quand on on a fait le concours, on a mis l'accent sur heu (.) pas que les résultats mais sur le, le process. Et comment aider ces questionnements tu vois.* » [MOR-644]. Nous reviendrons sur ces différents éléments dans le chapitre Discussion.

Les traces du processus laissées via un dessin à main levée ne sont pas toujours très claires et peuvent avoir une connotation personnelle. Il a ensuite été reproché à la CAO d'effacer l'évolution du projet et de ne pas pouvoir accéder à l'historique. Les outils de modélisation paramétrique semblent proposer une alternative en mettant à disposition un processus itératif visualisable, du moins en partie, et intrinsèque à son mode de fonctionnement.

4.2.2. Représentation technique du projet

Plusieurs de nos observations majeures semblent identifier la modélisation paramétrique comme support de la représentation technique d'un projet, et non son développement technique. Sur une échelle temporelle restreinte, le paramétrique ne semble pas pouvoir accompagner la mise au point de détails techniques, ce qui pousse les architectes à recourir à d'autres supports. Sur une échelle temporelle plus longue, à savoir l'ensemble du processus de la conception à la construction, les architectes perçoivent cependant la pertinence de recourir au paramétrique pour anticiper la constructibilité de l'ouvrage et représenter l'ensemble des éléments de manière cohérente.

Pour développer le premier cas, nous nous appuyons sur une phase itérative observée dans le projet A_FH soutenue ici par des verbatims et mise en évidence dans le tableau à l'annexe 24. Durant cette phase, l'architecte fait face à un problème technique qu'il tente de résoudre : « *C'est pas juste parce que les carrés-là qu'on voit [...] ben la longueur qu'il y a ici, est censée continuer ici et s'arrêter là.* » [A_FH_11], « *On a une pure coïncidence, c'est que le bord jaune-là [...] le carré s'arrête là et la ligne juste à côté avec les chiffres, c'est la ligne de la façade. [...] Mais il y a un truc de pas logique. [réfléchit]* » [A_FH12]. Pour ce faire, celui-ci va d'abord se tourner vers un autre type de représentation pour vérifier la pertinence de son questionnement : « *Je pensais que j'avais une photo du coin avant en 3D, un rendu, mais non je n'ai que l'arrière.* » [A_FH_10]. Ensuite, il va se tourner vers des outils qui ne sont ni de l'ordre du paramétrique, ni de la CAO. Nous avons ainsi pu identifier le dessin à main levée, suivi par une réflexion cognitive, comme un enchaînement itératif de supports plausible pour aboutir à une réflexion d'ordre technique, et pouvoir alors relancer le processus de modélisation paramétrique.

[A_FH_13] *Dessine dans carnet pour soutenir sa réflexion technique :*
« *Ça ne va pas du tout marcher en fait leur truc.* »

[A_FH_15,16] *Réfléchit tout haut :* « *Je t'avoue que je n'ai aucune idée de comment régler leur truc.* », « *De toute façon physiquement ce n'est pas possible de faire ce que eux veulent. C'est pas possible. Ça c'est pas possible.* »

[A_FH_17] « *Un autre moyen de montrer à quel point c'est impossible [dessine]* »

[A_FH_19] *En dessinant : « On va quand même avoir tout le temps le problème. Si on est là, on va avoir un décalage ici. Donc ce qui fait que quand on va tourner, le plan va être à 45° et on aura de nouveau un décalage [...] On aura toujours toujours, toujours un décalage donc en fait non on ne sait pas. Non ce n'est pas possible. »*

Sur une échelle temporelle plus longue de la mise au point d'un projet, le paramétrique permet de maintenir une cohérence sur l'ensemble du projet d'un point de vue technique et d'envisager une optimisation des éléments afin d'anticiper la constructibilité de l'ouvrage : *« tu vois on a essayé de simplifier avec un système pour Bara donc c'est des formes tu vois c'est des formes- [...] soit disant quelconques mais en fait non il y a il y a quatre modèles, six modèles maintenant, je sais plus, pour avoir une découpe la moins heu différente possible et tout. »* [MOR-314, 316]. Cet objectif de constructibilité est très présent dans l'agence LASSA puisque le choix-même du logiciel principalement utilisé est lié à ce critère : *« on utilise Rhino parce qu'il peut produire des fichiers de production [...] C'est le file to production qui nous intéressait et heu: donc la capacité à produire et à visualiser en fait en même temps. »* [R2-38, 40].

Tandis que nous confirmons que la modélisation soutient une cohérence globale de la modélisation d'un projet et facilite la prise en considération de la constructibilité de l'ouvrage, tel qu'avancé dans la littérature, ces outils ne semblent pas adaptés à une approche détaillée de cette technicité, ne proposant pas un mode de représentation adapté pour concevoir le détail technique mais bien pour le représenter.

4.2.3. Type de représentation

Par l'analyse de deux cas d'étude notamment, à savoir les projets A_L et A_FH, nous ouvrons la question du type de représentation généré par l'outil de modélisation paramétrique.

Dans le premier cas, c'est l'angle de vue du modèle 3D qui pose question. L'architecte peut en effet placer le point de vue à n'importe quel endroit dans l'espace 3D numérique, induisant un écart vis-à-vis de la vue réellement perçue par les futurs usagers de l'espace.

Dans le second cas, nous revenons sur la théorie avancée par Estevez (2001) qui discute la « fragmentation » des représentations. Cet auteur a soulevé la difficulté de faire évoluer un modèle numérique 3D dans son intégralité, poussant le concepteur à synthétiser toutes les données en un modèle unique. Le processus paramétrique semble entretenir une certaine fragmentation des représentations. Cependant, le processus de modélisation paramétrique semble introduire une nouvelle forme de fragmentation. En effet, le moment clef [A_FH_29] survient par exemple à l'issue de la modélisation d'une première façade tandis que celle-ci doit être jointe à une seconde façade lui étant perpendiculaire (section 4.1.5, chapitre 4). Cette jonction, de par la vue fragmentée du projet, n'a pas été anticipée par l'architecte en termes de modélisation pure. Cela signifie que géométriquement, la jonction est possible mais que la définition algorithmique entamée ne peut pas être poursuivie de la sorte pour y ajouter la seconde façade. Cette difficulté est surmontée en entamant une nouvelle définition algorithmique privilégiant une autre approche de modélisation, déplaçant notamment l'axe de référence du modèle. Ce moment clef révèle que la modélisation paramétrique détient en elle, par son fonctionnement intrinsèque, une nécessité de construire, au moins mentalement, une représentation avancée de l'artefact ainsi que de la définition algorithmique à créer.

4.2.4. Représentation vs conception

Au vu des pratiques paramétriques présentées, nous pouvons avancer que le paramétrique est utilisé de trois manières isolées ou dans un processus itératif entre celles-ci : (i) comme support de conception, (ii) comme support de représentation, (iii) pour l'optimisation et l'automatisation de tâches.

La première approche est notamment identifiée dans le projet de l'escalier hélicoïdal pour lequel l'architecte de SUBSTRA a procédé via une modélisation paramétrique afin de définir les proportions et la forme de l'escalier même si, dans une certaine mesure, l'idée de cet escalier était déjà « internalisée » mais floue. Le paramétrique comme support de représentation correspond aux projets évoqués par le co-fondateur de LASSA. Par ailleurs, l'optimisation de tâches peut être assimilée à la pratique de chez BSolutions.

Dans certains cas discutés, la modélisation paramétrique se positionne comme un support hybride entre représentation et conception et étend la conception dans un processus itératif de progression entre représentation et conception comme ce fut le cas pour le développement des projets observés chez A2M. Elle est employée dans un second temps par rapport au développement du concept même et des grandes lignes du projet. Une modélisation paramétrique ne sera pas entamée sans avoir défini et transcrit géométriquement les paramètres et contraintes majeurs du concept architectural : « *En sachant que les idées de base eh bien elles avaient été pliées. Au niveau des croquis ben voilà, simplement avoir une toiture en forme trapézoïdale avec une faitière principale et là on ne le voyait pas mais c'est deux pans cassés qui sont venus par le fait de la maquette physique. Donc pas du tout par, au début, par le travail d'une maquette numérique.* » [R1-159].

Cela ne signifie pas que la modélisation paramétrique ne sert pas la phase de conception et ce, même de manière quasiment immédiate, dans le processus : « *Maintenant que je disais que ça c'était pour un objectif de visualisation eh bien quand on fait varier les paramètres ben pour moi, on en revient à faire de la conception [...] Même si la conception est plus figée. C'est plus de la recherche formelle. [...] Ça devient de la conception quelque part.* » [R1-211-215].

On observe donc un passage fréquent et aisé entre support de représentation et support de conception : « *je suis parti simplement heu des 4 points formant la toiture et je les ai définis dans un fichier et je pouvais les faire varier dans les 3 dimensions. [...] Et je voyais comment est-ce que ma structure pouvait s'articuler.* » [R1-153-155]. L'augmentation de la fréquence d'itérations envisageables dans le délai imparti augmente le nombre de pistes de recherche envisagées par les architectes : « *Quand tu n'as pas du paramétrique, et même plus en général quand tu n'as pas quelques outils comme ça de simulation qui permettent de faire des itérations de 15 à la minute, tu explores deux trois cas. [...] De toute façon tu n'as pas le temps de faire plus. Donc aujourd'hui on réduit pas le temps, on garde le même temps, heu on travaille ni moins ni plus, donc c'est juste tu explores plus* » [MOR-518, 520] (cfr. également [R1-181]).

Ce processus itératif entre représentation et conception nous permettra de discuter dans la section 4 de la Discussion, les modèles de conception proposés dans la littérature, revisités à la lumière des potentialités offertes par le

paramétrique. Nous poursuivons d'abord en ouvrant la question sur les conséquences liées à cette modification du processus.

4.3. Une recherche formelle par le processus plutôt que l'outil

Les résultats que nous avons développés jusqu'ici montrent que les outils de modélisation paramétrique ont induit des changements majeurs. Nous avons également pu parcourir, au travers de l'Etat de l'art, que certains bureaux d'architecture ont profité du développement de ces outils dans le domaine de l'architecture pour transgresser les codes esthétiques traditionnels, provoquant chez les non-initiés un décalage avec leur pratique. Ceci est également confirmé par l'un des experts d'une PME observée : « *pour moi hein, c'est souvent très kitsch ce qu'ils montrent, kitsch kitsch kitsch si tu veux.* » [MOR-914] car en effet, « *tout le monde va pas aller faire un espèce de squelette à la Calatrava pour ma petite extension. [...] Et donc on n'est pas aidé non plus par ceux qui font la promotion de ça tu vois.* » [MOR-930, 932].

Il faut cependant distinguer ces a priori du positionnement des experts. En effet, cette typologie d'outils permet, lorsqu'elle est maîtrisée, d'accompagner les architectes dans des projets de grande envergure aux allures complexes. C'est le cas de l'agence LASSA qui, par une pratique maîtrisée de cette typologie d'outils, répond régulièrement à des appels à projets importants [R2-86].

A l'inverse, nous avons pu voir au travers du projet Ypsilon (section 4.1.2) que ce même bureau d'architecture se sert d'une modélisation paramétrique pour maîtriser complètement une maison d'habitation, que ce soit d'un point de vue de sa conception, que de sa mise en œuvre. Cette même démarche est appliquée également dans certains projets de chez A2M.

Dans les cas discutés ou observés, la modélisation paramétrique est utilisée pour certaines parties du projet simplement « *parce que l'ensemble ne se justifie pas* » [R1-333], « *ça peut vraiment être micro macro quoi, y a pas d'échelles spécialement.* » [R1-454]. On observe donc que la modélisation paramétrique trouve sa pertinence dans différentes situations au-delà de la typologie et de la morphologie des bâtiments conçus. En effet, les experts y voient plutôt une approche ayant le potentiel de replacer, au cœur du

processus, l'énoncé du problème à résoudre plutôt que l'outil utilisé pour y répondre.

Comme l'indique un des architectes, « *la question n'est jamais heu c'est comme si tu disais, tiens est-ce que j'util- à l'époque, on aurait dit est-ce que je vais utiliser heu utiliser un crayon ou un rotring ? [...] Et un crayon BH2 ou H2 ou B2 tout court. La question n'est pas sur l'outil hein. La question elle est tiens, dans ce projet on aimerait bien travailler la lumière parce qu'on est en plein milieu de la ville. [...] Tiens on voudrait travailler les flux, on voudrait travailler heu- Hein ici il y a une question qui est dite, dans un cahier des charges où on en discutant avec le client [...] c'est plutôt tu, t'as envie d'explorer* » [MOR-530 à 534]. Dans le même ordre d'idée, « *la question est jamais heu est-ce que je vais utiliser le paramétrique tu vois, ou est-ce que je vais utiliser Mac ou PC ou une souris heu avec fil ou sans fil* » [MOR-544]. « *C'est encore autre chose tu vois. Parce qu'au fond, de nouveau c'est pas la souris, c'est pas le Rhino, c'est les questions que tu te poses ou pas.* » [MOR-660].

Là où l'architecte doit développer sa créativité à l'heure actuelle, c'est dans sa capacité à identifier des paramètres pertinents pour développer le projet, d'une part au niveau du contenu, c'est-à-dire des contraintes qui sont prises en compte pour forger le projet comme l'évoque le propos précédent et, d'autre part, dans la manière dont ces paramètres sont retranscrits pour nourrir le projet. En effet, les paramètres à considérer dans les premières phases de la conception sont en train d'évoluer. Concrètement, cela se traduit chez LASSA par des croquis à la main qui permettent de mettre en place les premières lignes directrices du projet, qui seront alors traduites mathématiquement pour devenir des contraintes dans la définition algorithmique. Chez A2M, cela se traduit par une réflexion cognitive en amont de la modélisation mais sans support particulier. Au niveau du contenu, un des architectes explique que « *maintenant, quasi tout le temps, on met deux trois choses qu'on a envie d'office. Par exemple des règles, on a dit voilà on veut que tous les logements qu'ils aient au minimum une heure de soleil le 21 décembre, donc solstice d'hiver. Heu ben avant on utilisait Chronolux, bien maintenant c'est d'office Ladybug.* » [MOR-552]. Les outils de modélisation paramétrique permettent ainsi d'aller plus loin que les indicateurs couramment utilisés (ombrage, programme par exemple) et permettent ainsi aux architectes de concevoir des atmosphères notamment en fonction de flux (énergétique, lumineux, de

déplacement de personnes,...) dont ils peuvent réellement manipuler les données.

De la même manière, et plus fondamentalement, là où l'expertise de l'architecte intervient, c'est dans le choix de recourir ou non à l'outil. Il y a, dans l'usage du binôme dessin/CAO traditionnelle, un usage routinier et évident qui s'est installé et qui n'est à présent plus remis en question à chaque projet. En effet, l'architecte ne s'interroge plus, ou très rarement, quant à la pertinence de recourir au numérique pour soutenir son processus. Cependant, il en est actuellement autrement quant à l'utilisation d'outils de modélisation paramétrique. Il semble que le concepteur, fort de son expertise, requestionne perpétuellement l'usage d'un logiciel paramétrique pour poser un choix qui, tout du moins, semble mûrement réfléchi.

Comme le souligne un des architectes, cette possibilité d'accéder à une forme de flexibilité à un coût car la modélisation est « *assez lourde à mettre en œuvre* » cependant, « *la faire évoluer ça ça aurait pris beaucoup plus de temps donc l'énergie elle était répartie* » [R1-221, 223]. Les propos recueillis indiquent bien que l'architecte reste maître de la démarche et juge de l'intérêt de cette démarche, notamment au vu du ratio temps investi/retombées financières comme le souligne un de nos architectes experts de la modélisation [R1-343,348]. On entrevoit ici une notion de gestion du temps qui peut être réparti différemment en fonction du niveau de maîtrise de ce nouveau processus et qui redéfinit de la sorte, tout du moins en partie, le processus de conception.

Ce processus de conception se voit également impacté par l'exploration morphologique et la possibilité de tester une diversité de variantes dans un processus *see-transform-see* revisité qui « *comment dire ça, aller plus vite plus loin, et d'explorer plus de possibilités. Et parfois ça donne des surprises, tu dis "ah, wow, ça c'est encore mieux". Donc souvent on part d'une intention de base, un peu comme, enfin tu fais de l'archi donc on dit tiens on va vite orienter un thème ou tiens, on va, par intuition tu vois un peu.* » [MOR-516] tel qu'observé dans le projet [A_FH].

Les résultats issus de nos différentes phases de recherche permettent de questionner les pratiques d'architectes allant du non-initié à l'expert en modélisation paramétrique. Ces constats rejoignent certaines recherches tandis

qu'ils alimentent également de nouvelles hypothèses. Nous discutons nos points de vue à la section suivante.

CHAPITRE 5

DISCUSSION

Après avoir développé les résultats issus de nos recherches, nous structurons notre discussion en sept sections. Nous commençons tout d'abord par introduire la discussion en récapitulant le développement de cette thèse et en repositionnant nos résultats en regard des questions de recherche que nous avons formulées à la section 1 du chapitre 3. Nous positionnons à la section 2 les outils de modélisation paramétrique en regard de la théorie de la socio-matérialité. Nous envisageons ensuite à la section 3 la modélisation paramétrique comme une approche de la conception architecturale par le *processus*, plutôt que comme une approche par l'artefact. Cette posture ayant été définie, nous abordons à la section 4 les itérations observées entre outil d'assistance à la conception et outil d'assistance à la représentation. Ces spécificités nous amènent à discuter la recherche formelle soutenue par ces outils et comment ce type de modélisation est valorisé par les architectes. Finalement, nous discutons en quoi les différents niveaux d'expertise peuvent jouer un rôle dans l'adoption ou non des outils de modélisation paramétrique.

1. Préambule à la discussion

Cette thèse s'est attelée, au travers du Chapitre 1, à mettre au point les balises contextuelles qui ont fait émerger la problématique générale pour ensuite établir les fondements théoriques nécessaires pour mieux cerner les enjeux de la modélisation paramétrique. Le Chapitre 2 s'est quant à lui développé autour de trois thématiques centrales que sont le processus de conception, le développement des outils de modélisation paramétrique et leurs caractérisations, et enfin la théorie des organisations. Ce chapitre a ainsi contribué à la formulation des questions de recherche dans le Chapitre 3, qui énumère ensuite les diverses méthodes sur lesquelles nous nous sommes appuyés. Le Chapitre 4 présente les résultats issus des méthodes mises en œuvre, et focalise son étude sur les enjeux cognitifs et organisationnels associés aux pratiques paramétriques observées dans les petits bureaux d'architecture rencontrés.

Les résultats permettent tout d'abord de définir un panorama global des pratiques numériques belges en architecture (section 1, chapitre 4). En connaissance de ces pratiques numériques, nous avons interrogé les perceptions *a priori* vis-à-vis de l'usage de la modélisation paramétrique (section 2, chapitre 4). Nous avons ensuite observé comment ces perceptions *a priori* évoluent à l'issue d'une journée de formation (section 3, chapitre 4). Finalement, nous avons analysé les stratégies d'adoption observées dans des bureaux d'architecture de petite taille afin de définir les pratiques émergentes et les enjeux associés en ce qui concerne l'intégration des outils de modélisation paramétrique dans la pratique architecturale quotidienne des PME (section 4, chapitre 4). L'enchaînement de ces différents terrains, s'affinant en regard de l'expertise des architectes interrogés, est résumé par le schéma à la figure 57.

Ce présent chapitre clôture notre étude en discutant les différents positionnements qui se dégagent à travers les résultats obtenus et qui nourrissent ainsi l'état des réflexions et les connaissances sur les pratiques paramétriques des petits bureaux d'architecture.

Nous ne listons pas de manière exhaustive les aspects positifs et négatifs de l'usage d'outils de modélisation paramétrique, ceux-ci étant semblables voire identiques à ceux décrits dans la littérature pour les outils de CAO traditionnels

(voir Leclercq, 2005 ; Elsen, 2011; Safin, 2011). Nous nous concentrons davantage sur des caractéristiques qui ont été identifiées et formulées dans le contexte spécifique de la conception paramétrique, revenant ainsi plutôt à des notions telles que le *negative premature fixation*, le *circumscribed thinking*, ou encore le *see-transform-see*, qui semblent influencer plus fondamentalement le processus de conception.

