

De l'idéation en conception architecturale à l'instrumentation numérique de l'information bâtiment : Etude des conversations réflexives multi-instrumentées.

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Doctor of Philosophy (Phd) in Engineering Science

by

Gaëlle BAUDOUX



Supervisors: Eric LE COGUEC
Pierre LECLERCQ

**DOCTORAL COLLEGE IN ENGINEERING SCIENCE -
ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEOLOGY**

SEPTEMBER 2023

*From ideation in architectural design to digital
instrumentation of building information:
Study of multi-instrumented reflexive conversations.*

***S**imilar boxes can be found throughout the different manuscript chapters,
providing a summary of the chapter's key points and referencing of our
English publications covering the chapter's content.*

Ce document présente la recherche de thèse suivante :

***De l'idéation en conception architecturale à l'instrumentation
numérique de l'information bâtiment
Etude des conversations réflexives multi-instrumentées.***

Présentée en vue d'obtenir le grade de Docteur en Sciences de l'Ingénieur par :

Gaëlle BAUDOUX
Ingénieur civil architecte et Aspirante FNRS
Laboratoire ndrscr - LUCID Lab for User Cognition and Innovative Design
(8 septembre 2023)

Composition du jury pour la soutenance de la thèse :

Promoteurs	Eric LE COGUIEC – Professeur, laboratoire ndrscr – Faculté d'architecture, ULiège Pierre LECLERCQ – Professeur, laboratoire LUCID, Lab for User Cognition & Innovative Design – Faculté des Sciences Appliquées, ULiège
Président de jury	Pierre DUYSINX – Professeur - Faculté des Sciences Appliquées, ULiège
Membres du jury	Stéphane SAFIN – Maître de conférence, laboratoire Interact – Télécom Paris, Institut Polytechnique de Paris Damien CLAEYS – Professeur, laboratoire tsa-lab, Théorie des systèmes en architecture – Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme, UCLouvain Jean-Marie BURKHARDT – Directeur de recherche HDR, laboratoire LaPEA, Laboratoire de Psychologie et d'Ergonomie Appliquée – Université Gustave Eiffel, IFSTTAR & Université de Paris Jean-François BOUJUT – Professeur, laboratoire G-SCOP, Sciences pour la conception, l'optimisation et la production, – Université Grenoble Alpes

Cette recherche a été financée par :

Fonds de la Recherche Scientifique - FNRS
Rue d'Egmont 5
B-1000 Bruxelles - Belgique

Citation :

Baudoux, G. (2023). *Articulation des phases d'idéation en conception architecturale à l'instrumentation numérique de l'information bâtiment - Etude des conversations réflexives multi-instrumentées*. Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique, pp. XX

Résumé

Les modes de conception architecturale actuels nécessitent et favorisent les articulations entre leurs multiples acteurs, appelés à gérer une complexité croissante des projets de construction. Les technologies et processus intégrés du BIM (Building Information Modeling) sont avancés aujourd'hui comme la voie prometteuse pour multiplier les échanges entre acteurs et améliorer la performance des ouvrages bâtis. Si elle apporte incontestablement des bénéfices dans les phases de construction, cette approche numérique du partage d'informations ne se transpose pas aisément dans les phases d'idéation.

Notre question de recherche est : comment articuler ces phases d'idéation à la dynamique numérique contemporaine ?

Notre projet cherche à comprendre comment instrumenter numériquement les phases amont du processus de conception architecturale pour en collecter les informations utiles et nécessaires qui permettront d'articuler l'idéation à la dynamique BIM.

Pour y répondre, nous observons d'abord comment se génèrent, se récoltent et s'articulent les artefacts issus du travail d'idéation, puis étudions comment exploiter cette information pluridisciplinaire pour nourrir la maquette numérique qui est attendue par les phases aval de production ?

Notre recherche commence par une phase d'observation pour caractériser les contenus et l'évolution du niveau d'information au cours d'avant-projets d'architecture. Elle nous permet ainsi de distinguer les artefacts compatibles à la fois avec le degré de spécification ouvert d'un travail d'idéation et celui, plus précis, d'une phase de modélisation BIM. La deuxième phase de notre recherche consiste en des expérimentations, menées en laboratoire, pour évaluer des séquences d'interactions et de production d'artefacts (pré-)numériques dans une mise en situation de conception instrumentée pour la production automatique des documents architecturaux et la stimulation du raisonnement analogique.

Nous terminons cette thèse par une discussion sur l'impact des objets médiateurs et des conversations de conception homme-machine puis par questionner la modélisation des informations en conception architecturale.

Mots-clefs :

Conception médiatisée - Architecture - Activités Cognitives - Idéation et Raisonnement analogique - Instrumentation de la conception - Gestion des ressources et informations.

Abstract

The current modes of design show little articulation between their multiple actors, called to manage increasing complexity of building projects. BIM (Building Information Modeling) technologies and integrated process are seen today as the promising path to increase exchanges between actors and to improve the buildings performances. If it undoubtedly brings benefits in the implementation phases, this digital approach for information sharing is not really adapted to ideation phases.

Our research question is: how to articulate these ideation phases to contemporary digital dynamics? Our project seeks to understand how to digitally instrument the first phases of the architectural design process to collect the useful and necessary information that will facilitate the linking of the ideation phase to the BIM dynamic.

To answer this question, we first observe how the artefacts produced by the ideation work are generated, collected and articulated, and then study how this multi-disciplinary information can be used to feed the digital mock-up that is expected during the later production phases.

Our research begins with an observation phase to characterise content and evolution of information level during architectural preliminary projects. This enables us to distinguish the artefacts that are compatible with both the degree of open specification of an ideation phase and the more precise specification of a BIM modelling phase. The second phase of our research consists of laboratory experiments to evaluate sequences of interactions and the production of (pre-)digital artefacts in an instrumented design situation for the automatic production of architectural documents and the stimulation of analogical reasoning.

We conclude this thesis with a discussion on the impact of mediator objects and human-machine design conversations and then by questioning the modelling of information in architectural design.

Keywords :

Mediated design - Architecture - Cognitive activities - Ideation and analogical reasoning - Design instrumentation - Resource and information management.

Remerciements

Avant toute chose, ce travail de thèse n'aurait pu voir le jour sans le soutien financier du F.R.S.-F.N.R.S., que je tiens donc à remercier pour l'octroi et le renouvellement de cette bourse d'Aspirant. Il n'aurait pas non plus été possible sans la mise à disposition de cet exceptionnel environnement du Usability Lab du Lucid et tout l'historique de leurs travaux sur l'instrumentation de la conception architecturale.

Merci à Eric Le Coguiec et Pierre Leclercq, mes promoteurs, ainsi que Stéphane Safin, constituant ensemble le comité de suivi de thèse, pour leur accompagnement dans la construction de cette recherche, chacun avec leurs bagages d'expérience et leurs cadres théoriques propres, hautement complémentaires. Plus spécifiquement, merci à Eric pour m'avoir amenée à me questionner théoriquement et méthodologiquement sur la recherche menée ; merci à Pierre pour sa confiance inébranlable ; et merci à Stéphane pour avoir opérationnalisé cette envie de plonger dans l'ergonomie cognitive et les sciences comportementales.

Merci à Jean-Marie Burkhardt, Jean-François Boujut et Damien Claeys de me faire l'honneur de constituer le jury de cette thèse ; ainsi qu'à Pierre Duysinx de présider ce jury.

Je remercie Samia Ben Rajeb, Damien Claeys et Aurélie De Boissieu pour nos échanges fructueux sur la conception architecturale instrumentée et pour la prise de recul qu'ils ont permis.

Un grand merci à l'équipe du Lucid pour tous les bons moments passés ensemble. Un merci particulier à Aurelie Jeunejean pour son soutien logistique et à Xaviéra Calixte pour son soutien émotionnel et ses conseils avisés, toujours pleins d'empathie.

Une pensée pour les chercheurs et doctorants de Faculté d'Architecture avec qui j'ai partagé un bout de ce parcours de thèse, en particulier pour Thomas Dissaux : merci pour toutes ces conférences et séminaires passés ensemble.

Merci à l'équipe de Télécom Paris pour leur accueil chaleureux.

Un énorme merci aux étudiants, architectes professionnels et étudiants-jobistes ayant joué le jeu de mes nombreuses expériences.

Merci à Pierre Leclercq, Catherine Elsen, Samia Ben Rajeb et Stéphane Safin pour m'avoir épaulée dans la préparation de la suite de ma recherche, vers le post-doctorat.

Je souhaite également remercier mes amis pour leur incroyable faculté à remettre en perspective mes moments de panique et de surcharge et pour leur don de me changer complètement les idées.

Finalement, merci à Laura pour sa relecture et à Maman pour ses commentaires, toujours pertinents, sur ce sujet de recherche, et de manière plus large pour son soutien inconditionnel.