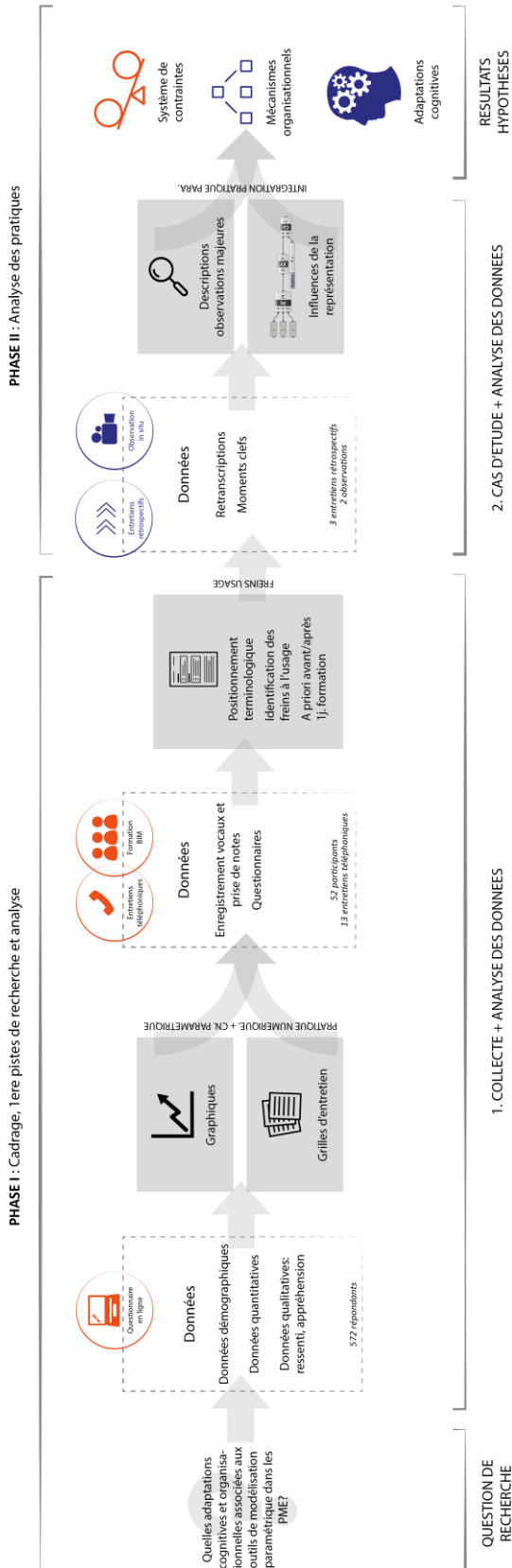


Figure 57. Résumé des terrains d'étude

Nous présentons en un tableau les questions de recherche en regard des résultats obtenus (table 10). Nous mettons ainsi en évidence les thématiques sur lesquelles nous pouvons nous positionner et celles qui nécessitent des recherches complémentaires.

Table 10. Etat des lieux des questions de recherche : à gauche, les QR ; à droite, le résumé des principaux résultats

Thématique 1. Le contexte numérique général	
Comment les architectes utilisent-ils les outils numériques en général ? Quelles sont les combinaisons de logiciels les plus utilisées? En quoi les architectes considèrent-ils que ces outils ont complexifié leur pratique architecturale ?	<ul style="list-style-type: none"> • Données démographiques sur les architectes belges, dont la taille des bureaux • Usage des outils numériques : typologie d'outils, influences sur le processus • Identification des représentations mentales existantes vis-à-vis des outils numériques
Thématique 2. Postures des architectes vis-à-vis des outils de modélisation paramétrique	
Les architectes manifestent-ils de l'intérêt pour les outils numériques et plus particulièrement pour les logiciels de modélisation paramétrique ? Comment la modélisation paramétrique est-elle perçue ? Quelles sont les postures des architectes vis-à-vis de cette typologie d'outils ?	<ul style="list-style-type: none"> • Identification des degrés divers de compréhension de la modélisation paramétrique et de ses potentialités • Intérêts pour ces outils • Types d'usage • Influences perçues de ces outils sur le processus
Thématique 3. Approfondissement des perceptions <i>a priori</i> et de l'appréhension vis-à-vis de la modélisation paramétrique	
D'après les architectes, dans quelle mesure les outils de modélisation paramétrique influencent-ils, voire déterminent-ils l'architecture conçue ? Quelles différences existe-il entre les perceptions à ce sujet et les observations dans des pratiques existantes ?	<ul style="list-style-type: none"> • Identification des facteurs d'influence à l'utilisation (apprentissage, maîtrise processus, recherche formelle, contexte professionnel, typologie, collaboration) • Evolution de l'appréhension après une journée de formation
Thématique 4. Diversité des pratiques paramétriques	
Comment les outils de modélisation paramétrique, mais aussi les représentations qui y sont liées, s'articulent-ils dans leurs usages tout au long du processus de conception de l'artefact ? Quels sont les étapes et mécanismes du processus de conception influencés par l'utilisation d'outils de modélisation paramétrique?	<ul style="list-style-type: none"> • Structuration du passage entre représentation mentale et externe • Allers-retours entre support de représentation et support de conception • Complémentarité des outils pour la représentation technique de l'artefact • Impacts sur le processus de conception
Thématique 5. Portée et intérêt du processus de modélisation paramétrique	
Compte tenu des spécificités des outils de modélisation paramétrique, quelles sont les raisons qui poussent les concepteurs à y avoir recours ?	<ul style="list-style-type: none"> • Importance de la formulation du problème plutôt que l'outil à tout prix • Gestion de la recherche formelle

2. Les outils de modélisation paramétrique vus par la théorie de la socio-matérialité

Au travers de la section 3 du chapitre 2 sur la théorie des organisations, nous avons retenu deux théories majeures que sont le déterminisme technologique et la théorie de la socio-matérialité. Ces deux théories abordent la place de la technologie dans une organisation de manière divergente, la première considérant que la technologie détermine les usages qui en sont faits tandis que les utilisateurs s’y contraignent ; la seconde attribuant quant à elle à la technologie certains présupposés tandis que le contexte social joue un rôle fondamental qui doit être pris en compte.

Considérant ces différentes approches, nous pouvons dire que les outils de modélisation paramétrique ont aujourd’hui tendance à être perçus au travers du déterminisme technologique par les novices étant donné le style architectural particulier qu’ils imposeraient. Cependant, les études que nous avons menées auprès d’experts nous poussent à nous positionner dans un second temps en faveur de la théorie de la socio-matérialité. Nous discutons ces points de vue.

La plupart des novices interrogés se rallient à des propos tels qu’exprimés par deux des architectes interrogés, avançant que les outils inculqueraient d’office un certain style architectural. Nous avons en effet pu mesurer, notamment au travers du questionnaire diffusé à tous les architectes et ingénieurs-architectes (chapitre 4 section 1) et ensuite via les formations d’une journée (chapitre 4 section 3), que la culture numérique a un impact majeur sur les a priori que les novices non-utilisateurs de la modélisation paramétrique peuvent se forger. Ils l’attribuent ainsi sans hésitation au style architectural propre à des ouvrages de grande envergure et conçus par des bureaux d’architecture de renommée internationale, sans commune mesure avec leurs pratiques personnelles. Ils recensent notamment trois architectes de renom, Zaha Hadid, Frank Gehry et Foster and Partners, pour représenter leur vision de l’architecture issue d’outils de modélisation paramétrique. Dans cette vision, la technologie serait déterminante en termes d’architecture générée tant formellement que symboliquement.

Cependant, les résultats connexes issus des entretiens rétrospectifs et des observations de projets développés par des bureaux ayant une certaine expertise du paramétrique (section 4, chapitre 4) ont démontré que le contexte et l'expertise de l'architecte ont une importance non négligeable, influençant le recours non systématique au paramétrique. Cette approche correspond davantage à la théorie de la socio-matérialité défendant une posture qui attribue à la technologie certains présupposés, tandis que le contexte et ici, le projet, le client et l'expertise par exemple, jouent également un rôle fondamental.

Cette approche théorique permet ainsi de repenser l'usage des technologies, celles-ci n'étant pas considérées comme de simples instruments mobilisés par les humains pour arriver à leurs fins, ni déterminants de l'action humaine. Cette approche situe les technologies plutôt comme des actants contribuant pleinement à l'évolution du processus de conception, à l'acquisition de compétences ou à la prise de décisions.

Nous n'envisageons plus les outils paramétriques comme influençant un style architectural nouveau mais nous identifions ici plutôt une approche que nous caractérisons d'approche par le processus, plutôt que par la forme.

3. Une approche par le processus

Comme nous avons pu le développer dans la section 2.3 du chapitre 2, en modélisation paramétrique le concepteur doit modéliser non seulement l'artefact conçu mais aussi une structure conceptuelle qui guide la variation (Aish & Woodbury, 2005; Kolarevic, 2005). Cette approche exige du concepteur qu'il élabore une étape intermédiaire entre l'idée et la conception, à savoir la définition algorithmique qui constitue une représentation symbolique ou abstraite du modèle. Dans cette étape, le concepteur produit la description algorithmique de l'artefact qu'il s'est représenté mentalement, incluant la logique et les relations entre les paramètres d'entrée et les opérations géométriques dépendantes. C'est par l'intermédiaire de cet algorithme que l'ordinateur génère le modèle numérique. Par conséquent, ce fonctionnement précède la forme, ce qui indique un passage fondamental de la modélisation d'un « objet » conçu à la modélisation de la « logique » de son design (Leach, 2009 cité par Dino, 2012). Si la définition algorithmique produite est le processus, alors l'architecte ne se contente plus de concevoir un bâtiment mais il conçoit également le processus. Cela permet ensuite à l'architecte d'explorer des hypothèses de conception d'une manière inconcevable par des approches de conception et de modélisation traditionnelles (Aish & Bredella, 2017).

D'ordinaire dans les logiciels de CAO « traditionnels », les modèles sont fondés sur des connaissances implicites plutôt qu'explicites, associant généralement le manque de formalisation des connaissances génératives et évaluatives à l'intuition et à la créativité (Oxman, 2006). La modélisation paramétrique repose quant à elle sur la capacité à formuler, représenter et interagir avec des représentations explicites de la connaissance mais représentant cette fois le projet de manière abstraite. Nous ouvrons ici une réflexion subséquente : les outils de modélisation paramétrique, faisant appel à des modes de visualisation alternatifs, pourraient-ils créer une certaine ambiguïté propice à la pensée créative ? Avant d'y revenir dans les sections suivantes, nous cernons d'abord les enjeux liés à ce mode de représentation et revenons sur le concept d'affordance.

Bien que l'univers des médias architecturaux se soit diversifié, les représentations graphiques et numériques ont continué de figurer l'artefact sous le même paradigme représentationnel, mais à travers des outils différents.

Le modèle numérique plus précisément, issu d'outils numériques traditionnels, est ainsi généralement envisagé à différents degrés comme un support de travail dont les modes de communication n'ont que peu évolué. Ce positionnement avait poussé Derycke (2012) à considérer qu'il n'y a pas encore eu de réelle remise en question de la représentation architecturale dans sa dimension *paradigmatique*, s'appuyant sur les propos d'Estevez pour avancer que les systèmes de projection de dessin par des représentations graphiques bidimensionnelles n'ont fait l'objet d'aucun changement majeur, indiquant ainsi que « *nous n'avons pas encore assisté à une "transformation des codes culturels de la représentation"* » (Estevez, 2001, p.105 cité par Derycke, 2012, p.3). Or ici, la modélisation paramétrique remet en question le contenu de la représentation ou du moins une partie de celle-ci. Cette typologie d'outils marque donc le passage de la représentation du résultat du processus à une description du processus en lui-même.

Les outils de modélisation paramétrique, de par leur fonctionnement intrinsèque, ont effectivement forcé les concepteurs à quantifier dès le départ leur conception en composants et en associations de composants pour générer des variations qu'ils aimeraient explorer davantage dans la suite du processus (Salim & Burry, 2010). La présence de cette représentation intermédiaire nous pousse à établir un parallèle avec le concept d'affordance défini par Gibson (explicité au chapitre 2 section 1.5.2). Les représentations externes, c'est-à-dire la manière dont est présentée l'information, influencent en effet le comportement des concepteurs et l'interprétation qui en est faite, à l'image de la poignée de porte qui peut suggérer le sens d'ouverture. Ainsi, nous associons ce concept à l'existence même de la représentation symbolique offerte par les outils de modélisation paramétrique : la présence de cette représentation impacte effectivement la pensée du concepteur et le pousse à « penser le processus » plutôt que la forme finale. Ceci nous invite ensuite à insister sur deux notions fondamentales qui en découlent : l'explicitation forcée et précoce et la personnalisation de la définition algorithmique.

L'explicitation forcée et précoce exige une certaine forme d'intentionnalité de la part du concepteur, infligeant un changement du processus de conception (Foster & Partners, 2006 ; Dino, 2012 ; Oxman & Oxman, 2014). Ce fonctionnement lui impose de générer l'algorithme avec beaucoup de précision avant de pouvoir entamer l'exploration paramétrique. En effet, les principes

algorithmiques qui sous-tendent les modèles paramétriques fonctionnent de manière relativement rigide, de sorte que le changement ne peut être accepté que s'il s'inscrit dans la définition du problème traité. Une reformulation drastique du problème ou une mauvaise anticipation des paramètres, nécessitant une modification notable de l'algorithme, peut provoquer la remise en question complète du modèle paramétrique, ce qui représente une tâche particulièrement coûteuse (Gerber, 2007, cité par Dino, 2012 ; Smith, 2007 ; Davis et al., 2011b). De plus, au fur et à mesure que la structure de la définition algorithmique devient complexe, sa flexibilité et sa capacité à s'adapter à l'évolution des contraintes et des exigences s'en trouvent réduites.

Dès lors, pour qu'un concepteur tire parti efficacement d'un logiciel paramétrique, il doit anticiper les différentes directions que le projet peut prendre afin de programmer les géométries et leurs relations les unes avec les autres (Smith, 2007; de Boissieu, 2013). Nous avons pu l'observer très clairement au moment [A_C_1] au cours duquel le concepteur fait preuve d'une attitude proactive en anticipant des choix morphologiques potentiels. Par ce biais, le logiciel paramétrique augmenterait la complexité de la tâche du concepteur au moment d'entamer le processus de modélisation (Aish & Woodbury, 2005).

On pourrait ainsi considérer que cette définition précoce du champ exploratoire est un frein à la créativité. En effet, ce processus peut en quelque sorte limiter la découverte créative si une refonte majeure du modèle est nécessaire mais s'avère impossible, par manque de temps par exemple. Dans ce sens, Kilian (2006 cité par Dino, 2012) identifie comme un risque le fait que l'approche de modélisation paramétrique puisse geler prématurément la conception en raison des investissements précédemment réalisés dans la définition paramétrique, plutôt que de soutenir une exploration plus détaillée dans les phases ultérieures de la conception. Ce phénomène correspond à la notion de *negative premature fixation* associée à de nombreux outils de conception numérique.

Cette restriction rejoint le phénomène de *circumscribed thinking*, à savoir que le concepteur est influencé par les limites de l'outil, ou en tout cas les limites de l'outil qu'il s'impose étant donné son niveau d'expertise éventuellement bas, comme l'indique un architecte au sujet des outils de CAO traditionnels : « *la créativité [...] est cadrée car on agit dans les limites de ce*

qu'on sait faire avec le programme » [extrait du questionnaire en ligne]. Ce phénomène est semblable pour les outils de modélisation paramétrique si l'expertise ou si l'anticipation n'a pas été suffisamment prise en compte. C'est pourquoi les architectes rencontrés dévouent un temps considérable en amont de la modélisation paramétrique à la détermination des objectifs et contraintes majeures du projet et à la définition d'une structure conceptuelle claire de l'artefact à modéliser. Les architectes réduisent et anticipent de ce fait, au travers de réflexions via des outils alternatifs aux outils de modélisation paramétrique, les changements majeurs qui pourraient survenir et qui peuvent être intégrés dès le départ.

Par conséquent, la modélisation paramétrique offre dans un premier temps une zone exploratoire restreinte ne permettant pas de générer de réelles variations conceptuelles, comme l'ont souligné Iordanova et ses collègues (2009). Tandis que les outils de CAO traditionnels poussaient les architectes à utiliser des bibliothèques d'éléments préprogrammés les restreignant matériellement à concevoir une architecture standardisée, limitée par les possibilités de dessin, les outils de modélisation paramétrique semblent plutôt limiter l'architecte par la diversité des possibles à restreindre afin d'être exploitable. Le concepteur se voit alors contraint d'envisager préalablement les changements qui devront être opérés au cours du processus. Cette anticipation fait appel à de nombreuses compétences afin que celle-ci soit pertinente et exploitable, engendrant une surcharge cognitive importante.

Cette anticipation est en partie influencée par l'expertise du concepteur qui, par ses acquis, va envisager tel ou tel type de changements préalablement ou va favoriser tel ou tel « chemin » connu et mieux maîtrisé pour construire la définition algorithmique. Ces choix du concepteur nous amènent à discuter la deuxième notion fondamentale qu'est la personnalisation d'une définition algorithmique.

Tandis que l'on reprochait au dessin à main levée son caractère personnel induisant une forme d'altération de la lecture par autrui, la lecture d'une définition algorithmique est confrontée à cette même individualité. Pour soutenir ce point de vue, il nous faut revenir aux recherches de Yu et ses collègues (2015) qui avancent que les concepteurs semblent utiliser les composants qui leur sont familiers, affectant à l'algorithme une coloration personnelle. Nos observations *in situ*, ainsi que les entretiens avec des experts

[R1 et R3] nous permettent de confirmer l'existence de la propriété du modèle avancée par Smith (2007) et définie comme un « droit d'auteur unique » par Laiserin (2009).

Ce phénomène est renforcé par le fait que le concepteur va avoir tendance à recourir à des définitions algorithmiques qu'il maîtrise afin de restreindre la charge mentale que la génération précoce de la définition algorithmique requiert.

Par ailleurs, tandis que les représentations générées via le papier-crayon sont floues et personnelles, celles-ci permettent néanmoins de garder les traces du processus réflexif (cfr. section 1.4.2.1 du chapitre 2). La CAO traditionnelle a quant à elle abrogé toute forme « directe » de retour à l'historique, à moins que des enregistrements de versions successives soient réalisés. La modélisation paramétrique se rapproche quant à elle du processus réflexif via papier-crayon en permettant de revenir sur des propositions formulées antérieurement, et ce de manière claire par la re-génération, via la modification des paramètres, de l'instance antérieure désirée.

Cependant, les outils paramétriques ne permettent généralement pas encore de conserver une représentation complète et historiquement fidèle de toutes les itérations, des essais-erreurs et des possibilités testées, à savoir la capture générale du *design rationale*. Cette capture exhaustive permettrait de retracer en bonne partie le cheminement décisionnel menant à l'artefact final et, dès lors, de communiquer le raisonnement et l'argumentation qui sous-tendent le processus de conception. Nous suggérons à ce stade qu'un tel accès à l'historique du projet se ferait à l'avantage de la pratique paramétrique, étant donné le potentiel que cet accès représente pour la valorisation du processus réflexif des concepteurs.

4. Itération entre outil d'assistance à la conception et outil d'assistance à la représentation

Certains auteurs, dont nous faisons partie, n'ont pas pour ambition de formuler une nouvelle hypothèse explicative des phénomènes de la conception mais tentent de modéliser les processus qu'ils observent afin de mesurer l'impact d'un facteur identifié, tel que l'introduction d'un nouveau type d'outil d'assistance dans notre cas.

Afin de discuter l'impact des outils de modélisation paramétrique sur le processus de conception, nous repartons des recherches de Won (2001) sur la distinction des phénomènes cognitifs stimulés lors de la génération de concepts via l'utilisation d'un ordinateur d'une part, et du dessin à main levée d'autre part. Cette recherche suggère que le comportement cognitif d'un concepteur qui utilise le dessin à main levée pour générer des concepts est plus simple que celui de l'utilisateur d'un ordinateur. En effet, Won présente le processus de dessin comme une réflexion mentale, générant une image qui va elle-même engendrer une phase réflexive et ainsi de suite jusqu'à ce que la tâche soit achevée. Ce processus laisse le temps de prendre connaissance du terrain, de tergiverser et de tester différentes pistes de réflexion. Le comportement cognitif est par contre plus complexe au cours d'un processus informatisé. Celui-ci se déroule selon le même schéma qu'avec le dessin à main levée mais de manière beaucoup plus intense, à savoir que les itérations entre la phase réflexive et le dessin sont plus fréquentes. Si la CAO « traditionnelle » semble avoir déjà intensifié les itérations, nos résultats rejoignent les recherches de Burry (2011) et nous permettent de considérer que les outils de modélisation paramétrique peuvent, quant à eux, intensifier davantage ces itérations selon les besoins et objectifs du concepteur.

Au-delà de ces possibilités d'itérations, les outils sont généralement utilisés tantôt comme des outils d'assistance à la représentation, tantôt comme des outils d'assistance à la conception. Nous avons pu observer un troisième cas d'usage des outils de modélisation paramétrique, soutenant le passage entre représentation et conception.