Table des matières

INTRODUCTION	13
1.1 ENJEUX DE LA THÈSE	14
1.2 QUESTIONNEMENT DE L'INNOVATION	15
1.3 PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE	16
1.4 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE	17
1.5 PLAN DU MANUSCRIT	17
ÉTAT DE L'ART	20
2.1 INTERDISCIPLINARITÉ DE LA RECHERCHE	21
2.2 LA CONCEPTION ARCHITECTURALE	21
2.2.1 Spécificités de la conception architecturale	21
2.2.2 Quelques modèles de conception	22
2.2.2.1 <i>Une résolution de problème dans un espace-solution</i>	24
2.2.2.2 <i>Une conversation réflexive située</i>	24
2.2.2.3 <i>Une transformation de représentations</i>	25
2.2.2.4 <i>Un affinement progressif de l'objet</i>	26
2.2.2.5 <i>Une activité située</i>	26
2.2.2.6 <i>Positionnement par rapport aux modèles de conception existants</i>	27
2.2.3 L'activité collective	28
2.3 PROCESSUS DE CONCEPTION	30
2.4 L'IDÉATION	33
2.4.1 Définition de l'idéation	33
2.4.2 Facteurs favorisant ou limitant l'idéation	33
2.4.3 L'analogie	35
2.5 LA DYNAMIQUE BIM	37
2.5.1 Définition du BIM	37
2.5.2 Concepts propres au BIM	38
2.5.3 Avantages des technologies BIM	41
2.5.4 Limites des technologies BIM	42
2.5.5 Pistes d'amélioration du BIM	44
2.5.5.1 <i>Etudes existantes visant l'amélioration du BIM</i>	44
2.5.5.2 <i>Problématique générale de notre recherche</i>	45

CADRE CONCEPTUEL	48
3.1 CLEFS D'ANALYSE DE L'ACTIVITÉ DE CONCEPTION	49
3.1.1 L'activité médiatisée	49
3.1.1.1 <i>Théorie de l'Activité et de l'instrumentation</i>	49
3.1.1.2 <i>Sociologie des objets</i>	51
3.1.1.3 <i>Développement de la nouvelle notion du Moyen de conception</i>	53
3.1.1.4 <i>Développement d'une classification de ces Moyens de conception</i>	55
3.1.2 Les représentations externes	57
3.1.2.1 <i>Représentations internes et externes</i>	57
3.1.2.2 <i>Rôle cognitif des représentations</i>	57
3.1.2.3 <i>Rôle de la trace graphique</i>	58
3.1.2.4 <i>Caractérisation des représentations</i>	58
3.1.2.5 <i>Proposition d'une classifications des représentations</i>	59
3.1.2.6 <i>La mise au net</i>	60
3.2 ASSISTANCES À LA CONCEPTION	63
3.2.1 Stratégies d'assistance	63
3.2.1.1 <i>Assister la structuration du problème.</i>	64
3.2.1.2 <i>Assister la génération des solutions</i>	64
3.2.1.3 <i>Assister l'évaluation des solutions</i>	65
3.2.1.4 <i>Assister le suivi du processus de décision</i>	65
3.2.1.5 <i>Points d'entrée d'assistance de cette thèse</i>	66
3.2.2 Outils d'aide à la conception	66
3.2.2.1 <i>Les outils de Dessin Assisté par Ordinateur</i>	66
3.2.2.2 <i>Autres outils existants</i>	68
3.2.2.3 <i>Avantages et limites du dessin par ordinateur ou à main levée</i>	70
3.2.2.4 <i>Cas particulier de la reconnaissance d'esquisse</i>	72
3.2.2.5 <i>Faisabilité technique de la reconnaissance d'esquisses à main levée</i>	74
3.3 PERSPECTIVES RETENUES POUR LA RECONNAISSANCE D'ESQUISSE	75
PROBLÉMATIQUE	77
4.1 PROBLÉMATIQUE DE NOTRE RECHERCHE	78
4.1.1 Questions de recherche	78
4.1.2 Circonscription de la recherche	79
4.1.3 Plan d'expériences	80
4.1.4 Objectif de la thèse	81
MÉTHODOLOGIE	83
5.1 MÉTHODE GÉNÉRALE DE RECHERCHE	84

5.1.1	Choix de notre posture générale de recherche	84
5.1.2	Schéma méthodologique de notre recherche	85
5.1.3	Méthode de récolte des données	88
5.1.4	Méthode d'analyse des données	90
TRANSITION ENTRE IDÉATION ET BIM		92
6.1	TRANSITION ACTUELLE ENTRE IDÉATION ET BIM	93
6.1.1	Observation d'un processus intégré articulant idéation et BIM	93
6.1.1.1	<i>Choix du processus observé</i>	93
6.1.1.2	<i>Articulation des différentes étapes du processus</i>	94
6.1.1.3	<i>Corpus de données étudiées</i>	95
6.1.1.4	<i>Analyse des livrables de l'Atelier de master</i>	95
6.1.1.5	<i>Observations des pratiques dans le Studio Digital Collaboratif BIM</i>	100
6.1.2	Caractérisation de la transition actuelle	101
6.1.2.1	<i>Processus de conception</i>	102
6.1.2.2	<i>Transition</i>	103
6.1.2.3	<i>Démarche BIM</i>	103
6.2	PROPOSITION DE TRANSITION ALTERNATIVE	104
6.2.1	Originalité de la méthode proposée	104
6.2.2	Principe proposé pour une transition alternative	108
6.2.2.1	<i>Captation des informations issues de la conception</i>	108
6.2.2.2	<i>Nouvelle transition vers le BIM</i>	109
6.2.2.3	<i>Mise en pratique du principe de transition proposé</i>	110
6.2.3	Bénéfices du principe proposée	116
6.2.4	Perspectives pour la suite de cette thèse	117
L'INFORMATION EN CONCEPTION		120
7.1	CADRE D'ÉTUDE DE L'ÉVOLUTION DE L'INFORMATION	121
7.1.1	Définition du sujet d'étude : l'information	121
7.1.2	Processus de conception intégrée : l'Atelier IV	122
7.1.3	Typologies de conception : longue et épisodique	123
7.2	CARACTÉRISATION DE L'ÉVOLUTION DES INFORMATIONS EN CONCEPTION	
	LONGUE	124
7.2.1	Protocole d'observation de la conception longue	125
7.2.1.1	<i>Méthode de récolte des données implémentée dans le processus de conception intégrée</i>	125
7.2.1.2	<i>Caractérisation au travers de la typologie d'information</i>	127
7.2.1.3	<i>Caractérisation au travers des Moyens de conception utilisés</i>	127

7.2.1.4	<i>Caractérisation au travers des représentations externes utilisées</i>	128
7.2.1.5	<i>Caractérisation au travers du niveau d'abstraction</i>	129
7.2.1.6	<i>Caractérisation au travers des transformations de l'objet architectural</i>	129
7.2.2	Classification des typologies d'information	130
7.2.3	Modélisation du processus de conception intégrée	132
7.2.4	Résultats de l'observation de l'évolution en conception longue	134
7.2.4.1	<i>Variation des niveaux d'abstraction</i>	134
7.2.4.2	<i>Usage des médias</i>	136
7.2.5	Discussion de l'évolution des informations en conception longue	139
7.2.5.1	<i>Détournement des médias</i>	139
7.2.5.2	<i>Choix intentionnel des médias</i>	140
7.2.5.3	<i>Limites de l'étude en conception longue</i>	140
7.2.6	Conclusions pour l'instrumentation de la transition	141
7.3	CARACTÉRISATION DE L'ÉVOLUTION DES INFORMATIONS EN CONCEPTION ÉPISODIQUE	143
7.3.1	Protocole d'observation de la conception épisodique	143
7.3.1.1	<i>Espace expérimental</i>	143
7.3.1.2	<i>Méthode de récolte des données implémentée lors des épisodes de conception</i>	144
7.3.1.3	<i>Critères de caractérisation de l'information</i>	145
7.3.2	Modélisation des moments de conception épisodique	147
7.3.3	Résultats de l'observation de l'évolution en conception épisodique	147
7.3.3.1	<i>Activités typiques de conception</i>	147
7.3.3.2	<i>Associations récurrentes d'informations</i>	150
7.3.3.3	<i>Importance des traces graphiques</i>	152
7.3.3.4	<i>Limites de l'étude en conception épisodique</i>	153
7.3.4	Conclusions pour l'instrumentation de la transition	153
	<u>ASSISTANCE PAR CONVERSATION RÉFLEXIVE MULTI-INSTRUMENTÉE</u>	155
8.1	CADRE EXPÉRIMENTAL POUR L'INSTRUMENTATION DE LA CONCEPTION	156
8.1.1	Promesses du système d'aide à la conception	156
8.1.1.1	<i>Collecter les informations</i>	156
8.1.1.2	<i>Automatiser la production</i>	156
8.1.1.3	<i>Stimuler l'idéation</i>	157
8.1.1.4	<i>Structure générale de l'Interpréteur</i>	157
8.1.2	Développement de l'Interpréteur	157
8.1.2.1	<i>Méthode générale d'un Magicien d'Oz</i>	158
8.1.2.2	<i>Faisabilité technique</i>	159

8.1.3	But de l'expérience du Magicien d'Oz	159
8.1.4	Protocole expérimental du Magicien d'Oz	160
8.1.4.1	<i>Contexte expérimental</i>	160
8.1.4.2	<i>Principe général de l'expérience</i>	161
8.1.4.3	<i>Espace expérimental</i>	162
8.1.4.4	<i>Déroulé temporel</i>	165
8.1.4.5	<i>Données récoltées</i>	167
8.1.4.6	<i>Faisabilité du protocole</i>	168
8.1.5	Pistes d'analyses possibles	169
8.2	ACTIVITÉ DE CONCEPTION RÉFLEXIVE INSTRUMENTÉE	171
8.2.1	Méthodologie d'analyse	171
8.2.1.1	<i>Activité globale de conception</i>	171
8.2.1.2	<i>Codage des comportements</i>	172
8.2.1.3	<i>Patterns de réception des images</i>	173
8.2.2	Analyse de l'activité de conversation	175
8.2.2.1	<i>Comportements de réception des visuels</i>	175
8.2.2.2	<i>Patterns de conversation</i>	176
8.2.2.3	<i>Activités déclenchantes</i>	180
8.2.2.4	<i>Temporalité de mobilisation des patterns</i>	181
8.2.2.5	<i>Profils des sujets</i>	183
8.2.3	Discussion des interactions de conception avec l'Interpréteur	184
8.2.3.1	<i>Notes sur l'expérience</i>	184
8.2.3.2	<i>Modes d'interaction</i>	185
8.2.3.3	<i>Pertinence pour la conception</i>	185
8.3	MICRO-EXPÉRIENCE DE STIMULATION DE L'ACTIVITÉ DE RAISONNEMENT ANALOGIQUE	189
8.3.1	Méthode d'évaluation de l'impact des stimuli	189
8.3.1.1	<i>Cadre expérimental de la comparaison</i>	189
8.3.1.2	<i>Protocole de stimuli</i>	190
8.3.1.3	<i>Recueil des données sur l'analogie stimulée</i>	191
8.3.2	Résultats comparatifs de l'impact des stimuli	194
8.3.2.1	<i>Description de l'analogie non stimulée</i>	195
8.3.2.2	<i>Description de l'analogie stimulée</i>	196
8.3.2.3	<i>Discussion comparative des activités d'analogie</i>	198
8.4	COMPRÉHENSION DES ESQUISSES ARCHITECTURALES	201
8.4.1	Retours sur l'activité d'interprétation des lutins modélisateurs humains	201