Ce cas d'usage n'est pas encore généralisé dans les pratiques que nous avons pu interroger. En effet, nous établissons que la modélisation paramétrique peut servir uniquement pour la re-représentation d'une image

interne, soit pour représenter une idée précise difficilement représentable avec un autre outil de manière efficace, soit pour représenter une idée précise dont certaines mesures sont encore variables et qui devront être ajustées. Cette variante dans l'usage a par exemple pu être observée dans le projet développé par l'expert du bureau SUBSTRA, lors de la modélisation d'une toiture dont il avait défini préalablement et précisément les contraintes et paramètres à faire varier. L'enjeu dans ce cas-ci est de soutenir la prise de décision et non d'expérimenter d'autres possibilités formelles. Dans ce cas, la modélisation paramétrique ne traduit pas l'externalisation d'une idée en gestation mais plutôt la représentation d'un artefact mentalement cerné, en tout cas dans ses aspects essentiels.

Cependant, les architectes recourent parfois à la modélisation paramétrique dans une dynamique différente. Etant donné les cas observés, nous construisons donc un modèle de conception à partir du troisième cas d'usage, intégrant cet aller-retour entre assistance à la conception et assistance à la représentation. Nous soulignons encore ici que ce modèle découle des observations que nous avons menées, révélant l'émergence d'appropriations propres aux PME, et non d'un idéal théorique d'utilisation des outils de modélisation paramétrique.

La construction de ce modèle nous amène à reconsidérer et à compléter les quatre typologies de modèles de conception proposées par Blessing, schématisées à la figure 58 et présentées à la section 1.1 du chapitre 2.

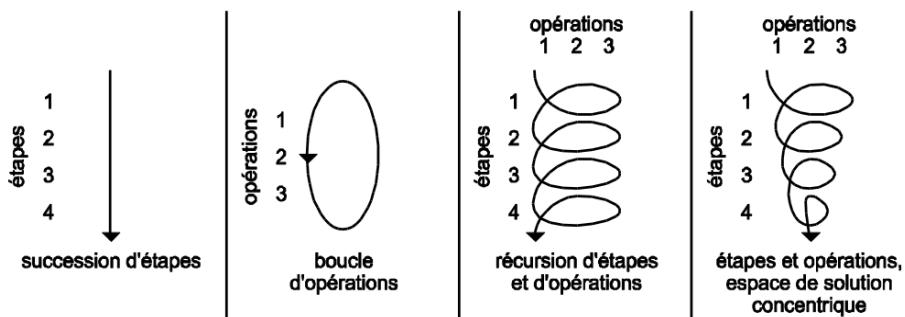


Figure 58. Typologies des modèles de conception d'après Blessing (1995)

Notre modèle (figure 59) est constitué d'un processus en deux temps, au sein duquel la durée des phases est aléatoire et dépend de la méthode de travail de l'architecte, comme l'évoque un des experts interrogés qui, avant d'entamer la modélisation paramétrique, utilise le dessin à main levée « *sur une période la plus longue possible, ça dépend de la deadline mais si on a du temps, c'est quelque chose qu'on va laisser un peu mûrir* » [R2-174]. Le passage d'une phase à l'autre est réitéré autant que nécessaire, par exemple de manière à surmonter chaque difficulté rencontrée dans le développement de la définition algorithmique.

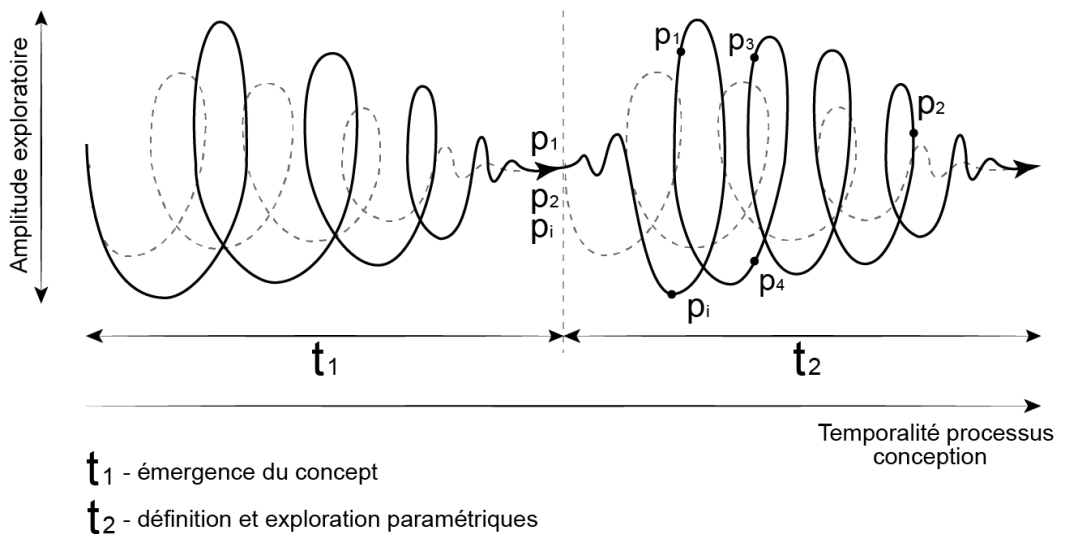


Figure 59. Modèle de conception via des outils de modélisation paramétrique (en trait plein)

Dans notre proposition, la première phase de réflexion itérative (t_1 – émergence du concept) est supportée par un ou plusieurs médias dits « traditionnels » qui permettent de structurer les contraintes majeures du projet et de les transcrire en contraintes qui seront intégrées à la modélisation paramétrique. Cette phase fait partie intégrante de la conception paramétrique du projet qui débouchera sur la modélisation paramétrique en tant que telle dans la phase suivante. Tandis que Dino (2012) souligne le fait que la modélisation paramétrique demande de l'intentionnalité et de l'anticipation, pouvant dériver jusqu'au phénomène de *circumscribed thinking*, nous

percevons dans cette contrainte plutôt une opportunité pour le concepteur de recourir à d'autres médias pour soutenir sa réflexion. C'est lors de - et par - cette phase t_1 , que l'architecte expert semble répondre aux exigences des outils de modélisation paramétrique, qui le poussent par ailleurs à élargir son champ d'exploration dès le départ et à approfondir sa réflexion afin d'anticiper les potentielles variations futures.

Cette phase est jugée convergente car le(s) architecte(s) travaille(nt) pour définir les lignes de conduite du projet et ainsi les paramètres d'entrée p_i de la définition algorithmique, réduisant d'une certaine manière, pour un temps, le champ exploratoire. L'amplitude exploratoire de cette phase est cependant jugée plus large que le champ qui pouvait être couvert lors que la manipulation d'un outil « traditionnel » pris isolément, car l'architecte, qu'il soit expert en modélisation ou ayant une bonne connaissance de son fonctionnement, prend désormais en considération les potentialités décuplées par la modélisation paramétrique pour laisser libre cours à son imagination. Ce que le concepteur s'autorise à se représenter mentalement s'inscrit donc dans un champ plus vaste. Par ailleurs, comme nombreux chercheurs le soulèvent, le soutien numérique qui intervient dans un second temps octroie aux architectes d'explorer mentalement et de se représenter des artefacts qui vont au-delà de leurs propres compétences en dessin (Kolarevic, 2003; Lee, Gu, & Williams, 2014). Le recours aux outils de modélisation paramétrique « *n'éradique pas l'imagination humaine, mais en étend plutôt les limites potentielles [...] il fournit les moyens d'exploration, d'expérimentation et d'investigation dans un domaine alternatif* » (Terzidis, 2003, p.206, traduction personnelle).

La seconde phase (t_2 – définition et exploration paramétriques), se distingue de la première par les outils utilisés. Le concepteur s'attèle désormais à générer la modélisation paramétrique en tant que telle. Cela ne signifie pas que cette phase est en rupture avec la première, mais s'inscrit bien dans sa continuité. Cette seconde phase est plus intense dans son itération et est rythmée par la mise en place des paramètres p_i qui ont été définis et leurs variations. Ces ajustements, sollicitant de nouvelles réflexions, incitent une modification de la définition algorithmique et ainsi de suite, pouvant même repasser par la phase t_1 , afin d'affiner certaines idées jusqu'à aboutir à une proposition d'artefact satisfaisant au mieux les objectifs fixés dans le cadre d'un projet spécifique. En cela nous positionnons l'usage des outils de modélisation paramétrique dans un

processus d'allers-retours, oscillant entre usage spéculatif et descriptif tels que décrits par Claeys (2013, cfr. section 1.4.1, chapitre 2). Cette phase débute en partant d'un état intermédiaire, soit d'une représentation interne, soit d'une représentation ayant été externalisée via d'autres outils. En cela, le commencement de cette seconde phase rejoint les propos de Kilian (2006, cité par Dino, 2012) pour qui la modélisation paramétrique offre une zone exploratoire restreinte. Nous allons plus loin en précisant que cette zone dite « restreinte » est liée à l'existence d'une image mentale qui se construit et se dessine petit à petit. Partant de là, l'architecte-expert entame alors la définition algorithmique dans un champ exploratoire effectivement limité aux paramètres prédéfinis. Cette phase diverge ensuite (Iordanova & al., 2009), ré-ouvrant le champ exploratoire étant donné le foisonnement cognitif occasionné par la génération de variations. In fine, cette phase est convergente dans son ensemble puisqu'elle aboutit au choix et à l'ajustement d'une instance unique. A nouveau, l'amplitude des boucles itératives est plus importante que dans un processus itératif traditionnel de CAO par exemple (représenté en pointillé), car la modélisation paramétrique offre un élargissement de l'espace conceptuel. Dans ce cas, les ordinateurs ne sont plus de simples outils de dessin ou de construction de modèles, mais bien des sources de représentations qui permettent aux concepteurs d'acquérir de nouvelles connaissances et d'élargir les frontières de l'espace « solutions » envisagé et ensuite exploré.

Cette approche impacte ainsi le processus de conception plus profondément que les outils de CAO traditionnels ne l'ont fait. L'observation des pratiques nous pousse à associer de nouveaux potentiels à l'usage de la modélisation paramétrique, notamment en termes de soutien à l'externalisation d'une image mentale, remplaçant l'exploration morphologique au cœur du processus. Il faut cependant souligner qu'il persistera une ambiguïté vis-à-vis de ce qu'il est effectivement possible de faire avec ces outils et leur appropriation réelle. Les potentialités théoriques pourraient en effet rester bridées, en fonction des représentations mentales que se sont forgés individuellement les architectes.

Comme le soulignent Chokhachian et Atun (2014), la conception paramétrique a changé le rapport au problème conceptuel, poussant ces auteurs à proposer un modèle pour représenter le processus de conception supporté par les outils de modélisation paramétrique. Tandis que leur modèle

fait évoluer celui d'Ostwald (2012) en y intégrant la notion d'outils, il n'intègre à ce stade que l'impact des outils numériques. Dans ce même ordre d'idée, Hudson (2010) a étudié le processus de conception paramétrique à partir de descriptifs publiés par de grands bureaux d'architecture. Il établit ainsi cinq approches stratégiques impliquées dans un processus, ne prenant en considération que l'emploi d'outils de modélisation paramétrique. Ainsi, le modèle que nous construisons va au-delà des propositions de ces auteurs, en intégrant la diversité des outils qui sont encore utilisés aujourd'hui comme le papier-crayon.

5. Vers une recherche formelle libérée

Nous nous appuyons sur le développement construit précédemment pour figurer schématiquement comment charge cognitive et exploration morphologique évoluent comparativement entre les outils de modélisation paramétrique et les outils de CAO traditionnels. Pour expliquer notre schéma (figure 60), nous partons de l'hypothèse que le concepteur peut faire usage de deux duos d'outils, à savoir tantôt le binôme dessin (sous-entendu à main levée) / outils de CAO traditionnels (outils de modélisation 2D ou 3D, non paramétriques), et tantôt le binôme dessin / outils de modélisation paramétrique. Cette hypothèse se justifie à partir de la littérature relevant l'importance du dessin et la présence de l'utilisation alternée avec la modélisation paramétrique (Sanguinetti & Abdelmohsen, 2007), confirmée par ailleurs à la section précédente et au travers de nos observations.

Nous établissons ce schéma selon deux axes : un axe vertical figurant le niveau de charge cognitive, tandis que le second axe vertical représente le niveau de cristallisation d'une idée, qui peut être faible ou fort et auquel nous associons un niveau d'exploration. Ce niveau d'exploration est élevé lorsque le niveau de cristallisation est faible, et inversement.

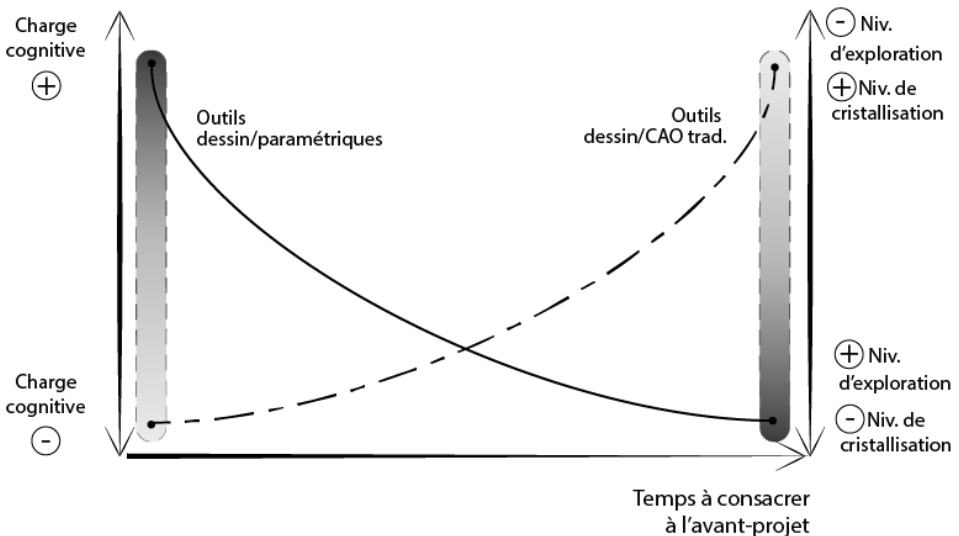


Figure 60. Comparaison du processus de conception supporté par le dessin/CAO traditionnelle et le dessin/modélisation paramétrique

Partant de ces postulats, le processus de conception débute par l'émergence et le développement d'une idée. Pour simplifier et caricaturer le processus supporté par le binôme dessin/outils de CAO traditionnels, l'idée est exprimée sur papier pour construire progressivement le projet, parfois d'abord de manière très floue, abstraite et conceptuelle par exemple à l'aide de croquis, d'esquisses. A ce stade, on peut considérer que la charge cognitive occasionnée par l'outil en tant que tel est relativement faible. Le projet n'est pas figé par l'outil utilisé car le dessin, et parfois les premiers tracés CAO, sont le lieu de développement d'une recherche exploratoire.

Le projet se construit alors progressivement, intégrant de plus en plus de contraintes, en précisant et en figeant au fur et à mesure les éléments. On génère ainsi, via le dessin ou la CAO, des représentations également plus précises et figées en affinant l'articulation des différentes vues du projet. On peut dès lors considérer que l'on « re-représente » davantage plutôt que l'on ne conçoit, cristallisant ainsi de plus en plus de décisions.

Parallèlement à cela, le processus de conception soutenu par le binôme dessin/outils de modélisation paramétrique débute également par une idée qui se voit « augmentée » des possibilités offertes par le paramétrique. Dès le départ, on peut considérer que la charge cognitive est importante, comme l'avancent Aish et Woodbury (2005) et Dino (2012), affirmant qu'il y a une augmentation de l'effort initial lors de la génération d'un modèle paramétrique. En effet, il est nécessaire de prendre en considération le plus d'informations possible et de les gérer cognitivement avant de pouvoir faire émerger une première définition algorithmique. Avant toute intervention paramétrique, un travail préalable interne doit donc être réalisé, parfois soutenu par un croquis schématique (cfr. moment [A_FH_13, 17, 19]) ou par un listing des paramètres à intégrer (cfr. entretien [R1-252 et R1-301]), ces représentations intermédiaires étant par ailleurs autant de moyens de faire diminuer la charge mentale le plus rapidement possible.

Une fois cette quantité d'informations intégrée cognitivement, le concepteur retranscrit ses représentations mentales, il « re-représente ». De ce fait, il génère (itérativement) une définition algorithmique qui constitue une certaine forme de représentation externe et abstraite de l'artefact. Cette définition va elle-même alimenter la génération par l'ordinateur d'une vue 3D de l'objet en cours d'externalisation. De cette phase de retranscription, on

entre alors dans une phase de conception au cours de laquelle la charge cognitive associée à l'outil diminue, permettant une phase exploratoire libérée des contraintes cognitives de départ. Le concepteur peut alors tester les variantes et modifier les sets de contraintes définies au départ, et ce dans une posture mentale relativement libérée et exploratrice. Le travail sur les variations au cours d'un processus de conception est une phase fondamentale dans la recherche d'une solution la plus adéquate possible, en réponse aux problèmes de conception identifiés, et ce afin d'améliorer la qualité de l'artefact conçu (Hernandez, 2006).

Via ces outils, le concepteur teste les différentes valeurs de paramètres et explore des variantes morphologiques, mais il peut également faire bouger les limites de l'espace d'exploration envisagé initialement. Cette recherche génère des instances qui permettent de préciser certains éléments, de figer certains paramètres et ainsi de suite jusqu'à figer le set de réglages générant l'instance jugée la plus satisfaisante étant donné le problème conceptuel à résoudre. Le concepteur a désormais « *la capacité d'étudier des variations subtiles sans être limité par la contrainte du dessin* » (entretien téléphonique 6-96).

La définition algorithmique et la représentation 3D qui lui est associée peuvent soutenir aussi bien un processus de *see-transform-see* revisité, que la sérendipité par des « surprises » inattendues émergeant parfois d'« erreurs » qui se voient ainsi supporter et favoriser la créativité, ou encore un champ exploratoire étendu étant donné les multiples possibilités d'exploration des variantes qui se dégagent.

En résumé, le mouvement semble s'inverser entre les deux binômes d'outils : la charge cognitive d'un processus de conception associée à l'usage du dessin et de la CAO traditionnelle est faible et évolue au fur et à mesure étant donné le niveau de cristallisation et d'accumulation important des idées et des données (zones gris clair), tandis que la charge cognitive du processus associé au dessin et à la modélisation paramétrique est très élevée pour ensuite libérer l'exploration morphologique (zones gris foncé). Nous suggérons que cet écart entre une charge cognitive de départ faible dans un cas, et forte dans l'autre, est difficile à outrepasser pour les architectes lorsque leur expertise ne leur permet pas de saisir la valeur ajoutée qui se dégage *in fine*, notamment en regard de l'ouverture du champ d'exploration.

En effet, par l'intégration d'une forme de visualisation abstraite qu'est la définition algorithmique, la modélisation paramétrique intègre une certaine forme d'abstraction qui, au vu de nos observations, est propice à la conception et à l'exploration morphologique. Cette exploration se verrait alors libérée par la génération même de la définition algorithmique, là où en CAO traditionnelle, le concepteur se sent contraint par les outils et là où le processus de modélisation relève davantage d'une fonction de re-représentation plutôt que d'exploration des possibles.

Dès lors, le concepteur qui avance dans son processus de conception à l'aide d'outils de modélisation paramétrique est parfois surpris par le résultat obtenu, allant au-delà de la première représentation qu'il s'en était faite (représentation interne) et provoquant ainsi des découvertes inattendues qui stimulent davantage la créativité de l'architecte. Cette attitude, qui peut être considérée comme un processus C-K supporté par les outils de modélisation paramétrique – processus nourrissant les connaissances du concepteur, qui nourrit le concept, nourrissant ses connaissances à nouveau - a été observée et est relatée par le fondateur de l'agence A2M (annexe 26). On revient à la notion de lâcher prise abordée par Bourbonnais (2015), l'utilisateur restant bel et bien l'unique responsable du processus et de la solution choisie, au-delà du support que l'ordinateur représente. Tel que nous l'avons avancé à la section 4 de ce présent chapitre, nous sommes désormais dans un processus *see-transform-see* à l'heure du paramétrique. Le processus défini par Schön (1983, décrit à la section 1.1 du chapitre 2) se voit ici « augmenté » d'une compétence propre à la modélisation paramétrique, et/ou à la présence d'un expert paramétrique.

En permettant d'agir selon des pistes qui n'auraient pas été initialement suggérées, ou en fonction d'interprétations que l'humain ne possède pas, les technologies peuvent en effet jouer un rôle important dans les directions prises par l'action. C'est en ce sens que les technologies, et les logiciels en particulier, peuvent développer chez les utilisateurs de nouvelles compétences (Tribout & Margier, 2018).

Ces différents phénomènes, *see-transform-see* « augmenté », gestion de la charge cognitive initiale, anticipation, sont autant d'éléments qui invitent à une expertise minimum du processus paramétrique. En effet, nos résultats ont montré que dans le cas contraire, une large proportion d'architectes non-initiés à la modélisation paramétrique l'associe à l'architecture dite non-standard

(section 1.3 du chapitre 4) et considèrent ainsi que l'utilisation d'outils de modélisation paramétrique engendre automatiquement un style architectural particulier. Ce positionnement doit être distingué de celui des experts qui y voient plutôt une approche par le processus, s'intéressant par ailleurs plus fondamentalement à la question posée plutôt qu'à l'outil utilisé pour y répondre, et considérant le paramétrique comme un moyen à utiliser au cas par cas en fonction des objectifs à atteindre et non comme une fin en soi.

Notre état de l'art a par ailleurs mis en lumière le fait que les outils paramétriques libéraient déjà la créativité de bureaux de renom (chapitre 1) et que, lorsqu'ils sont adoptés par les PME, ces outils de nouvelle génération ont des effets similaires sur leurs processus de conception. La transition vers ces outils est une étape plus importante et plus complexe à franchir pour les PME, mais elle a le potentiel de faciliter la liberté d'expression des concepteurs.

Cette expertise devient alors un élément différenciant dont les architectes de PME peuvent se servir pour valoriser leur processus réflexif. Nous discutons cet aspect à la section suivante.

6. La maîtrise du processus comme facteur différenciant

Par le passé, les processus de conception utilisés par le passé tels que l'utilisation du modèle funiculaire par Gaudi ou que tout autre processus d'auto-génération utilisé par exemple par Otto, ont permis à l'architecte de maîtriser le processus de génération de la forme et non directement la forme elle-même (Roussel, 2014). Dans de tels contextes, la forme se justifiait intrinsèquement en regard du processus de génération dont elle découlait, et non plus par une posture subjective et individuelle de l'architecte. Dès lors, lorsque le bâtiment faisait débat, l'architecte défendait le processus de conception utilisé et non le résultat final (Wendland, 2000).

En cela, le processus de modélisation paramétrique rejoint ces processus et pratiques déjà éprouvés. En effet, tandis que le livrable usuellement fourni via des outils « traditionnels » est la représentation de la modélisation de l'artefact, que celle-ci soit présentée sous la forme de plans 2D ou d'une maquette numérique 3D, celui-ci est, via les outils de modélisation paramétrique, accompagné d'une définition algorithmique, représentation du processus en lui-même, permettant notamment de communiquer l'artefact différemment et également de le justifier autrement.

En effet, le processus paramétrique permet aux architectes de prendre en considération de nombreux paramètres de nature diverse, plus complexe et précise qu'auparavant. Ces paramètres ne font plus seulement office de balises informatives mais guident et influencent réellement les variations morphologiques. L'architecte est maître du choix des paramètres et des contraintes, de tester les variables et de les ajuster en fonction du contexte, pour ensuite choisir l'instance la plus pertinente en lien avec le problème à résoudre.

La prise de recul nécessaire pour développer la définition algorithmique et la mise en avant du processus permettent à l'architecte de justifier la forme par une approche plus rationnelle que par des choix parfois purement esthétiques ou formels.

Cette notion nous amène à identifier au travers de nos cas d'étude trois raisons qui poussent les architectes rencontrés à faire usage d'outils de modélisation paramétrique, remettant ainsi en question les a priori vis-à-vis de

ces outils : (i) gagner en efficacité ; (ii) accéder à d'autres parts de marché et (iii) valoriser le processus réflexif.

La modélisation paramétrique peut tout d'abord, dans certains projets, simplement permettre à l'architecte de gagner du temps, sans remettre en question ou modifier fondamentalement son flux de travail habituel. L'expert du bureau SUBSTRA explicite sa pratique dans ce sens (section 4.1.1, chapitre 4).

La modélisation paramétrique peut par ailleurs permettre à certaines agences de petite taille d'accéder et mener à bien des projets de grande ampleur, généralement associés à de plus grandes agences. En effet, contrairement aux idées reçues, les plus petites structures, via le paramétrique, ont la capacité de prendre à leur charge des projets de plus grande envergure. Grâce à ces outils, les petits bureaux peuvent en quelque sorte abolir certaines barrières et accéder à une part de marché qui ne leur était pas réellement accessible avec les outils traditionnels, étant donné leurs moyens limités. C'est au travers du travail du bureau LASSA que nous avons pu prendre la mesure de cet élargissement des parts de marché (section 4.1.2, chapitre 4).

La modélisation paramétrique permet ensuite aux architectes de valoriser leur travail et la pertinence de leur démarche. Nous avons pu observer dans la pratique de A2M la mise en place de réunions « *live* », pendant lesquelles les acteurs présents évoquent et envisagent des pistes de solutions directement testées par l'expert. Ces modifications sont visualisées via projection sur grand écran. Ainsi, les acteurs peuvent rebondir rapidement, augmentant le nombre d'itérations à partir d'hypothèses communes, et commentent : « *donc tu concentres en deux trois heures ce que tu aurais mis en échange d'allers-retours pendant des semaines si tu veux.* » [MOR-606]. Cette démarche réintègre différents acteurs (clients, ingénieurs notamment) au cœur même du processus de conception pour discuter du processus plutôt que de la forme en tant que telle. De manière générale, la possibilité de prendre en compte les intérêts de différents acteurs au sein d'un processus est un facteur favorisant l'adoption de ces nouveaux outils (cfr. section 3 du chapitre 2).

Par cette collaboration étroite, les aspirations et exigences des différents acteurs sont davantage prises en considération ; le nombre d'intervenants tirant parti de la flexibilité de ce type de modélisation augmente, engendrant

implicitement davantage de reconnaissance pour le travail de l'architecte. Dès lors, cette collaboration pourrait permettre à l'architecte de retrouver une certaine forme de centralité dans le processus du projet, centralité parfois perdue ces dernières années avec le développement de multiples spécialisations.

Cette relation à la technologie modifie donc, au-delà du processus de conception, l'organisation du travail, voire l'évolution du métier. Les théories liées à l'influence d'une technologie sur des organisations sont discutées à la section suivante, et à la lumière de nos résultats.

7. Le métier d'architecte à l'aube d'un remaniement par l'expertise

Après avoir discuté comment le processus de conception évolue lorsqu'il intègre l'utilisation d'outils de modélisation paramétrique, et comment ces outils contribuent à la recherche morphologique et à la valorisation de ce processus, cette section aborde comment ces changements sont appréhendés à la lumière de l'expertise des architectes, rejoignant ainsi dans une certaine mesure les recherches menées par Chien & Yeh (2012).

Ce point de discussion rejoint également un questionnement soulevé par de Boissieu (2013, p.67) : « *la modélisation paramétrique comme nouveau métier ou comme extension de l'expertise de l'architecte ?* ». Pour nous positionner par rapport à cette question, nous remontons aux écrits de Chadoin (2006) pour qui la profession d'architecte persiste au-delà d'un réajustement de ses compétences et de ses missions. D'après lui, cette profession se caractérise par une « indétermination », permettant à l'architecte de redéfinir sa pratique en intégrant des compétences nouvelles (Chadoin, 2006, p.33). Ces compétences en constante émergence participent donc pleinement à l'*indétermination* de la profession d'architecte.

Notre positionnement s'inscrit dans le sillage de celui défendu par Chadoin, dans le sens où nous envisageons la modélisation paramétrique comme une expertise propre à la profession d'architecte, étant donné les enjeux, notamment de créativité, que ces outils permettent de redynamiser et de soutenir. Cependant, il est vrai qu'à mesure que les supports de conception numérique deviennent plus complexes et plus exigeants en termes de connaissances et de compétences requises, une nouvelle génération de spécialistes en conception numérique fait son apparition (Oxman, 2006). C'est particulièrement le cas aujourd'hui en regard des outils de modélisation paramétrique qui nécessitent des connaissances spécialisées, exploitées et maîtrisées par ceux que nous appellerons ici les « architectes experts » de la modélisation paramétrique. En effet, comme nous en discutons aux sections suivantes, nos résultats nous permettent de souligner l'intérêt d'une intégration de compétences spécifiques dans le giron de l'architecte, lui accordant à la fois l'expertise d'un architecte-concepteur et d'un architecte-modélisateur. Cette posture permet à la fois une anticipation pertinente de la définition algorithmique en envisageant l'évolution du processus de conception, et

également un dialogue structuré avec les différents intervenants, en regard des enjeux architecturaux. Nous discutons davantage ce positionnement aux sections suivantes en commençant par expliciter l'influence de la culture numérique sur les choix stratégiques et le positionnement d'un bureau d'architecture.

7.1. La culture numérique comme vecteur de dépassement

Notre enquête quantitative (section 1, chapitre 4) souligne le scepticisme des architectes quant à la valeur ajoutée offerte par les technologies numériques au processus de conception architecturale, et révèle que les architectes belges ne travaillent actuellement pas beaucoup avec des outils 3D « augmentés » de fonctions paramétriques car ils se sentent peu concernés par ces nouveaux outils d'aide à la conception. Ils les considèrent en effet davantage conçus pour - et plus adaptés aux - grands bureaux travaillant sur des projets à grande échelle. Les résultats de notre enquête montrent en effet que la moitié des concepteurs n'ont même jamais entendu parler du terme « modélisation paramétrique », alors que 87,5% d'entre eux déclarent ne pas utiliser d'outils paramétriques et un septième seulement des participants se sent concerné par l'arrivée de ce type d'outils.

Aish et Bredella (2017) discutent ce faible taux de maturité numérique au sein du domaine de l'architecture, domaine qui, d'après ces auteurs, semble résister au passage d'une technologie à une autre. L'implémentation tardive d'une technologie a pour conséquence que l'utilisateur ne peut profiter pleinement de cette technologie, tant celle-ci se voit déjà dépassée par une autre. De plus, la volonté de commercialiser des outils pour tous les profils d'acteurs du processus, indépendamment de l'activité et du contexte spécifique d'application, serait un vecteur augmentant leur complexité d'utilisation (Normal, 1998 cité par Safin, 2011). L'utilisation de ces solutions partielles semble piéger l'architecte dans l'utilisation d'un logiciel qui ne prend pas en charge toute l'étendue de la pensée et de la créativité architecturale (Aish & Bredella, 2017).

Par ailleurs, le manque de culture numérique, mesuré dans notre étude principalement par rapport aux connaissances des architectes vis-à-vis des outils de modélisation paramétrique (section 1.3, chapitre 4), confirme les

confusions déjà soulignées par Dino (2012) entre l'outil perçu comme porteur d'un style architectural et l'outil assimilé à une simple méthode de modélisation, confusions que nous avons éclaircies à la section 2.2 du chapitre 2. De Boissieu (2013) a quant à elle catégorisé la culture numérique générale comme l'un des savoirs essentiels pour la modélisation paramétrique. Elle a également indiqué que le niveau de connaissances vis-à-vis de ces savoirs a une influence sur la dissémination du paramétrique dans l'usage actuel.

Ceci étant, malgré ce faible taux d'adoption actuel, les résultats du questionnaire en ligne révèlent que les architectes seraient *a priori* tentés de s'initier à cette typologie d'outils plutôt que de la sous-traiter. Suite à nos observations *in situ*, nous émettons en effet l'hypothèse que l'expertise acquise par l'architecte dans ce domaine lui permettrait de développer une autre approche du processus de conception, complémentaire au processus « traditionnellement » déployé à travers les outils jusqu'alors à sa disposition. Si cette approche par le processus est explicitement assumée par l'architecte, elle lui octroie un champ exploratoire étendu, étant donné la phase du processus nécessitant de structurer ses représentations internes en vue de formaliser des contraintes qui sont transcrites dans la définition algorithmique sous forme de paramètres.

Cette approche met en exergue la reconfiguration potentielle de nouveaux modes d'action en lien avec les relations que ces technologies impliquent et génèrent. Les sections suivantes s'attèlent, depuis différents angles de vue, à nous positionner par rapport à cet enjeu.

7.2. Diversité des situations observées pour un panorama des pratiques paramétriques en architecture

La figure 61 présentée ci-après résume, d'après nos résultats, comment le niveau d'expertise des architectes et la modélisation paramétrique peuvent s'articuler au sein d'une PME. Les termes ainsi définis dans la figure sont à considérer en regard d'une expertise de l'architecte en modélisation paramétrique, sans remettre en question son expertise générale en tant qu'architecte-concepteur. Cette figure et les développements des sections suivantes nous permettent de nous positionner vis-à-vis des écrits de Derycke et de la question qu'il formule : « *la modélisation paramétrique ne*

demanderait-elle pas une évolution de la culture architecturale plus importante que celle qui a permis le simple remplacement de la table à dessin par la CAO ? » (Derycke, 2012, p.9).

La figure intègre d’abord les architectes n’ayant aucune expertise paramétrique qui, comme nos résultats le suggèrent, souffrent d’une certaine forme d’inertie de leurs pratiques numériques, renforcées ici par une désillusion, ou une désinformation, quant aux bénéfices réels que le numérique apporterait généralement au processus de conception.

Après avoir cerné ces pratiques non-paramétriques, nous abordons la pratique paramétrique en regard de différents niveaux d’expertise. Tout d’abord, nous revenons sur les postures des architectes novices en modélisation paramétrique. A l’issue de ces deux premiers niveaux d’expertise, nous identifions un système de contraintes dans lequel leurs pratiques architecturales s’inscrivent. Nous envisageons ensuite la pratique paramétrique d’un dessinateur détaché de la conception et n’ayant généralement pas les compétences fondamentales que développe et acquiert un architecte.

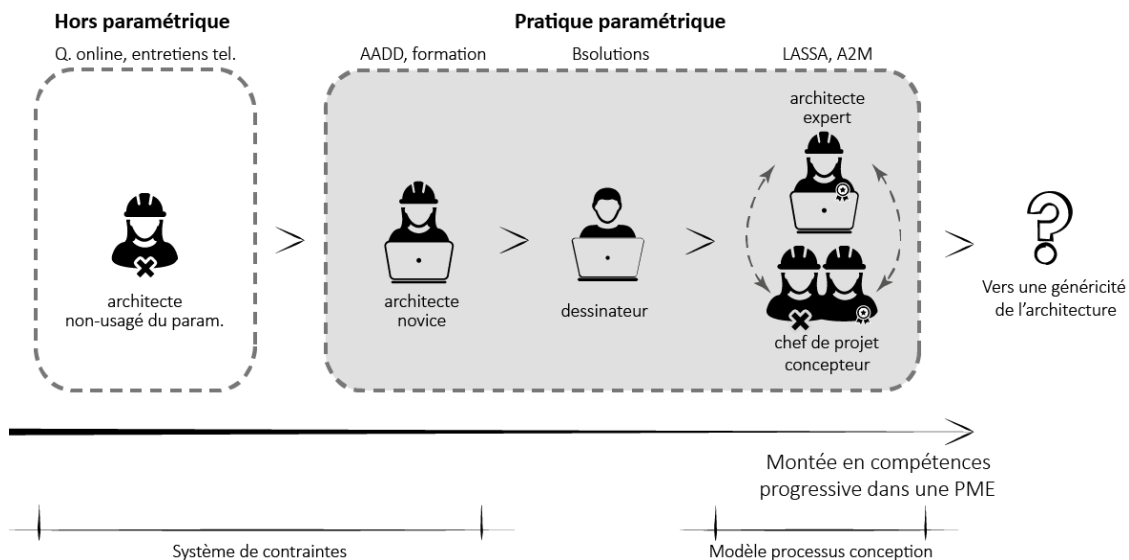


Figure 61. Montée en compétences via la modélisation paramétrique dans une PME (les termes adoptés sont à considérer en regard d’une expertise paramétrique et non d’une expertise générale liée à la profession d’architecte)

Cela nous amène finalement à discuter la valeur ajoutée que la modélisation paramétrique procure directement au travail d'un architecte expert. Nous verrons en quoi cette expertise redéfinit de nouvelles relations entre les collaborateurs, qu'ils aient ou non des connaissances en matière de modélisation paramétrique, impactant même parfois jusqu'à la stratégie de l'organisation.

7.2.1. Les experts de la conception hors du champ de l'usage du paramétrique

A l'heure actuelle, les architectes décideurs de bureaux d'architecture ont généralement connu la transition numérique, quittant la table à dessin pour l'ordinateur. Ce changement s'accompagne de désillusions, comme nous avons pu le souligner dans l'état des pratiques numériques en architecture (section 1 chapitre 4). Les débuts de l'informatique furent en effet laborieux et ont dans un premier temps simplement conduit les architectes à reproduire informatiquement les tâches réalisées auparavant au crayon, et ce pas toujours efficacement. Malgré qu'il soit communément reconnu que les outils ont évolué jusqu'à permettre des modifications rapides et des échanges de plus en plus aisés entre les intervenants, cette première transition numérique a laissé des séquelles. Les décideurs ont mis du temps à s'adapter et à développer une organisation formelle ou informelle correspondant à leurs besoins. Les architectes, à présent installés dans leurs habitudes, ne voient, ou ne veulent pas entrevoir, l'intérêt de nouveaux outils représentant à nouveau un changement. Une fois habitués à un outil particulier, les utilisateurs ne feraient plus l'effort d'en appréhender un autre, parfois pourtant moins complexe. Des effets de monopole se dégagent ainsi, laissant le marché dans une inertie soumise aux pressions économiques et industrielles (Elsen, 2011).

Ainsi, dans la pratique quotidienne, la plupart des architectes restent réticents face à la modélisation paramétrique. La non-compréhension des principes qui sous-tendent le fonctionnement des logiciels paramétriques s'additionne à la crainte d'une perte de maîtrise de la forme. La situation de « lâcher prise » (définie par Bourbonnais, 2015), qui déplace le concepteur du centre de la conception pour un temps, inquiète donc encore. Pourtant, la modélisation paramétrique n'engendrerait pas une perte de maîtrise mais

renforcerait celle-ci par un autre biais, soit la gestion précise et « augmentée » des données nourrissant la génération de la forme.

Une étude de Yu et ses collègues (2015, développée au chapitre 2, section 2.4.1) a de plus montré que, dans le processus de conception paramétrique, les concepteurs consacrent encore beaucoup d'efforts pour prendre en considération le contexte d'intervention et le programme du projet tels que dans les processus de conception « traditionnels », tandis que les définitions algorithmiques sont principalement utilisées pour soutenir leur intention de générer des modèles. Les architectes non-usagers n'ont donc pas encore le niveau de culture numérique suffisant pour saisir que les outils de conception paramétrique peuvent leur offrir de nombreuses nouvelles possibilités, à la fois grâce à leur expertise et à travers l'utilisation d'une définition algorithmique.

7.2.2. Les novices dans la pratique paramétrique

La communication autour du paramétrique est généralement promue par les fondateurs ou collaborateurs de grands bureaux d'architecture, voire de chercheurs analysant ces pratiques et relatant leurs expériences ou affichant leur nouveau projet phare. Cette communication met en avant de grandes infrastructures et laisse une trace impérissable dans la mémoire des architectes de petites structures, comme nous avons pu en prendre la mesure dans nos résultats. Cependant, certains architectes au sein de petites structures franchissent le pas et prennent le parti d'utiliser la modélisation paramétrique. Notre observation de l'atelier AADD (section 4.1.4 du chapitre 4) constitue un cas d'étude représentatif de cette situation.

A la section 5 de ce présent chapitre, nous avons discuté l'effort cognitif initial que requiert la modélisation. En complément de cela, il nous faut tenir compte de la difficulté d'apprentissage de ces logiciels qui impacte davantage l'effort cognitif du concepteur novice en la matière et provoque ainsi une certaine inertie, déviant son attention de l'exploration de l'espace problèmes/solutions pour des problèmes techniques provoqués par l'interface ou l'outil lui-même. L'utilisateur serait également tenté d'opter pour des procédures et des opérations qu'il maîtrise et qui lui prennent moins de temps mais qui pourraient pourtant s'avérer moins adaptées (Borillo & Goulette, 2002). Nous observons ici que la génération des idées se voit impactée par

l'outil, c'est-à-dire que l'architecte novice est influencé, modélisant non pas ce qu'il désire réellement, mais ce qui est le plus aisé à effectuer et à sa portée avec le logiciel (Robertson & Radcliffe, 2009). Cette attitude se traduit en un phénomène de *circumscribed thinking*, explicité précédemment.

Par ailleurs, nous avons également observé à la section 3 du chapitre 4 que les architectes novices soulignent l'intérêt du paramétrique étant donné les « surprises » qu'il procure. Chien & Yeh (2012) avancent que ces résultats inattendus, induits par des paramètres complexes, résultent principalement du manque de compréhension de la programmation informatique, des mathématiques et en particulier de la géométrie, plutôt que d'une valeur ajoutée réelle des outils de modélisation paramétrique. Nos observations auprès d'experts ont permis de mettre en évidence que ce phénomène survient effectivement davantage chez les novices que chez les experts. Si nous pouvons l'attribuer à un manque de compétences des novices, les découvertes inattendues générées parfois par les architectes experts, par exemple au cours d'échanges avec le chef de projet-concepteur, sont néanmoins véritablement une conséquence de la valeur ajoutée de la modélisation paramétrique, à savoir l'interaction avec le modèle et sa flexibilité via l'ajustement des paramètres.