8.4.1.1 <i>Entretiens d'auto-confrontation avec les lutins modélisateurs</i>	201
8.4.1.2 <i>Identification des paramètres permettant la reconnaissance des esquisses</i>	202
8.4.1.3 <i>Choix de modélisation</i>	205
8.4.2 Perspectives pour l'interprétation d'esquisses architecturales	206
DISCUSSION	210
9.1 RAPPEL DE LA QUESTION DE RECHERCHE	211
9.2 RÉPONSE AUX SOUS-QUESTIONS DE RECHERCHE	211
9.2.1 Quelles sont les limites de la transition actuelle ?	211
9.2.2 Par quelle proposition d'instrumentation fluidifier la transition ?	212
9.2.3 Comment évoluent les informations au travers du processus de conception ?	212
9.2.4 Certains artefacts sont-ils plus appropriés pour véhiculer les informations ?	213
9.2.5 Comment collecter l'information ?	214
9.2.6 Comment formaliser ces informations en un modèle manipulable qui nourrisse l'activité du concepteur ?	215
9.2.7 Conclusion	216
9.3 DISCUSSION GÉNÉRALE	217
9.4 DISCUSSION ÉCLECTIQUE	219
9.4.1 Le moyen de conception	219
9.4.2 La transition conception idéative - production numérique	221
9.4.3 La compatibilité collective de l'instrumentation	221
9.4.4 La plus-value d'un modèle BIM sémantique	222
CONCLUSION	225
10.1 SYNTHÈSE	226
10.2 CONTRIBUTIONS	229
10.3 LIMITES	232
10.4 PERSPECTIVES	233

Chapitre 1

Introduction

Ce premier chapitre vise à présenter les enjeux de la recherche et la problématique que nous adressons. Nous y précisons également la structure que suivra ce manuscrit.

***T**his first chapter aims at presenting the issues of the research and the problems that we address. We also specify the structure that this manuscript will follow.*

« Almost a generation ago, the early software for computer aided design and manufacturing (CAD/CAM) spawned a style of smooth and curving lines and surfaces that gave visible form to the first digital age, and left an indelible mark on contemporary architecture. But today's digitally intelligent architecture no longer looks that way. In The Second Digital Turn, (... (the design professions are now coming to terms with a new kind of digital tools they have adopted - no longer tools for making but tools for thinking. In the early 1990s the design professions were the first to intuit and interpret the new technical logic of the digital age: digital mass-customization (the use of digital tools to mass-produce variations at no extra cost) has already changed the way we produce and consume almost everything, and the same technology applied to commerce at large is now heralding a new society without scale - a flat marginal cost society where bigger markets will not make anything cheaper. But today, the unprecedented power of computation also favors a new kind of science where prediction can be based on sheer information retrieval, and form finding by simulation and optimization can replace deduction from mathematical formulas. Designers have been toying with machine thinking and machine learning for some time, and the apparently unfathomable complexity of the physical shapes they are now creating already expresses a new form of artificial intelligence, outside the tradition of modern science and alien to the organic logic of our mind. » — (Carpo, 2017, deuxième de couverture).

1.1 Enjeux de la thèse

Les modes de conception architecturale actuels se caractérisent par un trop faible niveau d'articulation entre ses multiples acteurs : maître d'ouvrage, administrations communales, architectes, ingénieurs, paysagistes, constructeurs et sous-traitants sont pourtant appelés à gérer une complexité sans cesse croissante des projets de construction et de rénovation (Naville & Ben Rajeb, 2016). Avec la conscientisation de l'évolution climatique actuelle, l'art de bâtir fait face à une demande pressante de performances en termes de durabilité environnementale. Il pèse en effet un grand poids, 20 à 40% selon les critères et les méthodes de calcul employées, dans l'impact écologique total des activités humaines (Deshayes, 2012; Norouzi *et al.*, 2021). En outre, au sein de ce secteur, les phases de conception préliminaire définissent déjà une grande partie des caractéristiques finales du bâtiment, déterminant 70% des impacts totaux d'un projet (Ehrlenspiel, 1995; Tichkiewitch, 2010), économiques comme écologiques. De mauvais choix de conception peuvent ainsi porter de lourdes conséquences sur la qualité environnementale et la performance finale du bâtiment.

Pour répondre à cette demande de performance, une transformation des processus de conception s'opère aujourd'hui. Il s'agit de passer de la traditionnelle conception dite "par lots", dans laquelle chaque acteur exerce ses actions dans un périmètre de compétences peu recouvrantes, à la conception dite intégrée, dans laquelle tous les acteurs sont impliqués et articulés dès le lancement du projet (Naville & Ben Rajeb, 2016).

Soutenue par des discours éco-pragmatiques, la mise en oeuvre de technologies et processus intégrés est annoncée depuis plus d'une décennie comme la voie prometteuse pour articuler les

échanges entre les acteurs et améliorer la performance des ouvrages (NSCSC, 2010; Naville & Ben Rajeb, 2016). Appelée BIM pour Building Information Modeling, cette approche numérique du partage d'information, permet de modéliser les descriptions formelles et fonctionnelles d'un bâtiment (maquettes 3D) mais aussi ses contraintes et ses performances (4D et au-delà : coût, résistance structurelle, éclairage, acoustique, etc ...). Elle prétend porter le processus de gestion et de coordination des données dans une démarche de collaboration entre les différents acteurs sur toute la durée de vie d'un projet de construction (Celnik & Lebegue, 2014). Ainsi équipé, le secteur du bâtiment est sensé entrer dans l'ère de la Construction 4.0. Le changement qui s'opère aujourd'hui est induit par des injonctions législatives, qui recommandent l'utilisation de ces nouvelles technologies (Boton, Forgues & Halin, 2017).

Cette évolution des pratiques apporte incontestablement des bénéfices dans les phases de réalisation du projet : construire le bâtiment en mode virtuel peut permettre en effet de lever une quantité de points d'articulations nécessaires entre les "lots" et de les résoudre à moindre coût, en comparaison à celui de leur résolution lorsqu'ils se révèlent sur chantier. Néanmoins, la mise en oeuvre des technologies numériques d'information bâtiment n'a pas encore prouvé son efficacité dans les phases plus en amont du processus. De plus, le retour sur investissement est questionné par toutes les agences d'architecture : la mise en oeuvre BIM implique en effet la reconsidération des pratiques du projet.

L'accélération technologique BIM remonte aujourd'hui très en amont des processus de conception. Elle impacte la phase d'idéation, moment d'émergence du processus créatif, de déploiement et d'échange d'idées nouvelles. De plus en plus de concours d'architecture, en particulier ceux des marchés publics¹, attendent paradoxalement parmi les livrables, la maquette numérique dotée, soi-disant, de toute l'information descriptive et formatée du projet. Celle-ci est cependant trop restrictive et trop rigide pour permettre au projet d'évoluer encore dans un sens créatif. De ce fait, la maquette BIM s'inscrit en inadéquation avec l'activité de conception préliminaire.

Par ailleurs, face à ces enjeux, le secteur manque d'outils pour assister et améliorer cette conception préliminaire, et plus spécifiquement, d'outils d'aide à la génération et à l'évaluation de solutions (Safin, 2011).

La problématique ainsi exposée devient notre objectif et s'énonce comme suit : comment articuler les phases d'idéation à la dynamique numérique contemporaine ? Pour répondre à cet enjeu, notre formation d'ingénieur architecte nous permet de mener une recherche à l'interface entre sciences techniques et sciences humaines.

1.2 Questionnement de l'innovation

Comme l'énonce Cadix, ingénieur et directeur de l'ENS de Création Industrielle, « dans les champs de l'entrepreneuriat et de l'innovation, après un XXe siècle – surtout à l'apogée de la société de consommation (années 60 à 80) – qui fut le temps des aboutissements insignifiants, des empilements insensés, des flux irraisonnés, des langages saturés, pourrait émerger une ère nouvelle où l'inessentiel et l'éphémère seraient emportés par le reflux de l'irresponsabilité. (...) Cela conduit à repenser le processus d'innovation, à reconsidérer son pilotage et probablement même à questionner son essence. » (Cadix, 2009, pp. 101-103)

¹ En Belgique notamment mais également dans d'autres pays européens.

En effet, le monde qui nous entoure actuellement est fait de quantité d'organisations publiques et privées, de conseils décisionnels et de recommandations émanant d'autorités pour tenter de solutionner les enjeux sociétaux et écologiques. En témoignent, comme nous venons de le voir, les guides BIM promettant aux PME une solution toute faite. D'ailleurs, pour Patrascu et Hémont (2019, p. 71), « le *Building Information Modeling* est posé tel un étendard du progrès de la construction et de la gestion des bâtiments » et sa dimension collaborative est plutôt une idéologie vendeuse qu'une réalité. Nous reviendrons sur ce point au chapitre 2.

Mais si les réponses aux enjeux sociétaux et écologiques étaient à l'avenir issus des contributions de chaque individu ? Alors, ils deviendraient les acteurs et réseaux d'acteurs de ces transformations.

Peut-être nous faudrait-il à partir de maintenant imaginer des solutions non-figées et non-figeantes face aux enjeux qui nous animent, favoriser comme la propose Cadix (2009) une co-conception des solutions, avec les acteurs directs, au travers d'objets inachevés ou (re)programmables laissant toute la marge de manoeuvre à l'acteur.