7.2.3. Un système de contraintes au-delà des postures

Tandis que Bourbonnais (2015) divise en deux grands groupes la communauté des architectes (ceux qui adoptent facilement les technologies et les soi-disant « technophobes », quelque peu réticents à mettre en œuvre au quotidien des modes de modélisation renouvelés), nous allons au-delà en relevant un système de contraintes dans lequel les architectes tentent de faire évoluer leur pratique. Ce système explique en partie la non-adoption des outils de modélisation paramétrique. Les interrogés s'accordent sur le poids des contraintes qui pèsent sur leurs pratiques, remettant en question d'une part le regard qu'ils portent sur la capacité d'un outil à soutenir la conception architecturale et, d'autre part, à susciter des collaborations intra et interprofessionnelles.

Une contrainte cognitive et temporelle

Devant l'interface et le fonctionnement du logiciel, la majorité des architectes interrogés estime qu'il est nécessaire de posséder une expertise et des compétences spécifiques, que la plupart ne possèdent pas, afin de pouvoir paramétrer l'outil de manière pertinente et efficace. Certains propos des interrogés corrélient les savoirs et compétences spécifiques identifiés et discutés dans la littérature (section 2.4.3 chapitre 2). L'acquisition de ces compétences demande du temps, souvent difficile à dégager, pour se former et se maintenir à jour. Un manque de compétences peut mener à un sentiment d'incertitude et à un sentiment de manque de maîtrise du processus.

Bien qu'une partie des architectes soient ouverts à un apprentissage, celui-ci résonne davantage comme un frein à l'usage des logiciels de modélisation paramétrique, jusqu'à devenir une contrainte qui rebute totalement certains futurs utilisateurs.

La dimension technique du logiciel, mentionnée par ailleurs, s'inscrit pleinement dans cette contrainte temporelle. En effet, dans un contexte concurrentiel et de réduction des délais de conception, des inquiétudes émergent quant au temps requis pour définir et mettre en place les paramètres et pour se familiariser avec un tel outil. Cet impératif d'efficacité et de rapidité dans le travail de conception semble prédominer sur la qualité et les potentialités offertes par un logiciel perçu comme trop novateur.

Une contrainte organisationnelle

L'usage omniprésent de logiciels généralistes de CAO ne peut être remis en cause, ces derniers constituant à présent un des éléments fondateurs de l'efficacité des échanges et du renouveau du système collaboratif établi entre les intervenants. Il est donc impératif pour les architectes que toute intégration d'une nouvelle technologie ne déstabilise pas les relations qu'ils maintiennent avec les divers acteurs du processus, de la conception à la construction du projet. Leurs manières de travailler et de communiquer sont devenues des routines organisationnelles dans lesquelles les acteurs sont engagés et qu'ils n'envisagent pas de remettre en cause. Pour la majorité des interrogés, l'acquisition d'un nouveau logiciel peut en effet être considérée comme une contrainte dans la mesure où son adoption implique de bousculer les habitudes

et les pratiques. Les architectes questionnent également la capacité des entrepreneurs à faire face aux changements formels qui en découleraient. Une fois le logiciel implémenté, une stratégie organisationnelle doit être définie en fonction des compétences de chaque collaborateur pour palier à la difficulté de travailler sur un projet partagé. Cette stratégie est différente d'une agence à l'autre et peut être définie rigoureusement ou non, de manière à laisser libre cours aux collaborateurs qui se saisissent des opportunités en fonction de leurs affinités technologiques.

Les outils informatiques constituent de manière générale des instruments dont se servent consciemment les architectes et qu'ils intègrent à leurs propres pratiques de conception traditionnelle. Ces outils apparaissent également comme des actants dans le sens où leur présence conditionne les acteurs à (ré)agir d'une manière ou d'une autre. Les outils de modélisation paramétrique semblent accentuer ces effets. Consciemment ou non, les concepteurs ont effectivement clairement identifié les recompositions professionnelles et interprofessionnelles qui peuvent découler de l'usage étendu de tels outils de modélisation.

Ainsi, les interrogés ont considéré et évalué la pertinence de cette typologie d'outils au prisme de leurs propres pratiques et routines de travail, tandis que les outils de modélisation paramétrique transgressent les méthodes classiques de conception et de collaboration. Le rôle des différentes expertises dans le processus de conception et finalement les modalités de collaboration entre acteurs pourraient être reconsidérés à la lumière de ces outils. L'apparition de profils experts est à considérer dans ce contexte.

Une contrainte contextuelle

Une contrainte additionnelle liée au contexte dans lequel évoluent les acteurs semble impacter l'appropriation d'un tel outil. Face à la diversité des compétences à acquérir pour s'adapter à la demande croissante et perpétuelle de spécificités (analyse énergétique, modélisation en BIM, ...), les architectes ne semblent pas avoir les ressources nécessaires (en temps, en formation, économiquement) et se sentent ainsi prisonniers d'un système qui évolue rapidement. Dès lors, ceux-ci ne semblent envisager le changement que sous la pression du contexte. En effet, les architectes semblent prioriser l'intégration

d'outils leur permettant de répondre aux ambitions des commanditaires ou pour faire face à la concurrence.

Ainsi, l'évolution de leurs compétences ne se fait majoritairement que par nécessité de s'adapter à la demande. En effet, l'influence du client (ses demandes, la complexité du projet qu'il exige) ou encore les exigences des services administratifs, sont généralement identifiées comme des leviers du changement. Cette structure contraignante semble quasiment avoir été assimilée et peser en permanence sur les choix et les orientations dans lesquelles les concepteurs s'engagent.

Une contrainte exploratoire

Les postures identifiées tendent à prouver que l'utilisation d'un tel logiciel aurait un impact sur les modalités de prise de décision dans le processus conceptuel des projets, et modifierait la nature de ces dernières (positivement ou négativement, selon les intervenants). Les plus sceptiques formulent une inquiétude quant à la perte de créativité engendrée par l'exactitude du logiciel qui réitère précisément le même résultat à l'issue d'un même processus. D'après eux, les outils de modélisation paramétrique donneraient l'illusion d'un renouveau de la recherche formelle, mais *in fine* conduiraient à réduire les possibilités et alièneraient la créativité, voire pré-détermineraient un « style architectural » particulier.

Pour ceux qui optent pour la posture inverse, l'adoption d'un tel logiciel ne constitue pas un risque mais davantage une opportunité d'aller au-delà des possibilités offertes par les outils de CAO traditionnels et, ce faisant, de soutenir la phase de recherche du processus de conception. Il ne s'agirait pas de se plier à des contraintes morphologiques induites par le logiciel mais bien de favoriser une posture réflexive vis-à-vis des morphologies envisageables. L'outil paramétrique permettrait à l'architecte d'explorer d'autres pistes qui ne se manifestaient pas au départ. L'architecte se sent cependant tiraillé par cette opportunité et les conditions de sa pratique.

Certains architectes belges ont franchi le pas de l'appréhension des outils de modélisation paramétrique. Après avoir cerné les facteurs d'influence et identifié les contraintes majeures qui ralentissent l'adoption du paramétrique dans la pratique architecturale belge, la discussion avec des experts engagés

dans ce type de modélisation prouve qu'il est possible de franchir la barrière du méconnu technologique et de faire face aux contraintes cognitives, organisationnelles et contextuelles y afférentes.

7.2.4. Au-delà des compétences, la place dans le processus : le cas des dessinateurs

Parallèlement à ces novices qui se confrontent au besoin de développer des compétences spécifiques et différentes des compétences généralement développées par les architectes, nous nous appuyons sur un de nos cas d'étude (cfr. section 4.1.3, chapitre 4) pour étendre notre discussion aux dessinateurs.

Nous avons vu que les recherches de de Boissieu mènent à l'identification de quatre types de savoirs nécessaires à la manipulation d'un modèle paramétrique. On retrouve les savoirs propres aux mathématiques, à l'informatique, à la culture numérique et finalement à l'architecture et à la construction. Les recherches de de Boissieu mettent donc en évidence l'importance d'avoir acquis des savoirs propres à l'architecture et à la construction. Ce sont ces derniers savoirs qui sont remis en question dans ce cas d'expertise. Bien que les dessinateurs aient des connaissances plus ou moins développées dans chacun de ces savoirs, ils jouent un rôle d'interface entre le chef de projet-concepteur et la modélisation paramétrique. D'après nos observations, les dessinateurs sont à même d'utiliser des routines paramétriques en vue d'automatiser certaines de leurs tâches, leur faisant ainsi économiser un temps considérable [annexe 15]. Par contre, ils n'ont pas les ressources nécessaires pour s'emparer pleinement de la valeur ajoutée d'une modélisation paramétrique.

En effet, comme le confirme ce cas d'étude, au-delà des compétences requises pour parvenir à une bonne maîtrise des outils de modélisation paramétrique, la place de l'utilisateur dans le processus de conception jouerait un rôle essentiel. Ce positionnement des dessinateurs, détachés de la conception, expliquerait ainsi leur désintérêt marqué soulevé dans notre recherche.

7.2.5. La montée en compétences jusqu'à l'architecte expert

L'intégration d'outils de modélisation paramétrique dans une structure peut être proactive, découlant d'une stratégie du responsable du bureau, ou intervenir par nécessité, par exemple pour répondre à un besoin urgent ou non. En effet, en fonction de nos observations, nous relevons deux temporalités pour recourir à la modélisation paramétrique. Dans le premier cas, le projet est déjà en cours. La modélisation paramétrique intervient alors comme une solution permettant de débloquent une situation existante et réelle à dénouer rapidement [observation 0 ; projets A_FH et A_M], lorsque les outils traditionnels ne permettent pas de répondre à la problématique posée de manière efficace. L'intervention d'un architecte-expert du paramétrique permet de débloquent la situation. Dans ce cas, la conception du projet est effectuée en amont de la modélisation paramétrique. Cependant, le recours à la modélisation paramétrique et la construction de la définition algorithmique peuvent placer l'architecte-expert dans un processus itératif, exploitant l'outil tantôt comme support de représentation, tantôt comme support de conception. Ce processus a notamment pu être observé dans le cas du projet A_FH.

Le deuxième cas se présente lorsque le projet n'a pas encore été développé. La modélisation paramétrique est alors envisagée afin de répondre à certaines volontés et ambitions que le bureau désire mettre en œuvre dans sa réponse architecturale au client. Pour ce faire, modélisation paramétrique et conception architecturale se font simultanément. Le cas observé pour le projet A_C révèle également que la conception du projet peut se développer dans le chef de deux personnes, à savoir le fondateur du bureau et l'architecte-expert de la modélisation.

Ces temporalités d'utilisation sont autant de configurations différentes pour l'intégration de l'architecte-expert dans le processus, engendrant de la sorte des modes de relation différents entre ce dernier et ses collaborateurs.

Quelle que soit la temporalité, nous pouvons extraire de nos cas d'étude que l'introduction d'une modélisation paramétrique est toujours portée par un architecte-expert de la modélisation, n'excluant en aucun cas que des novices puissent se greffer au projet de développement de ces outils par la suite. C'est tout le moins le cas lorsqu'il s'agit de les intégrer pour supporter le processus

de conception. A la section précédente, nos observations ont également relevé l'utilisation d'outils de modélisation paramétrique pour soutenir des automatisations de tâches, qui peuvent dès lors être exécutées par des dessinateurs. Ce recours à des architectes-experts se justifie donc par le fait que la modélisation paramétrique n'est plus seulement une expertise « technologique » aisée à sous-traiter, mais bel et bien une nouvelle forme de « compétence de conception » qui devient en même temps un argument stratégique pour les petites structures.

De la sorte, nous pourrions interroger la manière dont les spécificités du paramétrique remettent en question l'organisation d'une PME. Nous formulons notre réponse à deux niveaux.

Tout comme l'intervention d'un nouvel intervenant, ou l'adoption d'un nouvel outil ou processus, les outils de modélisation paramétrique demandent un réajustement des relations entre collaborateurs ou en induisent de nouvelles, de nature parfois différente. Ainsi, par sa spécialité, l'architecte-expert en modélisation acquiert une certaine expertise en paramétrique, et par là une certaine légitimité qui lui permet de remettre en question certains choix de sa hiérarchie [A_FH_14], voire lui donne parfois accès à un niveau de prise de décision qui ne lui était pas – ou pas toujours – octroyé jusqu'alors.

On observe par ailleurs se développer, dans certaines situations, un dialogue entre l'architecte-expert en modélisation et le chef de projet/concepteur non-usager du paramétrique, ou ayant une connaissance générale mais limitée des potentialités de cette typologie d'outils. Tandis que cette relation peut être en théorie de différente nature (collaboration, coordination, co-conception), nos recherches tendent plutôt à la définir comme une nouvelle manière de co-concevoir. En effet, entre ces deux positionnements d'architectes, on parle de lâcher prise et de *see-transform-see* « augmenté », tel que décrit à la section 5 de cette Discussion.

Finalement, à l'échelle individuelle de l'architecte-expert, sa spécialisation lui octroie la capacité de gérer son temps et de distribuer non seulement son temps mais également son effort cognitif différemment grâce à la maîtrise de l'outil. Cette expertise permettrait notamment à l'architecte-expert de pouvoir surmonter plus aisément le pic de charge cognitive au départ du processus (que nous identifions et décrivons à la section 5) et non d'y renoncer. En effet, en

connaissance de cause, l'architecte-expert sait pertinemment que ce temps investi sera « regagné » par la suite et soutiendra une phase favorable à l'exploration formelle, allégée de cette charge cognitive. L'architecte-expert sait ainsi qu'il ne s'agit que d'une répartition de son énergie sur une temporalité différente, compte-tenu de ce à quoi il était habitué dans le contexte d'usage d'une CAO plus « traditionnelle ».

Au vu des potentialités de la modélisation paramétrique pour le processus de conception que nous avons soulevées, nous discutons des enjeux pour l'architecture si toutes les agences, même celles de petite taille, parviennent à monter en compétences de la sorte.

7.3. Vers une généricité de l'architecture ?

Nombreuses recherches relatives aux outils de modélisation paramétrique en architecture (Woodbury, Aish, & Kilian, 2007; Khabazi, 2010; de Boissieu, 2013; Pottmann, Eigensatz, Vaxman, & Wallner, 2015) s'attachent à questionner la pertinence de l'utilisation de « solutions génériques à un problème défini », nommées *patterns* par Woodbury (2010), soit des séquences de définitions qui composent et facilitent la génération de l'ensemble de la définition algorithmique.

Cette méthode, basée sur l'abstraction du problème à résoudre, est souvent envisagée comme un outil pédagogique pertinent compte tenu de la simplification de modélisation qu'elle représente. Bien que la notion de *pattern* ne soit pas évoquée en tant que telle dans la pratique professionnelle, la création d'un fichier source reprenant des morceaux de chaînes ferait l'objet de réflexion interne dans certaines agences [entretien R2, annexe 14].

En regard des pratiques que nous avons observées, nous remettons en question ce postulat. Cette généricité est-elle vraiment un idéal à atteindre compte tenu des richesses cognitives offertes par le fait même de construire la définition algorithmique ? Le processus de construction progressif de la définition algorithmique et le caractère personnel de celle-ci ne sont-ils pas en réalité plus riches ?

Notre recherche (en particulier deux observations) nous permet de nous positionner en regard de ces *patterns*. Comme nous avons pu l'observer,

l'expliciter et le discuter, nous nous positionnons en faveur d'une utilisation de la modélisation paramétrique comme catalyseur d'une phase de réflexion propice à la créativité. Par ailleurs, dans nos cas d'étude nous n'avons observé aucune utilisation d'un quelconque *pattern*, ce qui tend à réduire l'influence et l'étendue perçue de ce genre de stratégie en conception architecturale.

En effet, malgré l'expertise des acteurs interrogés, aucun d'entre eux ne semble en mesure, ou enclin à employer tout ou partie d'une définition algorithmique pour un autre projet que celui d'origine. Bien que cela puisse être attribué à la taille des agences et à un manque de moyens pour s'organiser, nous avons cependant pu observer un choix posé, délibéré, en faveur d'une nouvelle définition algorithmique tandis que l'utilisation d'un morceau d'une définition antérieure aurait pu être envisagée (projet A_FH, annexe 18). Nous attribuons ce choix davantage au besoin, pour l'architecte-expert, de processor l'information, d'incuber, de se laisser le temps à la réflexion et d'ajuster celle-ci au fur et à mesure de la construction de la définition algorithmique.

En effet, de nombreux « chemins » sont envisageables pour aboutir à un même résultat, faisant de l'option choisie, à un moment T, une solution pas toujours optimale dans un autre contexte. Par ailleurs, l'évolution des compétences de l'architecte le pousse à requestionner sans cesse la pertinence de chaque définition algorithmique en regard de chaque nouveau contexte et des nouveaux objectifs à prendre en considération, et ainsi de générer une définition plus optimale en réponse à un nouveau problème. Chaque projet d'architecture constitue ainsi un autre « terrain de jeu », propice à de nouveaux apprentissages ; chaque nouvelle définition algorithmique devient un challenge, permettant au concepteur d'intégrer de manière continue de nouvelles compétences.

Plusieurs auteurs (Burry & Burry, 2008; Leitão, Caetano, & Correia, 2016; Oxman, 2017) considèrent en effet cette mise en place de la définition comme un canal de créativité et comme un moyen de représenter des idées de conception qui va au-delà du dessin visuel ou graphique. Dès lors, l'utilisation de la modélisation paramétrique ne serait, selon nous, en aucun cas vecteur de généralité systématique, ou tout du moins pas plus que les outils de CAO traditionnelle ne l'ont été. Les recherches portant sur les contextes des grandes agences ont déjà identifié à quel point la modélisation paramétrique permet de libérer la recherche morphologique. Cette thèse de doctorat démontre en quoi

cette typologie d'outils constitue tout autant aujourd'hui un potentiel d'innovation et de différenciation pour les petits et moyens bureaux d'architecture.

CHAPITRE 6

CONCLUSIONS

Au sein du chapitre précédent, nous nous sommes positionnés par rapport à la théorie des organisations. Considérant ce positionnement, nous avons discuté les potentialités des outils de modélisation paramétrique pour les petits bureaux d'architecture en regard de différents niveaux d'expertise en modélisation paramétrique. Nous avons ensuite élargi le propos à la question de la généricité de l'architecture. Le chapitre 6 va se concentrer sur les apports de la thèse, ses limites et les perspectives qu'elle ouvre pour les pratiques numériques et paramétriques des architectes travaillant dans des bureaux d'architecture de petite taille.

1. Pratiques numériques émergentes en conception architecturale dans les bureaux d'architecture de petite taille

Cette thèse dresse un panorama des pratiques numériques actuelles des architectes belges et examine plus particulièrement les pratiques liées aux outils de modélisation paramétrique dans le cas spécifique de bureaux d'architecture de petite taille. La diversité des méthodes mises en œuvre offre un potentiel de répliquabilité qui permettra, en outre, de questionner de manière plus large et systémique les pratiques émergentes de l'utilisation d'autres nouvelles technologies.

La méthodologie que nous avons mise en place, issue des sciences humaines et sociales, apporte un regard spécifique sur le domaine de l'architecture. Nous nous sommes notamment positionnés en faveur de la théorie de la socio-matérialité, octroyant aux outils certains présupposés et accordant une certaine influence au contexte et à l'expertise de l'utilisateur. Alors que certains chercheurs établissent leur recherche dans un cadre ciblé (grandes agences pour obtenir une pratique établie et stable ; cadre expérimental pour maîtriser le protocole d'analyse par exemple), notre objectif a ici été de laisser émerger les questions du terrain pour fonder la recherche sur les pratiques réelles et les besoins concrets des bureaux d'architecture belges de petite taille, s'inscrivant dès lors dans un terrain aux pratiques éclectiques et peu stables. Considérant ce positionnement, la thèse ne s'attarde pas aux outils en tant que tels mais à des phénomènes plus larges qu'elle questionne.

Nous avons ainsi construit, dans la première partie de la recherche, une phase exploratoire qui problématise et nourrit empiriquement la compréhension fine des pratiques numériques au sens général du terme et des connaissances en matière de modélisation paramétrique.

En complément de cette démarche quantitative, des entretiens approfondis ont été menés pour affiner la cartographie des représentations mentales que les architectes formulent préalablement à l'usage de cette typologie d'outils. Nous avons également évalué l'évolution de ces représentations au travers des retours d'expérience faisant suite à une journée de formation.

Nous avons ensuite fait appel à deux méthodes, les entretiens rétrospectifs et les observations *in situ*, afin de percevoir et d'appréhender tous les aspects situés de la diversité des pratiques paramétriques émergentes.

Au travers de ce travail, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à l'usage des modeleurs paramétriques basés sur la programmation visuelle, tels que Grasshopper©. Ces modeleurs, de par leur fonctionnement, possèdent une représentation symbolique de l'objet qui est accompagnée d'une représentation explicite plus usuelle de l'artefact. Lorsque le concepteur conçoit un modèle paramétrique, il doit à présent traduire sa représentation interne en dépendances géométriques qui représentent dès lors le processus morphologique de l'artefact, et non plus uniquement l'ébauche d'une représentation intermédiaire de cet artefact. Nous avons vu que si ces mécanismes sont puissants, ils demandent de la part du concepteur des compétences spécifiques et une charge cognitive importante dès le début du processus, représentant un investissement initial coûteux mais nécessaire avant de pouvoir pleinement tirer profit des valeurs ajoutées offertes par ces outils.

La recherche s'est attelée à une analyse davantage méta, étudiant les mécanismes organisationnels, les adaptations cognitives et les représentations mentales des architectes issus de PME lors de l'utilisation des outils de modélisation paramétrique. De manière générale, les approches centrées sur les besoins réels des acteurs assurent la mise au point de modèles, méthodes, voire outils qui respectent les pratiques quotidiennes tout en faisant évoluer les dimensions perfectibles. Cette approche permet ainsi aux chercheurs et notamment aux développeurs de logiciels d'être plus pertinents dans la mise au point d'une solution et, dès lors, de voir le résultat de leurs travaux être adoptés plus rapidement et naturellement par les acteurs concernés. C'est dans ce contexte que nous intervenons en cherchant à cerner comment les bureaux d'architecture de petite taille s'adaptent aux profondes mutations numériques en cours. Ces connaissances permettront dès lors d'accompagner ces bureaux dans la transformation digitale qu'ils traversent aujourd'hui.

Nos résultats permettent de dresser pour la première fois un panorama des pratiques numériques en architecture en Belgique et de cibler les enjeux rencontrés par les architectes dans leur pratique quotidienne. Nous établissons également une revue des connaissances générales en matière de modélisation paramétrique. Cette étude de la situation existante est un apport tangible pour

contextualiser les études futures. Elle dresse ainsi un tableau de l'hétérogénéité de l'utilisation des logiciels et des connaissances entre les PME et les grandes agences présentées dans la littérature. De la sorte, elle met en avant l'importance de prendre en considération la taille des bureaux qui influence les résultats. Elle fige également la situation à un moment T, ce qui permettra d'établir des comparatifs à des périodes de temps différentes ou en regard d'outils différents.

Prenant dès lors les outils de modélisation paramétrique comme cas d'étude de l'influence des technologies sur le travail des architectes, nous avons formulé un système de contraintes dans lequel les pratiques actuelles évoluent, s'articulent et s'échelonnent et qui, de ce fait, colore l'adoption de nouveaux outils.

Transversalement, notre recherche interroge le potentiel de ces outils de modélisation paramétrique au vu des différents niveaux d'expertise (co-)existants au sein des petits bureaux d'architecture. La thèse met en lumière le fait que les outils paramétriques sont, à première vue, rarement utilisés par les architectes de PME. Ces derniers peinent à comprendre les logiques sous-jacentes, les empêchant par ailleurs d'anticiper la valeur ajoutée qui s'en dégage, au-delà de l'effort cognitif et de la cristallisation précoce exigés au début du processus. Cependant, lorsqu'ils sont utilisés, nos recherches montrent que ces outils ont le potentiel de faciliter la génération de variantes morphologiques et de nourrir la conception via des paramètres d'entrée complexes mais riches, généralement trop difficiles à appréhender et à représenter pour les concepteurs qui utilisent des outils d'externalisation plus traditionnels. Cette prise en compte de paramètres, dont la nature s'est diversifiée et même complexifiée, complète les stratégies à disposition des concepteurs pour atteindre leurs objectifs, à savoir la mise au point concurrentielle d'une solution nouvelle, satisfaisante et adaptée au contexte, et ainsi plus fondamentalement, sert à apporter une réponse plus pertinente, précise et adaptée aux enjeux sociétaux actuels.

Nous avons ainsi pu identifier des appropriations de l'outil propres à un bureau (projection de la modélisation paramétrique pour collaborer avec différents profils sur la logique et non le résultat, par exemple), phénomène peu fréquemment observé dans les études réalisées dans de grandes agences. Les agences de petite taille ont donc la possibilité de se construire une gamme de

pratiques qui corresponde à leurs enjeux propres, se détachant des « standards » issus des protocoles et recommandations de grandes agences. Pour se faire, les PME doivent d'abord se forger des représentations mentales de l'outil qui permettent d'imaginer et de mettre en œuvre des pratiques innovantes et adaptées.

Notre recherche s'appuie ainsi sur la théorie des représentations et apporte une réflexion quant à son évolution, et ce qu'elle implique pour les architectes. Nous identifions, à travers les outils de modélisation paramétrique, une approche par le processus qui pousse à une explicitation forcée et précoce des représentations internes, identification qui nous permet ensuite de proposer un modèle plus adapté aux processus de conception « augmentés » en regard des usages observés. Nous envisageons la maîtrise du processus comme un facteur différenciant pour les PME, leur permettant de gagner en efficacité, d'accéder à d'autres parts de marché et de valoriser le processus réflexif.

Cependant, en regard des représentations mentales actuellement construites par les architectes, nous pouvons affirmer que ceux-ci ne sont que peu et pas suffisamment exposés aux technologies. Le manque de connaissance générale induit des difficultés, voire une incapacité des architectes à transférer les potentialités à leur domaine d'expertise.

Si rien n'est fait à l'échelle nationale voire internationale pour s'attaquer à l'adoption des technologies, il pourrait devenir difficile pour les architectes de rester performants et concurrentiels par rapport aux adopteurs. Il s'agit d'étudier plus en profondeur les phénomènes de fracture numérique et paupérisation qui pourraient entraver le développement des bureaux de petite taille. Il convient dès lors de s'interroger sur les moyens à mettre en œuvre pour y parvenir. Les pays et les institutions devraient promouvoir et soutenir l'accompagnement numérique personnalisé des architectes. C'est de la sorte que des pratiques propres continueront d'émerger pour finalement se stabiliser, repoussant les limites de l'innovation architecturale.

2. Limites de la recherche

Les résultats que nous produisons ici doivent être nuancés par les limites auxquelles notre méthodologie s'est confrontée, majoritairement tributaire de notre volonté d'étudier une typologie de bureaux d'architecture la plus représentative de notre marché. En effet, comme nous l'avons explicité, notre recherche est consacrée à l'étude des pratiques architecturales de bureaux d'architecture de petite, voire très petite taille. Cependant, étant donné la faible appropriation de la modélisation paramétrique à l'heure actuelle, il a été particulièrement ardu d'accéder à un tel terrain d'étude.

La première limite émerge donc directement du terrain étudié et est liée à la pratique numérique et la pratique paramétrique de ces petits bureaux qui sont, pour certains, encore en développement et peuvent, de la sorte, être considérées comme instables. Par ailleurs, tandis qu'il semble contraignant pour des PME d'intégrer de nouvelles technologies en raison du système de contraintes que nous avons identifié, l'agilité d'une petite structure est hypothétiquement plus propice à l'adaptation au changement qu'un grand bureau dont la structure peut s'avérer complexe à modifier. De ce fait, les pratiques questionnées sont sujettes à évoluer et, dès lors, sont susceptibles d'influencer l'ajustement organisationnel des collaborateurs du bureau. Par conséquent, même si les modèles théoriques développés dans cette thèse constituent sur le long terme un cadre stabilisé d'examen des pratiques, certains résultats détaillés trouvent une limite de validité probablement proche dans le temps. Notre analyse, ne s'intéressant pas à l'étude détaillée des chaînes paramétriques et par-delà, pas non plus aux objets architecturaux, va dans ce sens. Ce choix assumé permet de ne pas se limiter à un comparatif simpliste et rapidement obsolète d'algorithmes trop spécifiques, compte tenu du fait qu'il existe quasiment autant de chaînes paramétriques qu'il y a d'experts de ces outils, et compte tenu des nouveaux plug-ins qui sont développés de manière récurrente dans ce domaine. C'est pourquoi notre positionnement se détache du caractère éphémère des technologies et est à repositionner dans des enjeux sociétaux plus larges.

La deuxième limite s'inscrit également dans le choix du terrain et est plutôt d'ordre méthodologique. Celle-ci est liée aux questions que pose une analyse exploratoire de cas limités. En effet, de telles études via des observations *in situ*

offrent une compréhension profonde de l'objet d'étude mais ne peuvent prétendre représenter avec exhaustivité l'ensemble des pratiques existantes. Il faut par ailleurs souligner la difficulté de mettre en place une confiance réciproque avec les bureaux d'architecture. La pratique du paramétrique étant une pratique peu courante à l'heure actuelle, il a fallu rassurer les architectes nous accueillant quant à l'utilisation des données dans le cadre exclusif de cette thèse. L'observation des méthodes et processus de conception d'une telle pratique représentant un levier de développement important pour les bureaux démarchés, celle-ci représente un risque dont nous étions conscients. Plus spécifiquement pour l'observation *in situ*, il nous a fallu présenter précisément les objectifs de notre recherche afin que les membres observés soient rassurés par la qualité neutre et externe de l'observation de leur travail. Nos résultats sont ainsi tributaires d'un terrain restreint, délicat d'accès et en constante mutation, qui mériteraient d'être confronté ultérieurement à d'autres situations et d'autres temporalités.

La troisième limite s'associe à notre volonté de questionner un domaine qui sort du champ architectural. En effet, nous nous sommes appuyés sur les théories des organisations afin d'aborder la question de la technologie et du contexte dans lequel elle s'inscrit, et plus précisément l'articulation de la technologie et l'organisation qui l'utilise. Nous sommes conscients que de nombreuses notions pourraient être affinées par une meilleure maîtrise de ces concepts et permettraient ainsi de mieux percevoir les tenants et aboutissants de certains positionnements stratégiques au sein d'une organisation ou de l'organisation en elle-même, en regard du marché dans lequel elle évolue. Ceci étant, cet éclairage complémentaire fait sens, d'une part en regard de la portée « située » d'une thèse dédiée aux PME et, dès lors, de la nécessité de produire des résultats directement manipulables par les acteurs de terrain et, d'autre part, en regard de notre expérience personnelle acquise au sein de bureaux d'architecture de petite taille, ce qui nous autorise dès lors à discuter leur fonctionnement interne.

Finalement, la quatrième limite peut être associée aux objectifs intrinsèques de cette thèse, qui ne visait explicitement pas la mise en place de recommandations opérationnelles pour l'intégration d'outils de modélisation paramétrique au sein d'une pratique architecturale, voire dans un enseignement. Ce travail n'a effectivement pour but ni de dresser une liste des

prérequis nécessaires, ni d'imposer un modèle d'organisation type « idéal » mais bien plutôt de comprendre et d'explicitier, dans le respect d'une posture scientifique plus fondamentale, la diversité des pratiques, la richesse de cette diversité ainsi que les enjeux liés à l'utilisation des outils de modélisation paramétrique dans les petits bureaux d'architecture, et ainsi, in fine, d'ouvrir plus largement sur la transformation digitale des PME.

3. Perspectives de recherche

De par son positionnement, les résultats et les limites de cette thèse ouvrent de nombreuses perspectives d'études pouvant d'une part renforcer la généralisation des résultats et, d'autre part, nourrir par une hypothèse de départ l'approfondissement de certaines thématiques. Nous développons quelques-unes de ces perspectives potentielles.

Nos résultats gagneraient à être complétés afin de pouvoir les généraliser plus largement. Bien que notre étude initiale sur l'état des pratiques numériques ait recueilli près de 700 réponses, ce qui représente un échantillon non négligeable en regard des études généralement publiées, celui-ci représente seulement 4% des architectes belges inscrits aux Ordres. Tandis que cet échantillon est représentatif démographiquement de l'ensemble des architectes sur le territoire belge, les recherches futures auraient davantage d'impact si une contextualisation européenne voire internationale était réalisée. Les tendances pourraient ainsi être généralisées, établissant si le niveau de pratique et les connaissances des architectes travaillant dans des bureaux de petite taille sont équivalents ou si des disparités sont observables, notamment en fonction de la culture numérique située. Une étude de cet ordre permettrait de cerner la corrélation entre les pratiques et la culture numérique inculquée, par exemple dans l'environnement pédagogique mais aussi au-delà de celui-ci.

Par ailleurs, lors de nos observations, nous avons soulevé le fait que les architectes avaient recours aussi bien à l'utilisation de modeleurs qu'à l'utilisation de dessins sur supports papier ou à des outils de CAO dits « traditionnels ». Cette complémentarité nous a d'ailleurs poussés à suggérer un modèle du processus de conception adapté à nos observations. Nous n'avons cependant que peu abordé le rôle de ces différents supports nourrissant pour certains la conception paramétrique et pour d'autres, la modélisation paramétrique en tant que telle. Cet aspect pourra être développé ultérieurement grâce aux données recueillies et aux connaissances construites dans cette thèse.

Tandis que notre étude s'attèle à identifier l'émergence de pratiques, notre volonté première n'a pas été de soutenir la mise en œuvre de recommandations bien que le corpus actuel permette l'ébauche de certaines

d'entre elles. Une phase intermédiaire, utilisant nos résultats comme hypothèse de départ, soutiendrait quant à elle la formulation de recommandations plus instruites. Les résultats sur les pratiques émergentes au travers du cas de la modélisation paramétrique pourraient être éclairés de deux manières :

- une perspective serait simplement de réitérer la recherche en se focalisant sur d'autres outils numériques ou en ciblant le parcours académique des architectes. Nous conseillerions alors de sélectionner les architectes belges entre 30 et 50 ans, travaillant dans des agences de petite taille. Cette cible serait sollicitée spécifiquement sur les représentations mentales d'une technologie telle que la modélisation paramétrique. L'objectif d'une telle étude est de se focaliser sur les profils en formation initiale lorsqu'une technologie émerge et ainsi de mesurer leur exposition à cette technologie et les conséquences de cette exposition sur leur carrière professionnelle. En effet, on peut penser que les technologies vont continuer d'émerger; c'est pourquoi on pourrait s'interroger quant à la pertinence de développer des stratégies qui sensibilisent davantage ces profils peu exposés ;
- une autre perspective s'inscrirait dans l'étude plus systémique du phénomène de *circumscribed thinking* et des enjeux associés. Quelles sont les limites que les concepteurs s'imposent à eux-mêmes par rapport à l'outil en fonction de ce qu'ils comprennent de celui-ci ? Comment les architectes se sont-ils construits ces représentations mentales ? Il est dès lors important de comprendre les enjeux des représentations mentales qui influencent les décisions et actes (engagement de profils spécifiques, modifications organisationnelles, collaborations,...) et quelles sont les stratégies à mettre en place pour les faire évoluer (enjeux de formation continue, journée de sensibilisation, newsletters informatives de la part des Ordres, ...).

Sur un autre plan, les résultats de notre thèse ont mis en évidence un changement majeur du processus de conception induit par l'utilisation des outils de modélisation paramétrique, changement nécessaire afin de pouvoir exploiter leur potentiel (notamment via l'introduction d'une représentation symbolique et abstraite de l'artefact et ses conséquences bénéfiques). Cependant, ces outils n'ont pas encore transgressé fondamentalement le paradigme représentationnel actif en architecture, resté fondamentalement

stable depuis l'utilisation des différents types de projections fondamentales (Derycke, 2012). En parallèle de nos résultats, d'autres chercheurs identifient quant à eux les problèmes sous-jacents à la perception d'espaces 3D complexes lorsqu'ils sont représentés par des outils traditionnels, tels que les croquis et les maquettes par exemple (Abu Alatta & Freewan, 2017; Milovanovic, Moreau, Siret, & Miguet, 2017). Cette nécessaire remise en question de la culture de la représentation architecturale est en effet ressentie par certains architectes interrogés [R4-11, MOR-852, R2-152]. La réalité virtuelle, au travers d'environnements interactifs immersifs, semble soutenir les prémices du processus de conception plus efficacement que les interfaces informatisées conventionnelles (Abu Alatta & Freewan, 2017; Dorta, Kinayoglu, & Hoffmann, 2016). C'est en ce sens que notre recherche post-doctorale encadrée par le XR Lab de l'Université de Californie, Berkeley, est formulée. Celle-ci vise à articuler les résultats de la présente recherche avec le domaine spécifique de la réalité virtuelle (VR), avec pour objectif d'élargir le champ d'exploration créatif des PME dès les premières phases de conception, tout en soutenant le processus collaboratif.

Ces questionnements sont autant de perspectives possibles pour approfondir les connaissances produites par cette recherche en regard de pratiques émergentes liées à l'adoption d'une nouvelle technologie. La spécificité de notre corpus ouvre encore bien d'autres pistes à explorer, notamment concernant le processus de la conception à la fabrication et les enjeux de culture numérique associés, ou encore les enjeux de collaboration revisités à la lumière des usages et de l'appropriation des technologies d'assistance à la conception.

TABLE DES FIGURES ET DES TABLES

Figure 1. Fonctionnement de la théorie C-K définie par Hatchuel et Weil (Masson et al., 2016)	34
Figure 2. Typologies des modèles de conception d'après Blessing (1995)	37
Figure 3. "The cognitive artefacts of designing" (Visser, 2006, p.34) complété par (Self, Dalke, & Evans, 2009)	38
Figure 4. Modèle du processus de conception par Farel (1991 repris par Claeys, 2013)	41
Figure 5. « <i>Transparent layering system</i> », modèle proposé par Chokhachian & Atun (2014)	44
Figure 6. Représentation de l'évolution du processus de conception selon le modèle « system-enabler » proposé par Ostwald (2012)	46
Figure 7. Schéma générique représentant les relations entre les 4 catégories d'activité de conception : R, G, E, P par Oxman (2006)	48
Figure 8. Symboles, limites et liens définis par Oxman (2006)	49
Figure 9. De haut en bas : modèle processus sur support papier, modèle processus avec CAD traditionnel, modèle composé, définis par Oxman (2006)	50
Figure 10. Ligne du temps reprenant les théories et modèles développés au fil du temps pour expliciter le processus de conception. Les spécificités sont étudiées pour différents domaines, de haut en bas : tous domaines confondus ; en architecture ; en architecture numérique	52
Figure 11. Utilisation des trois fonctions des médias au cours du processus de conception (Claeys, 2013)	55
Figure 12. Les 4 phases de la conception assistée par ordinateur définies par Aish & Bredella (2017)	60
Figure 13. Types de logiciels de modélisation paramétrique, (Stals, Jancart, & Elsen, 2018) sur base des travaux de Janssen et de ses collègues (2016)	79
Figure 14. Relation entre les termes utilisés dans le domaine de la conception paramétrique et focus sur la « modélisation algorithmique » appelée plus communément « modélisation paramétrique »	81
Figure 15. Création d'un cercle par deux logiciels de modélisation paramétrique de type différent. A gauche : Rhinoceros®, à droite : Grasshopper®	82

Figure 16. Exemples d'instances différentes à partir de variations paramétriques (Hernandez, 2006)	85
Figure 17. Représentation symbolique et explicite d'un modèle paramétrique	85
Figure 18. Comparaison de l'évolution de l'effort cognitif dédié aux connaissances de conception et aux règles algorithmiques, par Yu et ses collègues (2015)	101
Figure 19. Modèle des cinq forces selon Pichault (2013)	123
Figure 20. Processus de décision lié à l'adoption du BIM selon Hochscheid & Halin, 2018	124
Figure 21. Schéma récapitulatif de l'état de l'art et identification de thématiques à questionner (étant donné leur ordre d'apparition ci-dessus, numérotées de 1 à 5).	127
Figure 22. Caractérisation d'un paradigme scientifique. Schéma traduit de Patel (2015), adapté des théories de Hay (2002) et Crotty (1998)	132
Figure 23. Structure du questionnaire en ligne	145
Figure 24. Façade d'une habitation unifamiliale (Pygma Architecture) composée de différents profilés en acier	148
Figure 25. Mode de production de données	166
Figure 26. Extrait du codage d'une vidéo enregistrée pour le projet FH	170
Figure 27. Séquençage des observations et retranscription de deux moments clés	174
Figure 28. Répartition du sexe, de l'âge et de l'expertise parmi les architectes belges ayant participé, N = 572	177
Figure 29. Niveau de connaissance et usage des outils numériques dans les bureaux d'architecture belges	180
Figure 30. Les architectes et leurs outils numériques : perception de la satisfaction et de la complexité, N = 431	181
Figure 31. Perception croissante de la complexité du travail d'architecte avec l'avènement des outils numériques, en regard de l'âge, N = 570	183
Figure 32. Influence des outils numériques sur plusieurs facteurs de la pratique de la conception architecturale selon les designers belges en réponse à la question : « Les outils numériques que vous utilisez dans la conception architecturale dans le cadre de vos projets ont... », N = 539	184
Figure 33. Facteurs et acteurs influençant la forme conçue et produite, N= 572	185
Figure 34. Comparaison des intervenants consultés en interne ou en externe, N = 399 (173 NA supprimés)	186
Figure 35. Taux d'intérêt des outils paramétriques en fonction de la taille des bureaux, N = 376	188
Figure 36. Types de tâches et utilisation respective (en % de répondants) des outils paramétriques	191
Figure 37. Influence des outils paramétriques sur plusieurs facteurs de la pratique de la conception architecturale selon les designers belges, N= 357	191