Dans cette optique, le défi pour les domaines de la gestion d'information, de l'aide à la décision ou faisant appel à des objets numériques, dans lesquels s'inscrit notamment le BIM, est de concilier complexité d'outillage et simplicité d'usage. Notre désir est d'atteindre une technologie humaine, compréhensible et peut-être même compréhensive, dont la manipulation n'est plus une tâche en soi, qui deviendrait un outil « invisible » au sens de Rabardel (1995) et Defays (*et al.*, 2012). D'après Cadix, cela « peut être obtenu de plusieurs manières. D'abord par l'illusion de sa disparition à travers des interfaces utilisateurs particulièrement faciles d'usage. Cela ne se réduit pas à une ergonomie astucieuse, qui intervient tardivement dans le processus de conception ; cela suppose la prise en compte de l'exigence de simplicité d'usage dès la conception des architectures de systèmes complexes, dès leur design initial. Ensuite par le déport de la technologie hors du champ de perception et/ou d'intervention de l'utilisateur. » (Ibidem, p. 108)

D'ailleurs, alors que l'innovation est souvent structurée autour de la nouveauté, il est également possible d'innover « par le moins », « par retrait » comme le discutent Goulet et Vinck (2012, 2022).

Le concepteur est au coeur de cette évolution du processus d'innovation. De par sa pratique, il est amené à observer les hommes dans leurs usages, leur quotidien, leur vécu ainsi que leurs usages des objets et services proposés. Toujours dans la philosophie de Cadix, il fait cela dans le but de transformer les conditions de vie de ces hommes pour qu'elles soient plus agréables.

Ainsi, recherche et conception (ou design) ont de nombreuses attitudes en commun, leurs démarches sont souvent similaires. C'est avec cette double casquette que nous aborderons la problématique qui est au coeur de cette thèse.

1.3 Problématique générale

L'objectif de notre thèse est d'articuler les phases d'idéation à la dynamique numérique contemporaine. En effet, pour nourrir la transition numérique, de nombreuses études internationales ont été menées sur l'interopérabilité des objets du BIM ou encore sur la mise en oeuvre technique du processus BIM, comme nous le verrons plus loin. Mais ces méthodes, si elles permettent de guider et standardiser l'utilisation des technologies BIM entre les différents acteurs de la construction

(Naville & Ben Rajeb, 2016), n'abordent pas la problématique du changement des pratiques internes au sein des phases en amont du processus de conception.

Or le BIM ne se prête pas à l'idéation. Les usages d'avant-projet restent donc inchangés : les équipes de conception arrêtent juste leur réflexion "un peu plus tôt", avant de faire basculer leurs artefacts d'avant-projet dans une version numérique de production. Ce basculement constitue un passage, de la conception imaginative à la conception productive. Il est immanquablement marqué par une perte substantielle d'information. Le comment et le pourquoi des concepts mis en oeuvre disparaissent dans cette étape de transition, devenue uniquement descriptive et qui ne retient comme objet intermédiaire que le nouvel artefact numérique.

Notre question de recherche s'énonce donc : comment générer, suivre, récolter et articuler l'information du travail d'idéation ? Comment ensuite faire fructifier celle-ci, dans toute sa richesse pluridisciplinaire d'avant-projet, pour nourrir utilement la maquette numérique BIM qui attend les niveaux d'information détaillée et exhaustive des phases avalées de production ?

Notre projet vise l'étude de l'implémentation technologique des artefacts de conception au sein des processus. Concrètement, nous cherchons à comprendre comment instrumenter numériquement les phases amonts du processus de conception architecturale pour en collecter les informations utiles et nécessaires (traduites dans les croquis, plans, maquettes, annotations et autres spécifications graphiques ou textuelles) qui permettront d'articuler l'idéation à la dynamique BIM. Cette démarche se distingue du stade applicatif brut du BIM, en se positionnant en amont de l'actuelle transition au modèle numérique.

1.4 Méthodologie générale

Adoptant une posture entre recherche interprétative et empirique, nous nous ancrons dans le paradigme constructiviste et nous combinons démarches abductives et hypothético-déductives en empruntant nos méthodes de recherche aux sciences cognitives, à la psychologie ergonomique ainsi qu'à la recherche qualitative par théorisation ancrée.

A ce titre, nos récoltes de données s'effectuent en grande partie au moyen d'observations non-participantes de cas d'étude. Nous complétons cette méthode de récolte de données pour certaines expériences spécifiques par des entretiens semi-dirigés, du *think aloud* et des auto-confrontations afin d'avoir accès aux pensées et logiques de décision des sujets observés.

Nos analyses combineront les statistiques descriptives avec des descriptions qualitatives, notamment par théorisation ancrée, des phénomènes observés. Nous exploiterons également la synthèse visuelle et la modélisation pour analyser nos données.

La méthodologie de notre recherche sera détaillée par la suite.

1.5 Plan du manuscrit

Le plan de la thèse suit la structure suivante :

1. Le premier chapitre a servi à introduire la recherche menée.
2. Le second chapitre permet le positionnement théorique de la recherche. Nous y explicitons notre démarche interdisciplinaire, détaillons l'ancrage théorique de notre vision de la conception, décrivons le phasage du processus de conception auquel nous nous référerons pour étudier les phases d'idéation et de BIM. Nous terminons par détailler ces deux phases de conception afin

d'aborder respectivement les méthodes de génération des idées et plus spécifiquement l'analogie, ainsi que les différents concepts et challenges du BIM.

3. Dans le deuxième volet de ce positionnement théorique, nous construisons les différentes clefs d'analyse de la conception qui seront mobilisées pour étudier les objets médiateurs et représentations externes. Nous y aborderons les différentes stratégies d'assistance existantes et les outils numériques développés pour aider la conception afin de déterminer les solutions d'instrumentation qui nous semblent prometteuses.

4. Les quatrième et cinquième chapitres établissent la problématique de la thèse et détaille nos questions de recherche ainsi que le plan d'expérimentation pour y répondre. Nous y explicitons également notre posture de chercheur et nos choix méthodologiques.

5. Le sixième chapitre ouvre la phase d'étude. Nous y analysons les modalités de transition actuelle afin de proposer une méthode alternative.

6. Suite à cette proposition, le second chapitre d'étude vise à analyser les informations issues de l'idéation. Nous y étudions comment évoluent et sont véhiculées ces informations et où elles figurent dans les documents de conception.

7. Dans notre dernier chapitre d'étude, en partant de l'hypothèse que l'instrumentation proposée est développée, nous évaluons comment renvoyer les informations collectées au concepteur pour nourrir ses activités de conception et la continuité vers la dynamique BIM.

8. Ce neuvième chapitre discute l'ensemble de la recherche et répond aux différentes questions concernant notre problématique.

9. Finalement, le chapitre de conclusion résume l'ensemble des contributions de cette recherche, pointe ses limites et ouvre les perspectives d'études futures.

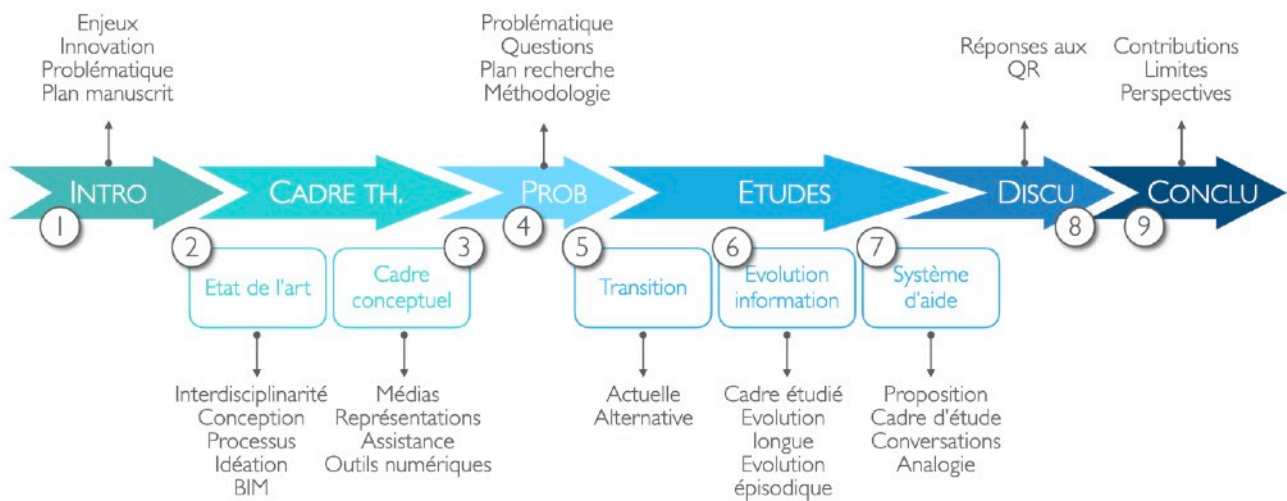


Figure 1. Plan du manuscrit de thèse.

Au début et à la fin de chaque chapitre le lecteur trouvera des synthèses en français et en anglais résumant respectivement les objectifs du chapitre et les contributions principales et éléments à retenir pour la suite de la lecture du manuscrit.

Les modes de conception architecturale actuels présentent peu d'articulation entre leurs multiples acteurs, appelés pourtant à gérer une complexité croissante des projets de construction. Les technologies et processus intégrés du BIM (Building Information Modeling) sont avancés aujourd'hui comme la voie prometteuse pour multiplier les échanges entre acteurs et améliorer la performance des ouvrages bâtis. Si elle apporte incontestablement des bénéfices dans les phases de construction, cette approche numérique du partage d'informations ne se transpose pas aisément dans les phases d'idéation. Notre projet cherche à comprendre comment instrumenter numériquement les phases amont du processus de conception architecturale pour en collecter les informations utiles et nécessaires qui permettront d'articuler l'idéation à la dynamique BIM.