Figure 38. Effet des outils paramétriques sur la génération de formes à géométrie complexe en fonction de l'utilisation de ces outils, N=356	193
Figure 39. Comparaison des intérêts (à gauche) et difficultés (à droite) perçus en début de formation	220
Figure 40. Termes et récurrences définissant le ressenti des participants pour le logiciel Grasshopper© après une journée de formation	221
Figure 41. Comparaison des intérêts (à gauche) et difficultés (à droite) perçus en fin de formation	223
Figure 42. Evolution de la représentativité des attributs pour les intérêts et difficultés avant/après une journée de formation	225
Figure 43. De haut en bas : maquette physique du projet d'extension d'une caserne de pompiers par le bureau SUBSTRA ; modélisation paramétrique de la toiture	234
Figure 44. Modélisation paramétrique d'un escalier à partir de croquis - bureau SUBSTRA	235
Figure 45. De haut en bas : image de synthèse de Weizhi headquarters, China ; modélisation des brise-soleils	238
Figure 46. De haut en bas : maison Ypsilon ; chantier de la structure paramétrique ; lignes directrices du projet	240
Figure 47. Sous-structure de la toiture servant de coffrage perdu et dont la courbure accompagne le tracé des flux de circulation et régule l'acoustique	240
Figure 48. De haut en bas : image de synthèse du hall polyvalent conçu par AADD ; exemples de profilés en béton	248
Figure 49. Représentations réalisées par A2M de son organisation interne. De gauche à droite : relations entre les compétences ; disposition physique dans le bureau	250
Figure 50. De gauche à droite : premier visuel produit lors de la conception originelle du projet ; projet construit	252
Figure 51. Repérage des épaisseurs d'isolant inconnues ; modélisation de la façade et projection plane ; indication automatique par le logiciel de la valeur exacte à chaque intersection	253
Figure 52. Illustrations de moments clés de gauche à droite : en haut A_FH_3 et A_FH_4, en bas A_FH_17 et A_FH_20	255
Figure 53. De gauche à droite : visuel produit lors de la conception originelle du projet ; projet en phase chantier	257
Figure 54. Etude d'ensoleillement pour générer un plan masse, projet du bureau A2M	259
Figure 55. De gauche à droite : visuel de la façade de l'hôtel ; tracé des collines de Lisbonne	261

Figure 56. De haut en bas : interface Rhinoceros© et Grasshopper© avec la double représentation de la modélisation ; simulation de l'apport de chaleur dans chaque chambre en fonction de l'inclinaison des brise-soleils ; optimisation du nombre de brise-soleils différents sur l'ensemble de la façade	263
Figure 57. Résumé des terrains d'étude	280
Figure 58. Typologies des modèles de conception d'après Blessing (1995)	290
Figure 59. Modèle de conception via des outils de modélisation paramétrique (en trait plein)	291
Figure 60. Comparaison du processus de conception supporté par le dessin/CAO traditionnelle et le dessin/modélisation paramétrique	295
Figure 61. Montée en compétences via la modélisation paramétrique dans une PME (les termes adoptés sont à considérer en regard d'une expertise paramétrique et non d'une expertise générale liée à la profession d'architecte)	306
Table 1. Catégorisation des spécificités paramétriques issues de la littérature	91
Table 2. Regard sur les recherches effectuées sur les pratiques numériques et paramétriques en architecture. Pour chaque colonne (catégorie de participants observés), les signes moins (-) et plus (+) indiquent dans quelle mesure ces participants connaissent la technologie, selon les auteurs respectifs.	97
Table 3. Combinaison des différents modes de division du travail	116
Table 4. Caractéristiques des quatre configurations de bureaux envisageables	120
Table 5. Répartition des profils selon leur usage des outils de modélisation paramétrique et leur connaissance du terme « modélisation paramétrique »	151
Table 6. Répartition des personnes potentielles à interroger en regard de leurs connaissances	157
Table 7. Distribution de la taille des bureaux en Belgique selon notre étude.	178
Table 8. Entretiens téléphoniques semi-directifs réalisés avec des architectes n'utilisant pas spécifiquement la modélisation paramétrique mais d'accord d'approfondir le sujet (par ordre alphabétique)	197
Table 9. Synthèse des cas d'étude présentés dans la thèse	228
Table 10. Etat des lieux des questions de recherche : à gauche, les QR ; à droite, le résumé des principaux résultats	281

BIBLIOGRAPHIE

- Abdelhameed, W. A.** (2013). Virtual reality use in architectural design studios: A case of studying structure and construction. *Procedia Computer Science*, 25, 220–230. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.11.027>
- Abdelmohsen, S. M., & Massoud, P. M.** (2015). Making sense of those batteries and wires Parametric design between emergence and autonomy. *16th International Conference CAAD Futures*, 279–296.
- Abu Alatta, R., & Freewan, A.** (2017). Investigating the effect of employing immersive virtual environment on enhancing spatial perception within design process. *Archnet-IJAR*, 11(2), 219–238. <https://doi.org/10.1002/adma.200802611>
- Aish, R., & Bredella, N.** (2017). The evolution of architectural computing: From Building Modelling to Design Computation. *Arq: Architectural Research Quarterly*, 21(1), 65–73.
- Aish, R., & Woodbury, R.** (2005). Multi-level Interaction in Parametric Design. *Computer Science*, 3638, 151–162. Retrieved from <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-02115-2>
- Akin, Ö.** (2001). Variants and Invariants of Design Cognition. In C. Eastman, M. McCracken, & W. Newstetter (Eds.), *Design knowing and learning: Cognition in design education* (pp. 105–124). Amsterdam: Elsevier.
- Amphoux, P.** (2002). Ambiance et conception : De l'analyse des ambiances à la conception architecturale et urbaine. *Conférence Internationale Herbert Simon, Sciences de l'ingénierie, Sciences de La Conception*, 19–32.
- Archer, B.** (1976). *Lecture delivered at Manchester Regional Centre for Science and Technology*.
- Architects' Council of Europe.** (2019). La Profession d'architecte en Europe 2018 : une étude du secteur. *Etude Réalisée Par Mirza & Nacey Research*.
- Bagneris, M.** (2009). *Contribution à la conception et à la réalisation des morphologies non-standard : les formes pascaliennes comme outil*. Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier 2.
- Baker, L.** (2006). Observation: A Complex Research Method. *Library Trends*, 55 (1), 171–189.
- Bastien, S.** (2007). Observation participante ou participation observante? Usages et justifications de la notion de participation observante en sciences sociales. *Recherches Qualitatives* –, 27(1), 127–140. Retrieved from <http://www.recherche-qualitative.qc.ca/Revue.html>
- Ben Rajeb, S.** (2011). Collaboration, coopération ou participation ? *DNArchi*.
- Ben Rajeb, S.** (2012). *Modélisation de la collaboration distante dans les pratiques de conception architecturale : Caractérisation des opérations cognitives en conception collaborative instrumentée*. Thèse, ENSA de Paris La Villette et de l'Université Paris-Est.

- Bernier, L., & Perrault, I.** (1987). Pratique du récit de vie : retour sur L'artiste et l'oeuvre à faire. *Cahiers de Recherche Sociologique*, 5(2), 29–43.
- Bilda, Z., & Demirkan, H.** (2003). An insight on designers' sketching activities in traditional versus digital media. *Design Studies*, 24(1), 27–50.
- Bilda, Z., Gero, J. S., & Purcell, T.** (2006). To sketch or not to sketch? That is the question. *Design Studies*, 27(5), 587–613. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2006.02.002>
- Blavier, A.** (2006). *Impact des images en 2D ou 3D sur les processus cognitifs impliqués dans le traitement visuel et dans le contrôle de l'action: le cas de la chirurgie minimale invasive*. Doctorat à l'Université de Liège.
- Bleyen, J., & Van Molle, L.** (2012). *Wat is mondelinge geschiedenis?* Leuven; Den Haag: Acco.
- Blomberg, L., Burrell, M., & Guest, G.** (2003). An ethnographic approach to design. *J. Jacko (Ed.). The Human Computer Interaction Handbook: Fundamental, Evolving Technologies and Emerging Applications*, 964–986.
- Bonnardel, N.** (2000). Towards understanding and supporting creativity in design : analogies in a constrained cognitive environment. *Knowledge-Based Systems*, 13, 505–513.
- Bonnardel, N.** (2006). *Créativité et conception: Approches cognitives et ergonomiques*. Marseille: SOLAL Editeurs.
- Borillo, M., & Goulette, J. P.** (2002). *Cognition et création - Explorations cognitives des processus de conception* (Mardage Eds, Ed.). Belgique.
- Bourbonnais, S.** (2015). *Sensibilités technologiques : expérimentations et explorations en architecture numérique 1987-2010*. Thèse, Université de Laval Québec et Université de Paris-est.
- Boyd, R., & Holton, R. J.** (2017). Technology, innovation, employment and power: Does robotics and artificial intelligence really mean social transformation? *Journal of Sociology*, 1(15). <https://doi.org/10.1177/1440783317726591>
- Brinkmann, S.** (2014). Interview. *Encyclopedia of Critical Psychology*, 1008–1010.
- Buchanan, R.** (1992). Wicked problems in design thinking. *Design Issues*, 8(2), 5–12.
- Bukhari, F. A.** (2011). *A Hierarchical Evolutionary Algorithmic Design (HEAD) System for Generating and Evolving Buildings Design Models*. Queensland University of Technology.
- Burry, J., & Burry, M.** (2008). The bonds of spatial freedom. *26th ECAADe Conference - Architecture in Computro*, 301–308. Antwerpen.
- Burry, J. R.** (2007). Mindful Spaces : Computational Geometry and the Conceptual Spaces in which Designers Operate Mindful Spaces : Computational Geometry. *IJAC - International Journal of Architectural Computing*, 05(04), 611–624.
- Caetano, I., & Leitão, A. M.** (2017). Integration of an Algorithmic BIM Approach in a Traditional Architecture Studio. *Protocols, Flows and Glitches, Proceedings of the 22nd International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA)*, (Terzidis 2003), 633–642. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcde.2018.11.004>

- Caetano, I., Santos, L., & Leitão, A.** (2015). From Idea to Shape , From Algorithm to Design: Algorithmic-based Processes in Architecture. *The next City - New Technologies and the Future of the Built Environment [16th International Conference CAAD Futures 2015]*, 483.
- Callon, M.** (2004). The role of hybrid communities and socio-technical arrangements in the participatory design. *Journal of the Center for Information Studies*, 5, 1–10.
- Carmo, M.** (2001). *Architecture in the Age of Printing : Orality, Writing, Typography, and Printed Images in the History of Architectural Theory*. MIT Press.
- Carmo, M.** (2013). *AD : The Digital Turn in Architecture 1992-2012*. United Kingdom: John Wiley and Sons Ltd.
- Carmo, M.** (2017). *The Second Digital Turn - Design Beyond Intelligence*. Writing Architecture, Mit Press.
- Chabard, P.** (2012). Antoine Picon. Culture numérique et architecture : une introduction.
- Chadoin, O.** (2006). *Être architecte : les vertus de l'indétermination. De la sociologie d'une profession à la sociologie du travail professionnel*. Presses universitaires de Limoges.
- Chien, S.-F., & Yeh, Y.-T.** (2012). On Creativity and Parametric Design. *Proceedings of 30th ECAADe Conference : Digital Aids to Design Creativity, 1*, 245–254. Retrieved from https://cumincad.architexturez.net/system/files/pdf/ecaade2012_223.content.pdf
- Chokhachian, A., & Atun, R. A.** (2014). A Framework for Exploring the Role of Parametric Design on Design Procedure. *Unspoken Issues in Architectural Education UIAE2014*. North Cyprus.
- Chupin, J.-P.** (2010). *Analogie et théorie en architecture : De la vie, de la ville et de la conception, même*. Gollion : Infolio (coll. Projet & théorie).
- Cichocka, J. M., Browne, W. N., & Rodriguez, E.** (2017). Optimization in the architectural practice - An International Survey. *Protocols, Flows and Glitches, Proceedings of the 22nd International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) 2017*, 387–397. Retrieved from <https://codeofspace.wordpress.com/download/>
- Claeys, D.** (2013). *Architecture & complexité : Un modèle systémique du processus de (co) conception qui vise l'architecture*. Université catholique de Louvain.
- Claeys, D.** (2018). Discontinuités des processus de conception architecturale : Crises de la représentation ? *Acta Europæana Systemica*, 8, 19–36.
- Couwenbergh, J.** (2015). L'approche computationnelle : un changement de paradigme en conception architecturale. Perspectives d'enseignements et de recherches. *Journée de La Recherche et Des Doctorants Du LOCI*. Université catholique de Louvain, Bruxelles: Presses Universitaires de Louvain.
- Cross, N.** (1984). *Developments in design methodology*. Chichester: Wiley.
- Crotty, M.** (1998). *The foundations of social research: meaning and perspective in the research process*. London: SAGE Publications.
- Darses, F.** (2004). Processus psychologiques de résolution collective des problèmes de conception : Contribution de la psychologie ergonomique. *Document de Synthèse En Vue*

d'obtenir Une Habilitation à Diriger Des Recherches. Paris : Université Paris V – René Descartes.

- Darses, F., Détienne, F., & Visser, W.** (2001). Assister la conception: Perspectives pour la psychologie cognitive ergonomique. *EPIQUE 2001, Actes Des Journées d'étude En Psychologie Ergonomique*, 11–20. Nantes.
- Davis, D.** (2013). Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture (School of Architecture and Design College of Design and Social context RMIT University). Retrieved from http://www.danieldavis.com/papers/danieldavis_thesis.pdf
- Davis, D., Burry, J., & Burry, M.** (2011). Untangling Parametric Schemata : Enhancing Collaboration through Modular Programming Introduction : Why parametric modelling can be difficult. *CAAD Futures 2011*, 55–68.
- de Boissieu, A.** (2013). Modélisation paramétrique en conception architecturale : Caractérisation des opérations cognitives de conception pour une pédagogie. *PhD Thesis, ENSA Paris La Villette.*
- de Boissieu, A., & Guéna, F.** (2012). Grasshopper et la programmation sur Rhinoceros 4: une introduction. *DNArch*. Consulté sur <http://dnarchi.fr> le 08/08/2019.
- de Sardan, J.-P. O.** (2008). *La rigueur du qualitatif - Les contraintes empiriques de l'interprétation socio-anthropologique* (Anthropolo). Louvain-La-Neuve: Bruylant-Acadeia.
- Defays, A.** (2015). *Influence des communications multimodales sur le processus de grounding*. Thèse, Université de Liège.
- Derycke, D.** (2012). La complexité inhérente aux modèles numériques et le paradigme de la représentation architecturale - Brèves considérations sur les pratiques contemporaines. *SCAN'12 - Complexité(s) Des Modèles Numériques*. Paris.
- Dessart, M.** (2017). *Conception et patrimoine : impact de l'édifice existant sur les phases amont du processus*. Université de Liège.
- Deutsch, R.** (2019). *Superusers - Design Technology Specialists and the Future of Practice*. London: Routledge - Taylor & Francis Group.
- Diaz Moore, K., & Geboy, L.** (2010). The question of evidence: current worldviews in environmental design research and practice. *Arq: Architectural Research Quarterly*, 14(02), 105–114.
- Dino, I. G.** (2012). Creative design exploration by parametric generative systems in architecture. *Metu Journal of the Faculty of Architecture*, 29(1), 207–224. <https://doi.org/10.4305/METU.JFA.2012.1.12>
- Dionne, C.** (2014). Quand le langage construit : invention, usage et vérité dans le discours architectural moderne. *Conférence Publique, ENAC Faculty, EPFL Lausanne, Suisse.*
- Dorta, T., Kinayoglu, G., & Hoffmann, M.** (2016). Hyve-3D and the 3D Cursor: Architectural co-design with freedom in virtual reality. *International Journal of Architectural Computing*, 14(2), 87–102. <https://doi.org/10.1177/1478077116638921>
- Dow, S. P., Fortuna, J., Schwartz, D., Altringer, B., Schwartz, D. L., & Klemmer, S. R.** (2010). Prototyping Dynamics : Sharing Multiple Designs Improves Exploration, Group Rapport, and

Results. *Proceedings of the 2011 Annual Conference on Human Factors in Computing Systems, ACM*, 1–10. New York.

- Drogemuller, R., Crawford, J., & Egan, S.** (2004). Linking Early Design Decisions Across Multiple Disciplines. *European Conference on Product and Process Modelling in the Building and Construction Industry: ECPPM*. Istanbul, Turkey.
- Dubberly, H.** (2004). How do you Design? A Compendium of Models. Retrieved January 15, 2019, from <http://www.dubberly.com/articles/how-do-you-design.html>
- Eisenberger, R., & Rhoades, L.** (2001). Incremental effects of reward on creativity. *Journal of Personality and Social Psychology*, 81, 728–741.
- Eisenman, P.** (1992). Visions unfolding: architecture in the age of electronic media. *AD*.
- Elsen, C.** (2011). *La Médiation par les objets en design industriel - Perspectives pour l'ingénierie de conception*. Thèse, Université de Liège.
- Estevez, D.** (2001). *Dessin d'architecture et infographie, l'évaluation contemporaine des pratiques*. Paris: CNRS Editions.
- Flanagan, J. C.** (1954). The critical incident technique. *Psychological Bulletin*, 51, 327–358.
- Foster, & Partners.** (2006). Instrumental geometry. *Architectural Design*, 76(2), 42–53.
- Frazer, J.** (2016). Parametric computation: History and future. *Architectural Design*, 86(2), 18–23. <https://doi.org/10.1002/ad.2019>
- Gallas, M.-A., Jacquot, K., Jancart, S., & Delvaux, F.** (2015). Parametric Modeling : An Advanced Design Process for Architectural Education. *Real Time - 33th ECAADe Conference*, 2, 149–157. Vienna.
- Gallas, M., & Delfosse, V.** (2015). Sketch-based and parametric modeling : Association of two externalization processes for early daylight optimization. *CAAD Futures*, 226–238.
- Garner, S.** (2000). Is Sketching Still Relevant in Virtual Design Studios ? *Proceedings of the Fifth Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia - CAADRIA*, 1–6. Singapore.
- Gold, R.** (1958). Roles in Sociological Field Observations. *Social Forces*, 36 (3), 217–223.
- Goldschmidt, G.** (1991). The dialectics of sketching. *Creativity Research Journal*, 4(2), 123–143.
- Green, J., & Stinson, S.** (1999). Post positivist research in dance. In *Researching Dance : Evolving Models of Inquiry* (pp. 91–123). S. Fraleigh & P. Hanstein.
- Groat, L., & Wang, D.** (2002). *Architectural research methods*. New York: J. Wiley.
- Gu, N., & Ostwald, M. J.** (2012). Computational methods and technologies : Reflections on their impact on design and education. In N. Gu & X. Wang (Eds.), *Computational Design Methods and Technologies - Applications in CAD, CAM and CAE Education* (pp. 412–419). Information Science Reference.
- Gu, N., & Wang, X.** (2012). *Computational Design Methods and Technologies: Applications in CAD, CAM and CAE Education* (N. Gu & X. Wang, Eds.). IGI Global.