Pour y répondre, ce manuscrit s'organise comme suit :

- Chap. 2 - Etat de l'art de la conception et des phases d'idéation et de BIM
- Chap. 3 - Cadre conceptuel des activités médiatisées et de l'assistance
- Chap. 4 - Problématique
- Chap. 5 - Posture méthodologique
- Chap. 6 - Transition idéation-BIM actuelle et proposition d'alternative
- Chap. 7 - Evolution de l'information et médias la soutenant
- Chap. 8 - Système d'aide à la conception et évaluation de son impact
- Chap. 9 - Discussion générale

***T**he current modes of design show little articulation between their multiple actors, called to manage increasing complexity of building projects. BIM technologies and integrated process are seen today as the promising path to increase exchanges between actors and to improve the buildings performances. If it undoubtedly brings benefits in the implementation phases, this digital approach for information sharing is not really adapted to ideation phases. Our project seeks to understand how to digitally instrument the first phases of design process to collect useful and necessary information that will help to articulate the ideation to BIM dynamics.*

To answer this question, this manuscript will follow this path:

- *Chap. 2 - State-of-the-art of the design and ideation and BIM phases*
- *Chap. 3 - Conceptual framework of mediated activities and assistance*
- *Chap. 4 - Research issue*
- *Chap. 5 - Methodological posture*
- *Chap. 6 - Current ideation-BIM transition and alternative proposal*
- *Chap. 7 - Information evolution and media supporting it*
- *Chap. 8 - Design assistance system and evaluation of its impact*
- *Chap. 9 - General discussion*

Chapitre 2

Etat de l'art

Dans ce chapitre théorique, nous explicitons notre posture interdisciplinaire. Nous abordons en outre les différents aspects relatifs à la conception architecturale en général et propres à notre sujet de recherche, de manière à cadrer notre travail et à circonscrire la problématique à aborder.

Pour ce faire, nous commençons par convoquer les théories de la conception et de l'analyse des processus. Nous plongerons ensuite dans les concepts des phases d'idéation ainsi que dans les composants de l'instrumentation BIM.

***I**n this theoretical chapter, we explain our interdisciplinary approach. We also address the various aspects relating to architectural design in general as well as those specific to our research subject, in order to frame our work and circumscribe the problematics.*

To do this, we begin by referring to the design theories and process analysis. We will then dive into the concepts of ideation phases and into the components of BIM instrumentation.

2.1 Interdisciplinarité de la recherche

Notre recherche est résolument interdisciplinaire. Elle mobilise des théories et des concepts issus de plusieurs domaines comme les Sciences humaines et sociales, les Sciences de la conception, les Sciences cognitives mais aussi l'Ingénierie de conception et l'Interaction homme-machine (figure 2). Parmi tous ces champs, notre posture s'annonce comme une combinaison des disciplines de l'ergonomie et de la psychologie : elle se centre sur les sciences cognitives et les sciences de la conception. Dans cette logique, nous ne traitons pas les considérations technophiles, politiques ou sociales qui accompagnent irrémédiablement cette thématique de la conception architecturale et de la transition numérique BIM.

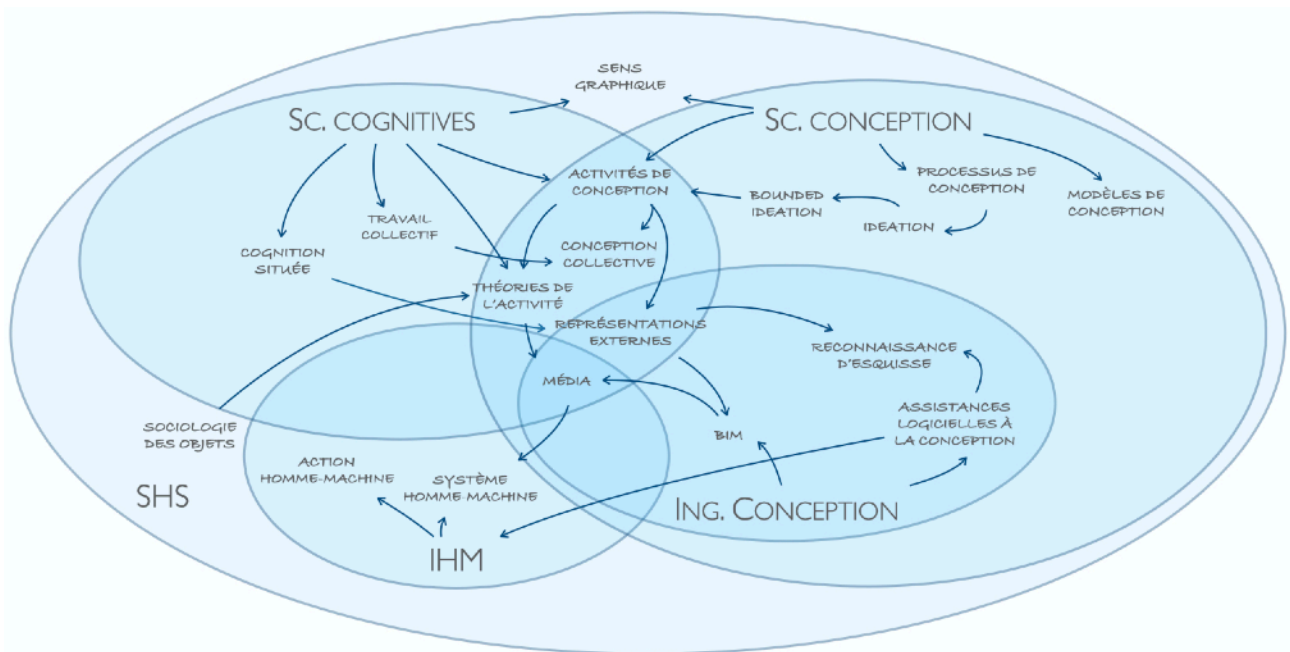


Figure 2. Articulation des théories et concepts structurants de notre recherche.

Par ailleurs, le lecteur comprendra à travers les différentes sections de ce chapitre et du suivant que les théories et visions de la conception ne cessent de s'opposer et de se rejoindre, témoignant de la complexité de la cognition humaine face à ces activités complexes de conception architecturale.

2.2 La conception architecturale

2.2.1 Spécificités de la conception architecturale

Commençons par prendre le temps de ré-établir brièvement la définition de la conception et les spécificités de la conception dans le domaine de l'architecture.

La conception est, de manière générale, la spécification d'un artefact, étymologiquement un produit de l'art, apporté en réponse à un objectif donné. Visser (2009, p. 71) précise que « la conception consiste à spécifier un artefact (l'artefact produit), à partir de spécifications de départ qui indiquent - en général de façon ni explicite ni exhaustive - 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) ». Et l'artefact est défini par Rabardel (1997, cité dans Elsen, 2011) comme le « produit de l'activité humaine intentionnellement constitué comme objet matériel et [/ ou] symbolique ».

La conception en architecture se différencie des autres domaines de conception comme en mécanique, en design, ou en informatique, par deux spécificités principales, bien connues de la littérature : d'une part le nombre important de variables interdépendantes (Darses & Falzon, 1996) et d'autre part la complexité et la mauvaise définition du problème auquel l'artefact doit répondre (Borillo & Goulette, 2002). En effet, selon ces auteurs, lorsqu'un architecte reçoit le programme d'un projet de bâtiment, ce dernier reflète souvent de manière ambiguë et incomplète les besoins du commanditaire et ceux des usagers du bâtiment futur. En outre, les différentes contraintes esthétiques, structurelles, réglementaires, de mise en oeuvre, d'usages, de répartition des fonctions, d'évolution dans le temps, etc., s'impactent mutuellement la plupart du temps rendant toute proposition optimale selon chaque critère, impossible et rendant chaque changement lourd de conséquences en cascade.

En conséquence, de nombreux auteurs (Darses & Falzon, 1996 ; Chupin, 1998 ; Darses, Détienne & Visser, 2001 ; Borillo & Goulette, 2002 ; Safin, 2011 ; Le Coguic, 2012 ; Claeys, 2013) observent dans leurs travaux qu'il n'existe pas de solution optimale, mais une infinité de solutions aux divers avantages ou inconvénients : le concepteur privilégiera une solution faite de compromis jugée suffisamment satisfaisante. Ces mêmes auteurs constatent également qu'il n'existe pas de méthode prescrite pour concevoir un projet : chacun développera de manière intuitive et itérative sa propre méthode créative au fur et à mesure des projets. En outre, l'analyse du problème posé et sa résolution s'effectue en interaction : les avantages et inconvénients d'une solution proposée construisent une meilleure perception des contraintes du problème, alimentant à son tour une meilleure solution.

Face à ces spécificités, nous verrons que les notions de concepts, d'analogie, de représentation dessinée de l'artefact et la troisième dimension occupent une place particulièrement importante en conception architecturale (Darses & Falzon, 1996 ; Chupin, 1998 ; Darses, Détienne & Visser, 2001 ; Borillo & Goulette, 2002 ; Safin, 2011).

2.2.2 *Quelques modèles de conception*

Commençons par présenter brièvement les différentes façons de percevoir les activités de conception de manière à expliciter l'ancrage théorique de notre propre perception de la conception.

Dubberly, Baker, Reposar *et al.* (2004) recensent plus de 85 modèles de conception, démontrant par là la multiplicité des points de vue portés sur les activités de conception. Mais cette diversité de représentations théoriques de la conception peut se résumer en quatre familles de modèles, considérant chacune la conception comme linéaire, cyclique, itérative ou itérative-convergente (Stals, 2019). La figure ci-après, empruntée à Blessing (1995, *in Elsen, 2011, p. 45*) en illustre l'essence.

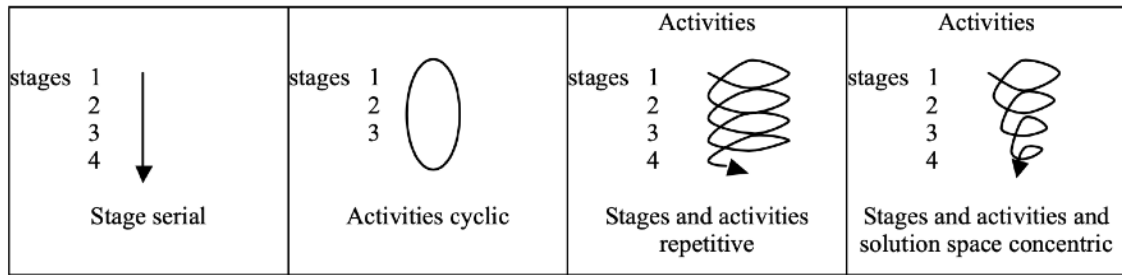


Figure 3. Modèles du processus de conception (d'après Blessing, 1995, in Elsen, 2011, p. 45).

Un point qui semble néanmoins faire consensus, est que la conception alterne entre trois activités majeures : la structuration du problème, la génération de solutions et l'évaluation de ces solutions.

Pour les premières théorisations cartésiennes, structurer le problème, c'est décomposer le problème en sous entités de manière à être capable de se construire une représentation mentale de ce problème. Cette représentation évoluera au fil de la compréhension du problème et de la résolution de ces sous-entités (Schön, 1983) et au fil des différents points de vue adoptés (Détienne *et al.*, 2005).

La génération des solutions, elle, peut se faire selon trois mécanismes de raisonnement différents : par l'application de raisonnements classiques à partir de connaissances générales du domaine (Visser, 2001), par l'application de raisonnement d'analogie, que nous détaillerons plus tard, en réutilisant des connaissances hors domaine ou des solutions spécifiques (Darses, 2004) ou enfin par la redécouverte du projet au travers de ces représentations (Safin, 2011).

Finalement, l'évaluation des solutions consiste à juger de l'adéquation de la solution proposée par rapport à des critères référents. Ces critères peuvent être issus du programme de départ, des règles de bonne pratique architecturale ou des objectifs personnels de l'architecte concepteur. Notons qu'ils peuvent évoluer au fil du projet et des évaluations et qu'ils sont à hiérarchiser, une solution optimale n'existant pas. Plusieurs auteurs s'accordent à affirmer qu'une évaluation exhaustive est impossible car les connaissances nécessaires à l'évaluation sont limitées. Ces dernières sont bridées parce que le processus de conception est un processus long et parce que la génération elle-même des solutions n'est pas exhaustive (Visser, 2001; Darses, 2004; Safin, 2011). Plusieurs évaluations régulières sont donc mises en place à des moments-clés du processus notamment pour déterminer l'étape de conception suivante, pour sélectionner une solution parmi plusieurs propositions, pour définir des points d'attention ou encore pour hiérarchiser les contraintes (Bonnardel, 1999). Bonnardel et Sumner (1996) mettent cependant en évidence trois éléments qui peuvent freiner cette activité d'évaluation. Tout d'abord les connaissances évaluations, en plus d'être limitées, sont dépourvues de moyen de mesure objective. Face à cette subjectivité, plusieurs points de vue sont nécessaires : il n'y a pas de solution correcte ou incorrecte mais plutôt des degrés divers d'appréciation ou de dépréciation. Finalement il peut même être difficile de reconnaître les solutions qui s'avéreront problématiques.

Au travers de ces trois activités, nous constatons l'importance que revêtent les contraintes en conception architecturale : elles sont à la base de la structuration du problème, guident la génération des solutions et servent de référence pour l'évaluation de ces solutions (Safin, 2011).

Au-delà de ces trois activités majeures, les chercheurs en sociologie, ergonomie ou encore en sciences cognitives se sont essayés à la description de cette activité de conception au travers de l'élaboration de différents modèles théoriques. Ils traduisent les multiples points de vue et facettes

de cette activité ainsi que son évolution dans le temps (Darses, 2004). Nous citons ici les cinq modèles qui ont construit notre perception scientifique de la conception et dans lesquels s'ancrent nos observations et analyses. Au travers de chacun, nous abordons un aspect, spécifiquement mobilisé ici, de cette activité complexe qu'est la conception architecturale.

2.2.2.1 Une résolution de problème dans un espace-solution

Les théorisations de la conception la modélisent comme un processus de résolution de problème, en considérant un « problème comme étant (...) toute tâche qu'un individu cherche à accomplir » (Lubart *et al.*, 2003, p. 88). Dans ce modèle de Simon (1969), qui théorise la conception comme une résolution de problème, le concepteur passe d'un état initial, le problème, à un état final, la solution, par une succession d'opérations liant ces deux états grâce à deux étapes. La première est l'analyse du problème et sa structuration, la seconde, la résolution du problème. Cette résolution prend place dans ce que Simon (1969) qualifie d'espace-solution, c'est-à-dire un espace mental accueillant plusieurs combinaisons possibles d'éléments de solution et dans lequel le concepteur génère et évalue ces différentes propositions jusqu'à trouver la plus satisfaisante.

Pour mener cette activité de résolution de problème, deux stratégies sont documentées dans la littérature : la stratégie *top-down* de décomposition et la stratégie *bottom-up* par étapes successives.

La première stratégie permet de faire face à la complexité des problèmes d'architecture en les structurant au moyen d'une décomposition en sous-entités qui seront traitées séparément (Visser, 2009). Cette action permet de scinder des éléments abstraits en sous-entités plus concrètes (Safin, 2011) et donc plus faciles à résoudre. Cependant cette stratégie ne fonctionne que si le problème initial est divisible en un nombre limité de sous-problèmes interdépendants et si le concepteur a déjà, partiellement du moins, conçu dans le même domaine (Pahl *et al.*, 1999), étant alors à même de cerner comment diviser le problème.

La stratégie de résolution par étapes successives, quant-à elle, offre l'avantage de faire évoluer constamment les quelques contraintes prises en compte à chaque étape. Cette méthode invite à rendre les situations moins abstraites, plus circonscrites, et donc plus aisément évaluables (Safin, 2011). Il est important de préciser que le problème reste traité dans son ensemble, contrairement à la stratégie précédente, mais de manière itérative, c'est-à-dire par cycles successifs d'amélioration (Safin, 2011).

Du modèle de Simon, nous retenons la stratégie de résolution *bottom-up* par étape successives. Elle nous semble moins restrictive que la stratégie *top-down* et mieux traduire les pratiques spécifiques au domaine de l'architecture.

2.2.2.2 Une conversation réflexive située

Un autre modèle bien connu est celui de Schön (1983; Schön et Wiggins, 1992), qui considère la conception comme une activité de conversation réflexive et située : située parce qu'elle interagit avec le contexte dans lequel elle prend place ; réflexive parce qu'elle devient elle-même objet de réflexion : le concepteur construit son mode de conception et ses mouvements dans l'espace problème par une conversation appelée *see-transform-see* entre le concepteur et le problème de conception. En effet, pour Schön, le concepteur interprète la situation initiale du problème, ce qui

l'amène à la transformer en une nouvelle situation qui est à son tour interprétée. Pereira (1999, *in Milovanovic, 2019*) explicite ce mécanisme en le décrivant en quatre étapes : (i) comprendre et cadrer le problème de conception ; (ii) décider de l'action de conception à mener en fonction de ce problème ; (iii) évaluer les solutions proposées en regard du contexte de problème cadré ; (iv) réajuster le cadre du problème suivant l'évaluation réalisée. La conception est ainsi une conversation par cycles itératifs amenant du problème initial à la solution finale.

Dans cette activité de conversation réflexive, le concepteur réalise trois types de processus d'action : la *connaissance-dans-l'action*, la *réflexion-dans-l'action*, et la *réflexion-sur-l'action* (Schön, 1987 *in Milovanovic, 2019*). La *connaissance-dans-l'action* désigne l'apport de nouvelles connaissances par l'expérience. Elle est à la base du mécanisme de *see-transform-see*. La *réflexion-dans-l'action* est l'activité cyclique et expérimentale consistant à écouter les retours de son dessin et des implications des propositions produites graphiquement pour faire émerger de nouvelles contraintes et de nouvelles actions de conception. Elle explique le phénomène observé en architecture de redécouverte de ses dessins qui mène à une action créative ou à une prise de conscience des avantages et inconvénients de la solution proposée. Finalement, la *réflexion-sur-l'action* prend place après l'action de conception et permet au concepteur, en réfléchissant sur l'action qu'il vient de réaliser, d'améliorer son processus de conception.

Du modèle de Schön, nous prenons la notion de conception par conversations réflexives, qui nous servira de clef de lecture et d'analyse dans la suite de nos expérimentations.

S'inscrivant dans cette vision du concepteur comme penseur réflexif, Claeys (2017) propose une modélisation de l'interaction créative du concepteur avec son environnement sous la forme d'un réel R et d'un réel augmenté R'. Cette théorie met en évidence que le concepteur crée un second monde de pensée, le réel augmenté, où il se perçoit lui-même en action. Dans le réel R, le concepteur et contexte interagissent dans une boucle d'action-stimulation, tandis que dans le réel augmenté R', l'humain imaginé et le contexte perçu interagissent dans une boucle de projection-interprétation.

2.2.2.3 Une transformation de représentations

Ces deux premiers modèles évoquent quelques itérations mais manquent en partie la complexité de la conception en architecture. Ce modèle de transformation de représentations, recomposé à partir des travaux de Goel (1995) et Visser (2006, 2009), traduit mieux la complexité de la conception, à la fois itérative et convergente.

Goel (1995) a commencé par décrire la conception comme une suite de transformations de l'artefact. Ces transformations peuvent être dites latérales (ou horizontales), lors de sauts entre des idées différentes, souvent présents dans les premières phases créatives et de design préliminaire, ou verticales, lorsqu'une idée est détaillée, plus fréquentes dans la suite du projet initial et en production.