- Guba, E. G. (1990). *The paradigm dialog*. SAGE Publications Inc.
- Hadjri, K. (2003). Bridging the gap between physical and digital models in architectural design studios. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(5/W10).
- Hanna, R., & Barber, T. (2001). An inquiry into computers in design: attitudes before-attitudes after. *Design Studies*, 22(3), 255–281.
- Harding, J., Joyce, S., Shepherd, P., & Williams, C. (2012). Thinking Topologically at Early Stage Parametric Design. *Advances in Architectural Geometry 2012*, 67–76. Retrieved from <http://opus.bath.ac.uk/31469/>
- Hay, C. (2002). *Political Analysis: A Critical Introduction*. Red Globe Press.
- Hernandez, C. R. B. (2006). Thinking parametric design: introducing parametric Gaudi. *Design Studies*, 27, 309–324.
- Heumann, A., & Mullenix, R. (2014). Digitally designing collaboration computational approaches to process, practice, and product. *ACADIA*, 317–326.
- Hewett, T. (2005). Informing the design of computer-based environments to support creativity. *International Journal of Human-Computer Studies*, 63, 383–409.
- Heylighen, A., & Martin, G. (2002). That elusive concept of concept in architecture. *DCC'04 : Design Computing and Cognition*.
- Hochscheid, É., & Halin, G. (2018). L'adoption du BIM dans les agences d'architecture en France. *SCAN18 - Immersion et Émersion*.
- Houde, S., & Hill, C. (1997). What do Prototypes Prototype ? In M. Helander, T. Landauer, & P. Prabhu (Eds.), *Handbook of Human-Computer Interaction (2nd Ed)*. Amsterdam: Elsevier Sciences.
- Hudson, R. (2010). Strategies for parametric design in architecture. *Civil Engineering*, 274.
- Iordanova, I., Tidafi, T., Guité, M., Paoli, G. D. E., & Lachapelle, J. (2009). Parametric methods of exploration and creativity during architectural design - A case study in the design studio. *Joining Languages, Cultures and Visions: Proceedings of the 13th International CAAD Futures Conference*, 423–439.
- Jabi, W., Soe, S., Theobald, P., Aish, R., & Lannon, S. (2017). Enhancing parametric design through non-manifold topology. *Design Studies*, 52, 96–114.
- Janssen, P. (2015). Parametric BIM workflows. *CAADRIA 2015 - 20th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia: Emerging Experiences in the Past, Present and Future of Digital Architecture*, 437–446. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84936085002&partnerID=tZ0tx3y1>
- Janssen, P. (2016). Parametric BIM. *Intervention at International BIM Competition 2016 Sharing*, (Consulted on <http://bimsg.org>, 09/11/2017).
- Janssen, P., & Stouffs, R. (2015). Types of parametric modelling. *International Conference of Association for Computer-Aided Architectural Design Research CAADRIA*, 157–166.
- Jeanet, A. (1998). Les objets intermédiaires dans la conception . Éléments pour une sociologie

- des processus de conception. *Sociologie Du Travail*, 3, 291–316.
- Jefferson, G.** (2004). Glossary of transcript symbols with an introduction. In G. H. Lerner (Ed.), *Conversation Analysis: Studies from the first generation*.
- Joachim, G.** (2016). *L'apprentissage des conversations de conception architecturale*. Thèse de doctorat, Université de Liège.
- Khabazi, Z.** (2010). Generative algorithms concepts and experiments weaving. *Morphogenesis*, London. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:GENERATIVE+ALGORITHM+MS+CONCEPTS+and+EXPERIMENTS+:+WEAVING#0>
- Killian, A.** (2006). Design innovation through constraint modeling. *International Journal of Architectural Computing*, 4(1), 87–105.
- Kirsh, D.** (2010). Thinking with external representations. *AI & Society*, 25(4), 441–454.
- Kolarevic, B.** (2005). *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. London: Taylor & Francis.
- Kotter, J.** (2015). *Conduire le changement*. Pearson France.
- Kuhn, T.** (1962). The Structure of Scientific Revolutions. In *International Encyclopedia of Unified Science*, 2 (2).
- Laiserin, J.** (2009). *Next Gen BIM : Graphisoft Teamwork 2.0 will revolutionize BIM/IPD workflow and collaboration*. Issue 25. Consulted on www.laiserin.com.
- Lalande, A.** (1926). *Vocabulaire technique et critique de la philosophie*. PUF (coll. Quadrige), éd.2002.
- Lallemand, C., & Gronier, G.** (2015). Fiche 6 Observation. Dans C. Lallemand, & G. Gronier, *Méthodes de Design UX 30 Méthodes Fondamentales Pour Concevoir et Évaluer Les Systèmes Interactifs*. Paris: Eyrolles., 81–94.
- Lallemand, C., & Gronier, G.** (2016). *Méthodes de design UX - 30 méthodes fondamentales pur concevoir et évaluer les systèmes interactifs* (Eyrolles, Ed.). Paris.
- Lansdown, J.** (1987). Computers and Visualization of Design Ideas: Possibilities and Promises. *CAAD Futures*.
- Leach, N.** (2014). Parametrics Explained. *Next Generation Building*, 1(University of Southern California, Harvard GSD), 1–10. <https://doi.org/10.7564/14-NGBJ10>
- Lebahar, J.** (2007). *La conception en design industriel et en architecture: Désir, pertinence, coopération et cognition* (Lavoisier, Ed.).
- Leclercq, P.** (2005). Le concept d'esquisse augmentée. *Proceedings of SCAN 2005, Séminaire de Conception Architecturale Numérique*, 16.
- Leclercq, P., & Heylighen, A.** (2002). 5,8 Analogies per hour. A designer's view on analogical reasoning. *AID'02 Artificial Intelligence in Design*.
- Leclercq, P., & Elsen, C.** (2007). Le croquis synthé-numérique. *SCAN : Apports de l'image Numérique En Conception*. Paris.

- Lecourtois, C.** (2010). Complexité architecturale et assistance informatique. *Actes Du Colloque DRS 2010*.
- Lecourtois, C.** (2012). Modéliser la complexité de la conception architecturale numérique, Architecturologie et modèles complexes. *Complexité(s) Des Modèles de l'architecture Numérique*. Paris: Presses Universitaires de Nancy.
- Lee, J., Gu, N., & Williams, A. P.** (2014). Parametric Design Strategies for the Generation of Creative Designs. *International Journal of Architectural Computing*, 12(3), 263–282. <https://doi.org/10.1260/1478-0771.12.3.263>
- Lee, J. H., Ostwald, M. J., & Gu, N.** (2016). The language of design : Spatial cognition and spatial language in parametric design. *IJAC - International Journal of Architectural Computing*, 14(3), 277–288.
- Léglise, M.** (2016). Informatique et architecture : la grande illusion. *SCAN-16*, Retrieved from [Http://Scan16.Toulouse.Archi.Fr](http://Scan16.Toulouse.Archi.Fr).
- Leitão, A.** (2013). Teaching Computer Science for Architecture - A proposal. *1ST ECAADe Regional International Workshop*, 95–104.
- Leitão, A., Caetano, I., & Correia, H.** (2016). Processing architecture. *IJAC International Journal of Architectural Computing*, 14(2), 147–157. <https://doi.org/10.1177/1478077116638927>
- Lim, Y., Stolterman, E., & Tenenberg, J.** (2008). The Anatomy of Prototypes : Prototypes as Filters , Prototypes as Manifestations of Design Ideas. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 15(2), article 7.
- Lincoln, Y. S., Lynham, S. A., & Guba, E. G.** (2011). Paradigmatic controversies, contradictions, and emerging confluences, revisited. In *N. K. Denzin & Y. S. Lincoln* (pp. 97–128). The Sage handbook of qualitative research.
- Loyer, F.** (1974). Pour bien lire une maquette d'architecture: le relatoscope. *Communication et Langages*, 23(1), 56–75.
- Lynn, G.** (1993). Architectural Curvilinearity : The folded, the pliant and the supple. *AD*.
- Lynn, G.** (2000). Embryologic Houses (c). *AD*.
- Martineau, S.** (2005). L'observation en situation: enjeux, possibilités et limites. *Recherches Qualitatives , Hors Série (2)*, 5–17.
- Masson, P. Le, & McMahon, C.** (2016). Armand Hatchuel et Benoit Weil La théorie C-K , un fondement formel aux théories de l'innovation. *Les Grands Auteurs Du Management de l'innovation et de La Créativité*, In *Quarto - Editions Management et Société*, 588–613. Retrieved from <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01243331>
- Masson, P. Le, McMahon, C., Masson, P. Le, McMahon, C., Hatchuel, A., & La, W.** (2016). *Armand Hatchuel et Benoit Weil La théorie C-K , un fondement formel aux théories de l'innovation To cite this version : HAL Id : hal-01243331*.
- McDonald, S.** (2005). Studying actions in context: a qualitative shadowing method for organizational research. *Qualitative Research* , 5 (4), 455–473.
- Milovanovic, J., Moreau, G., Siret, D., & Miguet, F.** (2017). Virtual and Augmented Reality in

Architectural Design and Education : An Immersive Multimodal Platform to Support Architectural Pedagogy. *CAADFutures*, 513–532.

- Mintzberg, H.** (1986). *Le pouvoir dans les organisations*. Paris: Editions d'Organisation.
- Mintzberg, H.** (1998). *Structure et dynamique des organisations*. Paris: Editions d'Organisation.
- Mitchell, W. J.** (2005). Constructing complexity. *Computer Aided Architectural Design Futures 2005 - Proceedings of the 11th International CAAD Futures Conference*, 41–50.
- Murdoch, J.** (1997). Towards a geography of heterogeneous associations. *Progress in Human Geography*, 21(3), 321–337.
- Nizet, J., & Pichault, F.** (1995). *Comprendre les organisations - Mintzberg à l'épreuve des faits* (Gaëtan Mor).
- Norman, D. A.** (2010). The research-practice gap: the need for translational developers. *Intercations*, 17(4), 9–12.
- Oktan, S., & Serbulent, V.** (2017). Parametricism: a style or a method? *ARCHITHEO*, 66–74.
- Ordre des Architectes.** (2016). Annual report. *Consulted on Wwww.Ordredesarchitectes.Be*.
- Organisation Internationale de Normalisation.** (2019). *Organisation et numérisation des informations relatives aux bâtiments et ouvrages de génie civil, y compris modélisation des informations de la construction (BIM) — Gestion de l'information par la modélisation des informations de la construction*. Consulté sur <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:19650:-1:ed-1:v1:fr> le 29/08/2019.
- Orlikowski, W. J.** (1992). The Duality of Technology : Rethinking the Concept of Technology in Organizations. *Organization Science*, 3(3), 398–427.
- Orlikowski, W. J.** (2000). Using Technology and Constituting Structures: A Practice Lens for Studying Technology in Organizations. *Organization Science*, 11(4), 404–428. <https://doi.org/10.1287/orsc.11.4.404.14600>
- Orlikowski, W. J.** (2007). Sociomaterial practices: Exploring technology at work. *Organization Studies*, 28, 1435–1448. <https://doi.org/10.1177/0170840607081138>
- Ostwald, M. J.** (2012). Systems and Enablers : Modeling the impact of contemporary computational methods and technologies on the design process. In N. Gu & X. Wang (Eds.), *Computational Design Methods and Technologies - Applications in CAD, CAM and CAE Education* (pp. 1–17). <https://doi.org/10.4018/978-1-61350-180-1.ch001>
- Oxman, R.** (2006). Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, 27(3), 229–265. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.002>
- Oxman, R.** (2017). Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. *Design Studies*, 52, 4–39.
- Oxman, R., & Gu, N.** (2015). Theories and Models of Parametric Design Thinking. *Real Time - Proceedings of the 33rd ECAADe Conference Vienna, Austria, 2*, 477–482.
- Oxman, R., & Oxman, R.** (2014). *Theories of the Digital in Architecture*. U.K.: Routledge.
- Pallasmaa, J.** (2005). *The eyes of the skin - Architecture and the Senses*. London: Wiley Academy.

- Patel, S. (2015). The research paradigm – methodology, epistemology and ontology – explained in simple language.
- Peters, B., & Whitehead, H. (2008). *Geometry, Form and Complexity*. London: RIBA Publishing, 1–8.
- Pettigrew, A. (1987). Context and action in the transformation of the firm. *Journal of Management Studies*, 24(6), 649–670.
- Pichault, F. (2013). *Gestion du changement - Vers un management polyphonique* (De Boeck S).
- Picon, A. (2010). *Culture numérique et architecture* (Birkhäuser). Bâle.
- Picon, A., & Razavi, A. (2011). Architecture numérique : culture et stratégies opératoires. *D'architectures*, 197, 31–49.
- Pottmann, H., Eigensatz, M., Vaxman, A., & Wallner, J. (2015). Architectural geometry. *Computers and Graphics (Pergamon)*, 47, 145–164. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2014.11.002>
- Purcell, A. T., & Gero, J. S. (1998). Drawings and the design process: A review of protocol studies in design and other disciplines and related research in cognitive psychology. *Design Studies*, 19(4), 389–430.
- Riccobono, A., & Pellitteri, G. (2014). The Digital change. Reasons and meanings of a new architectural expressivity. In D. Rockwood & M. Sarvimäki (Eds.), *ARCC/EAAE 2014 / Beyond Architecture: New Intersections & Connections* (pp. 408–417). University of Hawai'i at Ma-noa.
- Robertson, B. F., & Radcliffe, D. F. (2009). Impact of CAD tools on creative problem solving in engineering design. *Computer-Aided Design*, 41(3), 136–146.
- Roussel, M. (2014). *L'approche morphogénétique et la poursuite de la complexité*. Consulté sur <http://dnarchi.fr> le 03/11/2015.
- Safin, S. (2011). *Processus d'externalisation graphique dans les activités cognitives complexes: le cas de l'esquisse numérique en conception architecturale individuelle et collective*. Doctorat, Université de Liège, Belgique.
- Safin, S., Leclercq, P., & Decortis, F. (2007). Impact d'un environnement d'esquisses virtuelles et d'un modèle 3D précoce sur l'activité de conception architecturale. *Revue d'Interaction Homme-Machine*, 8(2), 1–34.
- Salim, F. D., & Burry, J. (2010). Software openness: Evaluating parameters of parametric modeling tools to support creativity and multidisciplinary design integration. *D. Taniar et Al. (Eds.): ICCSA, (Part 3)*, 483–497.
- Sanguinetti, P., & Abdelmohsen, S. (2007). On the Strategic Integration of Sketching And Parametric Modeling in Conceptual Design. *ACADIA*, 242–249. Retrieved from http://cumincad.scix.net/cgi-bin/works/Show?acadia07_242
- Scheffers, P., Seijkens, N., Rondeaux, G., Beuker, L., Lisein, O., & Pichault, F. (2017). *Rapport d'étude sur la nature, l'évolution et la quantification des prestations des architectes*. Rapport commandé par l'Ordre des Architectes Francophones et Germanophones.
- Schnabel, M. A. (2004). Architectural design in virtual environments - Exploring cognition and

communication in Immersive Virtual Environments. *PhD Thesis at the University of Hong Kong*. [https://doi.org/10.1016/S0142-694X\(97\)85457-9](https://doi.org/10.1016/S0142-694X(97)85457-9)

- Schnabel, M. A.** (2012). Learning Parametric Designing. In N. Gu & X. Wang (Eds.), *Computational Design Methods and Technologies - Applications in CAD, CAM and CAE Education* (pp. 56–70). Information Science Reference.
- Schön, D. A., & Wiggins, G.** (1992). Kinds of seeing and their functions in designing. *Design Studies*, 13(2), 135–156.
- Schonlau, M., & Fricker, R. D.** (2002). Advantages and Disadvantages of Internet Research Surveys: Evidence from the Literature. *Field Methods*, 14(4), 347–367. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2125.2002.t01-3-01689.x>
- Schumacher, P.** (2009). Parametricism: a new global style for architecture and urban design. *AD*.
- Self, J., Dalke, H., & Evans, M.** (2009). Industrial Design Tools and Design Practice: An approach for understanding relationships between design tools and practice. *IASDR09 Design Rigor and Relevance*.
- Shelden, D. R.** (2002). *Digital Surface Representation and the Constructability of Gehry's Architecture*. Massachusetts Institute of Technology.
- Signorile, P.** (2014). D'un dessin à l'autre... Présentation du travail architectural de Brunetto De Batté. In *HAL archives-ouvertes hal-01558730*.
- Silvestri, C.** (2009). *Perception et conception en architecture non-standard - Une approche expérimentale pour l'étude des processus de conception spatiale des formes complexes*. Université de Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc.
- Simon, H. A.** (1969). *Les sciences de l'artificiel*. Paris: Trad. Le Moigne J.-L. [The Sciences of the Artificial. Cambridge: MIT Press]. Gallimard (coll. : Folio/essais), éd. 2004.
- Smith, R.** (2007). Technical Notes From Experiences and Studies in Using Parametric and BIM Architectural Software. Retrieved from www.vbtllc.com/images/VBTTechnicalNotes.pdf%0A
- Stals, A., Jancart, S., & Elsen, C.** (2016). How Do Small and Medium Architectural Firms Deal with Architectural Complexity ? A Look Into Digital Practices. *Proceedings of the 34th ECAADe Annual Conference: Complexity and Simplicity*, 2, 159–168. Oulu.
- Stals, A., Jancart, S., & Elsen, C.** (2018). Influence of Parametric Tools on the Complexity of Architectural Design in Everyday Work of Sme's. *International Journal of Architectural Research: ArchNet-IJAR*, 12(3), 206. <https://doi.org/10.26687/archnet-ijar.v12i3.1665>
- Suwa, M., Gero, J., & Purcell, A. T.** (2000). Unexpected discoveries and S-inventions of design requirements: important vehicles for a design process. *Design Studies*, 21(6), 539–567.
- Suwa, M., Purcell, T., & Gero, J.** (1998). Macroscopic analysis of design processes based on a scheme for coding designers' cognitive actions. *Design Studies*, 19(4), 455–483. [https://doi.org/10.1016/S0142-694X\(98\)00016-7](https://doi.org/10.1016/S0142-694X(98)00016-7)
- Szalapaj, P.** (2000). *CAD Principles for Architectural Design: Analytical Approaches to Computational Representation of Architectural Form*. Oxford: Architectural Press.

- Terzidis, K.** (2003). Introduction. In *Expressive Form - A conceptual approach to computational design* (pp. 1–8). Spoon Press.
- Terzidis, K.** (2004). Algorithmic Design : A Paradigm Shift in Architecture ? *Architecture in the Network Society - 22nd ECAADe Conference Proceedings*, 201–207.
- Tribout, S., & Margier, A.** (2018). L'essor des outils numériques dans le champ de la conception urbaine : vecteur de recomposition des postures et pratiques (inter)professionnelles ? *01.DESIGN11*, 1–22.
- Van de Vreken, A.** (2008). Perception et représentation de l'espace architectural. In *Master, Université de Liège*. Liège.
- Van de Vreken, A., & Safin, S.** (2010). Influence du type de représentation visuelle sur l'évaluation de l'ambiance d'un espace architectural. *IHM10 : Conférence Francophone Sur l'interaction Homme-Machine*.
- Van Steenwinkel, I.** (2015). *Offering architects insights into living with dementia Three case studies on orientation in space-time-identity*. Retrieved from https://www.kuleuven.be/lucas/pub/publi_upload/2015_full_phd_IrisVanSteenwinkel.pdf
- Visser, W.** (2006). *The cognitive artifacts of designing*. London: Lawrence Erlbaum.
- Visser, W.** (2009). La conception: De la résolution de problèmes à la construction de représentations. *Le Travail Humain*, 72(1), 61–78.
- Wendland, D.** (2000). *Model-based formfinding processes: Free forms in structural and architectural design*. Retrieved from <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2001/761/>
- Weytjens, L., Verbeeck, G., & Verdonck, E.** (2009). Classification and Use of Design Tools: The Roles of Tools in the Architectural Design Process. *Design Principles and Practices: An International Journal*, 3(1), 289–302.
- Wolcott, H. F.** (2001). *Writing Up Qualitative Research* (2nd editio; SAGE, Ed.). Thousand Oaks, CA.
- Wolff, M., Burkhardt, J., & de la Garza, C.** (2005). Analyse exploratoire de “points de vue” : une contribution pour outiller les processus de conception. *Le Travail Humain*, 68(3), 253–286.
- Won, P. H.** (2001). The comparison between visual thinking using computer and conventional media in the concept generation stages of design. *Automation in Construction*, 10(3), 319–325.
- Woodbury, R.** (2010). *Elements of Parametric Design* (Routledge). New York.
- Woodbury, R., Aish, R., & Kilian, A.** (2007). Some Patterns for Parametric Modeling. *ACADIA*, 222–229.
- Wortmann, T., & Tuncer, B.** (2017). Differentiating parametric design : Digital workflows in contemporary architecture and construction Differentiating Parametric Design : Digital Workflows in Contemporary Architecture and Construction. *Design Studies*, 52, 173–197.
- Yu, R., Gero, J., & Gu, N.** (2015). Architects' Cognitive Behaviour in Parametric Design. *International Journal of Architectural Computing*, 13(1), 83–101.
- Zevi, B.** (1959). *Apprendre à voir l'architecture*. Paris: Les Éditions de Minuit.

Zhang, J., & Norman, D. A. (1994). Representation in Distributed Cognitive Tasks. *Cognitive Science*, 18, 87–122.

Zhang, T., Dong, J., Han, Q., & Ma, C. (2018). Application Digitalization Technology in Architectural Design. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.

ANNEXES

Les annexes sont disponibles sur la clef USB jointe au manuscrit.