Visser (2006, 2009) s'est inscrite dans cette ligne de pensée en considérant la conception avant tout comme une activité de transformation des représentations mentales et externalisées de l'artefact. La solution se construit au fur et à mesure des transformations itératives et de plus en plus précises de ces représentations de l'artefact. Visser a précisé les deux transformations de Goel en les

déclinant en 6 classes de modification, spécifiant le degré d'ajout d'éléments, de leur détail ou la substitution de formes de représentation.

Des modèles de Goel et Visser, nous empruntons la notion de conception par transformation des représentation ainsi que la classification suivante de ces transformations (Visser, 2006) :

- *dupliquer* - répliquer un dessin sans en modifier le contenu ;
- *ajouter* - ajouter des informations en modifiant peu la représentation ;
- *détailler* - retravailler différents éléments de la représentation avec plus de détails ;
- *concrétiser* - rendre une représentation plus concrète ;
- *modifier* - modifier la représentation sans la détailler ni la rendre plus concrète ;
- *substituer* - remplacer par une représentation alternative sans détailler ni concrétiser.

2.2.2.4 Un affinement progressif de l'objet

Le dernier modèle de conception que nous aborderons est celui de Rasmussen (1990a, 1990b). Il ajoute aux modèles fondamentaux de Simon et Schön une nouvelle notion : la conception est un processus d'affinement progressif de l'objet. Cet auteur voit le processus de conception comme une évolution de l'artefact. Il a caractérisé cette évolution en développant sa théorie de la hiérarchie d'abstraction dans laquelle l'artefact évolue en voyageant entre cinq niveaux d'abstraction, c'est-à-dire cinq niveaux divisant le continuum abstrait-concret. (Rasmussen, 1985; Rasmussen *et al.*, 1994). Ces cinq niveaux, du plus abstrait au plus concret, sont (Rasmussen, 1983) :

- *Intentions fonctionnelles* : pour les intentions et valeurs structurantes, les objectifs globaux ;
- *Fonctions abstraites* : lorsque c'est un traitement d'informations ou des éléments de niveau topologique comme la hiérarchisation des fonctions, l'organisation des espaces ou des flux ;
- *Fonctions généralisées* : pour tout élément standard, réglementaire ;
- *Fonctions physiques* : lorsque c'est un composant concret de l'artefact, la géométrisation d'un élément topologique ;
- *Formes* : pour toute caractéristique de forme ou de matériau, de texture, de couleur, ...

Notons que cette progression de niveau d'abstraction permet un développement cohérent des représentations de l'artefact à des niveaux concrets (Elsen, 2011) et par là un allègement de la charge mentale dont la conséquence principale est une augmentation du pouvoir créatif de la pensée (Vicente & Rasmussen, 1990 *in* Elsen, 2011).

Du modèle de Rasmussen, nous retirons la notion de progression de l'abstraction comme une clef de lecture des activités de conception.

2.2.2.5 Une activité située

Comme nous venons de le voir, plusieurs courants de pensée co-existent quand il s'agit de conceptualiser la cognition et ses relations avec l'environnement de conception.

La cognition peut être considérée comme un système de traitement de l'information (Simon, 1969). Mais cette vision ne permet pas de rendre compte de toute l'importance, pourtant observée dans les pratiques, des représentations graphiques et de leur transformation au cours des activités de conception.

Un premier paradigme systémique de la pensée humaine envisage la cognition comme une activité répartie entre l(es) humain(s), les artefacts, leurs représentations, l'espace de travail, etc. Appelée *cognition distribuée* (Zhang & Norman, 1994; Hutchins, 1995) ou *cognition externe* (Scaife & Rogers, 1996), elle tente de qualifier les rapports complexes entre humains, outils et représentations.

Un second paradigme, celui de la *cognition située* (Suchman, 1987), affirme que toute activité humaine découle de la relation de cet humain avec une situation. Les actions humaines sont donc contextuelles avant d'être rationnelles ou anticipées. Dans la même lignée, Queré (1997) dit que ces plans d'action définis par le contexte servent de guides à la conception et qu'il n'existe pas de plan d'action prédéfini applicable avec succès en toute situation. Ainsi le principe phare de ce paradigme est que la situation, le contexte, détermine l'action, la conception (Suchman, 1987; Queré, 1997).

A nos yeux, la conception est un mélange de ces deux formes, distribuée et située. D'ailleurs, dans ces deux courants, la cognition est décrite comme une interaction avec l'environnement dans lequel elle s'inscrit et qui est constitué de ressources. Ces ressources sont extérieures au cerveau humain et sont utilisées pour soutenir la pensée. Elles peuvent être de l'ordre de l'outil, rendant ainsi la tâche possible ou plus simple, et peuvent aussi être de l'ordre de la représentation externe, servant de support structurant l'information. Ces deux notions prennent ainsi une place importante dans notre vision de la conception.

Le cadre théorique de l'action située (puis de la cognition située) met en cause les modèles « à étape » car les processus mentaux ne peuvent être isolés du contexte de l'action. L'action n'est finalement « planifiée » que dans les rationalisations à posteriori et est avant tout essentiellement opportuniste (Rogalski, 2004). Rogalski amène une nuance supplémentaire intéressante en disant que la cognition située prend une dimension corporelle au travers des processus de perception et d'action. Ces processus, introduits par Gibson (1977, 1979) au travers de la théorie des affordances visuelles, traduisent la lecture, par l'acteur humain, d'opportunité d'action dans les caractéristiques visuelles des objets. Ce type de comportement est courant en architecture où la lecture d'un plan, donc par là des caractéristiques du bâtiment, déclenche des activités d'évaluation ou de génération de nouvelles idées. Cette vision de la conception comme une cognition située corporelle faite de perception déclenchant l'action appuie la vision d'une conception opportuniste de Suchmann (1987).

Notons que ces actions situées, découlant des perceptions visuelles d'objets externes, s'inscrivent dans un champ théorique plus large, celui de la perspective située (Greeno, 1997). Selon Greeno et Brown, dans une perspective située, l'action est située dans un réseau de pratiques sociales et culturelles préexistantes (Brown et al., 1989; Greeno, 1997).

2.2.2.6 Positionnement par rapport aux modèles de conception existants

L'approche de Simon caractérise une conception générique, avec un modèle valable quel que soit le domaine de conception (Claeys, 2013; Stals, 2019). En effet, « Herbert A. Simon influence encore aujourd'hui le domaine de la conception. Ses différents travaux caractérisent le processus de conception de manière interdisciplinaire comme la "résolution d'un problème". La conception devient une activité centrale lorsqu'il affirme que, quel que soit le domaine de connaissances mobilisé, les mêmes caractéristiques principales de la conception peuvent être distinguées dans tous les champs de recherche. En effet, différentes disciplines (l'ingénierie, l'architecture, la peinture...) utilisent la conception non pas pour le "nécessaire", mais par le "contingent". La "conception" n'a

aucun intérêt pour "la façon dont les choses sont", mais pour "la façon dont elles pourraient être" » (Claeys, 2013, p. 133). Mais cette approche est critiquable : dans un premier temps parce que le rôle de la décomposition est surévalué et celui de l'environnement ignoré (Visser, 2006), ensuite parce que la conception architecturale est bien plus complexe qu'une résolution de problème (Stals, 2019) et finalement parce que « le parcours du concepteur n'est pas linéaire, mais est composé de nombreux aller-retours » (Le Coguiec, 2012, p. 11). Le développement initial de son modèle ne vise d'ailleurs pas des tâches si longues et complexes (Elsen, 2011). Par contre, il a l'avantage de poser les fondamentaux des trois activités de structuration-génération-évaluation qui apparaissent encore dans les derniers modèles théoriques. Schön amène un point supplémentaire qui nous semble essentiel : l'importance du contexte de conception. Nous verrons que le contexte organisationnel influence grandement le processus de conception. Nous analyserons également dans quelle mesure les ressources matérielles et de connaissances peuvent le servir ou l'impacter. D'autre part, cette théorie est en meilleure adéquation avec l'étude des phases de conception préliminaire que celles de production (Elsen, 2011). Par contre, « cette méthode met en jeu des dimensions difficiles à (dé)limiter/définir avec précision en cours de conception, telles que le contexte, l'environnement, la culture, la société... Cette théorie est donc (...) plus utile dans les phases préliminaires de la conception, alors que les phases suivantes restent plus analytiques. » (Claeys, 2013, p. 152).

Les modèles Goel et Visser, tout en réunissant également les pensées de Simon et Schön, intègrent partiellement cette dimension de conception par transformation et perception. Leur vision de la conception comme une activité opportuniste et mouvante est par ailleurs, à notre sens, plus en adéquation avec les pratiques observées et traduit mieux leur nature itérative et convergente. Elle met en avant le rôle prépondérant des représentations graphiques de l'artefact dans la conception, rôle sur lequel nous nous pencherons en section 3.2.1.

Finalement, les théorisations de Rasmussen, bien que parfois considérées comme trop simplifiées en comparaison des théories psychologiques habituelles, s'appliquent à rendre compte, dans un cadre compréhensible et ouvert aux non-psychologues, des systèmes complexes de conception (Hoc, 1996). Nous leur reconnaissons, avis partagé par Hoc (1996), l'avantage d'outiller l'analyse de la conception dans ses activités cognitives et sa relation à l'environnement, comme dans sa dimension instrumentée, constituant ainsi un système homme-machine.

Nous considérerons donc dans cette thèse la conception comme une activité de conversations réflexives et de construction de représentation.

Nous l'opérationnaliserons en termes d'activités médiatisées, de transformation des représentations externes et de progression des niveaux d'abstraction. Le chapitre suivant présentera d'ailleurs les différentes notions fondatrices de cette opérationnalisation et au service de nos analyses.

2.2.3 L'activité collective

La conception architecturale est souvent par nécessité réalisée à plusieurs (Darses, Détienne & Visser, 2001), d'autant plus dans le contexte actuel d'exigence de performance et de transformations des processus de conception. Afin d'optimiser le temps et la qualité et de réduire les coûts, la conception simultanée et intégrée est préférée à la conception par lots plus linéaire et séquentielle. Sans compter que les enjeux deviennent de plus en plus complexes, favorisant la diversification des compétences et les activités collectives. Cette conception réalisée à plusieurs est dénommée dans

nos domaines de recherche comme la conception collective (Visser, 2001) et elle se scinde en plusieurs types de conception collective. Des définitions différentes ayant été proposées au fil des recherches dans le domaine, nous emploierons dans ce travail les termes de :

- **coopération**, aussi appelée *conception distribuée* ou *coopération faible*, lorsque les concepteurs construisent simultanément la solution (chacun accompli une tâche précise, seul, dans un but qui lui est propre). Les tâches sont interdépendantes et réparties à l'avance. Chaque concepteur a tout de même connaissance du but commun final auquel il contribue.
- **collaboration**, aussi appelée *co-conception* ou *coopération forte*, lorsque les concepteurs construisent la solution conjointement : ils partagent un but commun, génèrent et évaluent les solutions ensemble. Les objectifs personnels peuvent tout de même être différents, amenant débats et concertations.

Nos recherches analysant d'abord la gestion des informations et l'impact de l'instrumentation sur le processus de conception ou l'idéation et ne décrivant pas les activités cognitives entre co-concepteur, nous ne plongerons pas ici dans la description plus détaillée des différents modes de conception collective ni dans l'ensemble des activités cognitives supplémentaires qu'elle amène.

Par contre, les notions de synchronisation cognitive, de conscience mutuelle et d'espace de travail mental, ou espace de réflexion, étant mobilisées dans nos discussions, nous prenons le temps ici de les redéfinir brièvement.

La synchronisation cognitive s'effectue souvent lors de partage de connaissances, de construction d'argumentaires, d'échanges de points de vue, d'évaluations mutuelles, ... Elle a pour objectif de coordonner les différents points de vue afin de créer un contexte de connaissances mutuelles partagées et de construire un référentiel commun.

Le contexte de connaissances partagées, documenté par Ben Rajeb (2012), aussi appelé conscience mutuelle ou *awareness*, est nécessaire pour pouvoir gérer les interdépendances entre tâches et entre concepteurs. Il permet, en effet, de mieux connaître les concepteurs et leurs disponibilités à collaborer (*social awareness*), d'être conscient des actions de chacun dans la conception et des interactions entre membres (*action awareness*), et d'avoir une vision globale du projet et du déroulement du processus (*activity awareness*).

Le référentiel commun, lui, est défini comme une "représentation fonctionnelle commune aux opérateurs, qui oriente et contrôle leur activité individuelle au sein de l'activité collective" (Leplat, 2000, p.112, in (Elsen, 2011)). Il permet de développer une intelligence collective au travers du partage d'avis et de connaissances.

La construction d'une conscience mutuelle et d'un référentiel commun facilite la communication et permet d'éviter une grande partie des erreurs habituellement commises.

Par ailleurs, les interactions collectives créent une nouvelle dimension dans l'espace de travail. Ainsi, en conception collective, il peut exister autant d'espaces de travail individuels que de concepteurs, comme tous peuvent travailler dans un seul et même espace de travail commun. De même, le référentiel commun et la conscience mutuelle constituent un espace de réflexion commun supplémentaire aux espaces de réflexions personnels des concepteurs. De ce fait, tout au long du processus, les étapes de conception vont être réalisées tantôt en espaces individuels (*I-Space*) et tantôt dans des espaces communs à certains concepteurs (*Space-Between*) ou à tous (*We-Space*) (Ben Rajeb & Leclercq, 2015b).

Ces nouvelles dimensions amenées par la conception collective ont été documentées dans les travaux de Darses et Falzon (1996), Borillo et Goulette (2002), Safin (2011), Elsen (2011) et Ben Rajeb (2012).

2.3 Processus de conception

Il existe deux approches globales théorisant les processus de conception au sens large : l'approche de l'*engineering design*, considérant le processus comme une suite linéaire d'étapes et de solutions partielles successivement validées, et l'approche du *cognitive design*, considérant le processus comme des boucles de reformulations du problème en contraintes et élaboration des solutions en regard de ces différentes contraintes précisées. Calixte (2021) détaille ces approches dans sa thèse et les synthétise dans les figures et le tableau ci-après.

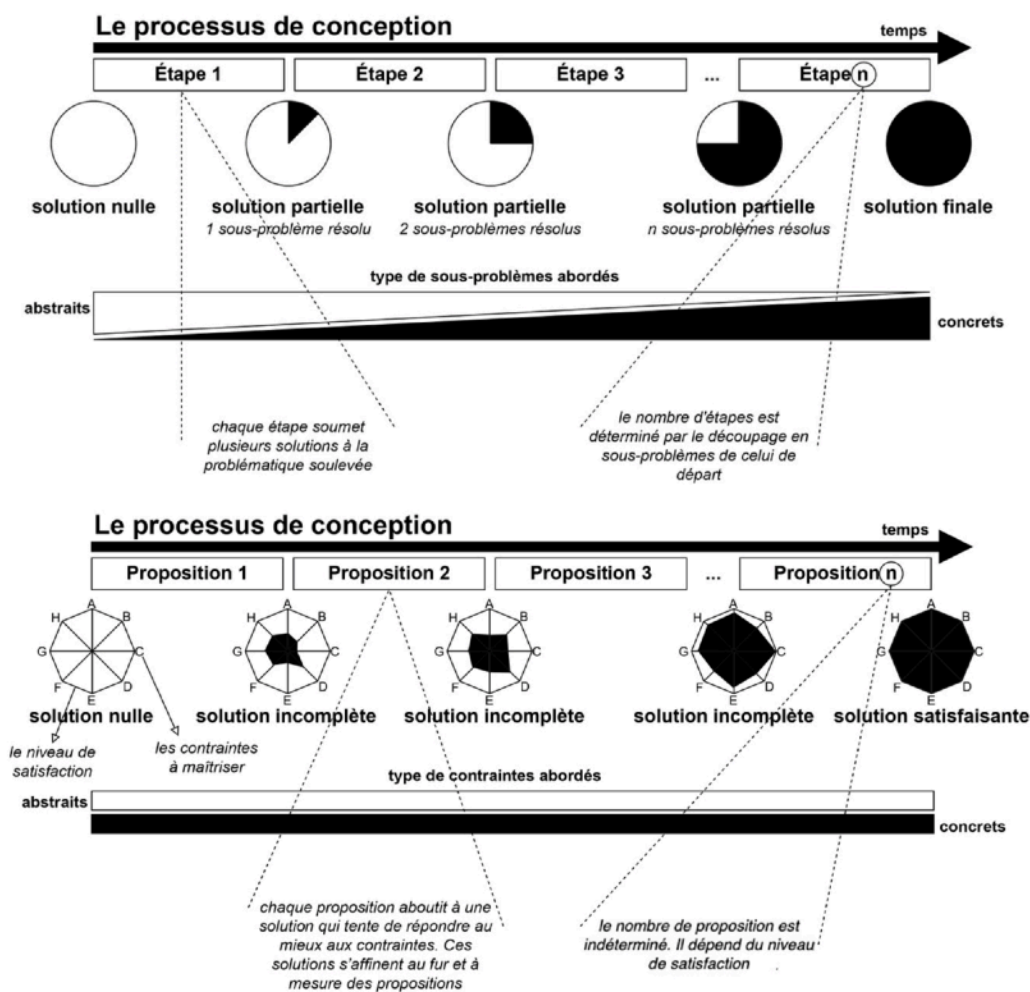


Figure 4. Schématisation comparative des deux approches théoriques décrivant un processus de conception, l'*engineering design* approach en haut et la *cognitive design* approche en bas (Calixte, 2021, pp. 26-27).

Table 1. Synthèse des deux approches propres au processus de conception (Calixte, 2021, p. 28)

Les approches du processus de conception	La synthèse de l'approche de l' <i>engineering design</i> (cf. Pahl & Beitz)	La synthèse de l'approche de la <i>cognitive design</i> (cf. Darses, Détienne, Visser, Bonnardel)
La définition du problème	<i>Le problème est décomposé en sous-problèmes simples, à résoudre individuellement.</i>	<i>Le problème est défini par une série de contraintes qu'il faut respecter.</i>
Les solutions intermédiaires	<i>Pour chaque sous-problème, une série de solution est testée. La solution retenue pour répondre au sous-problème est alors une solution partielle au problème de départ.</i>	<i>L'ensemble des propositions soumises tentent de répondre au mieux à l'ensemble des contraintes. Les propositions ne les satisfaisant pas toutes, on considère chacune d'entre elles comme une solution incomplète.</i>
L'enchaînement des solutions intermédiaires	<i>Chaque sous-problème, acté comme une solution partielle, marque le processus d'une étape.</i>	<i>Chaque nouvelle proposition tente de satisfaire de mieux en mieux les contraintes. Guidées par les choix validés grâce aux solutions incomplètes précédentes, les nouvelles propositions se veulent de plus en plus satisfaisantes.</i>
La solution finale	<i>La solution finale est l'intégration des solutions partielles en une.</i>	<i>La solution finale est celle qui satisfait au mieux l'ensemble des contraintes traitées.</i>

La conception s'avère être dans les pratiques un mélange de ces deux approches. Au-delà d'une approche globale théorique, nous considérerons donc plutôt comme processus de conception la décomposition générale suivante, observable de manière commune sur le terrain.

Safin (2011) décrit ce processus en quatre étapes de conception qui nous serviront de cadre d'analyse lors de nos observations de processus de conception.

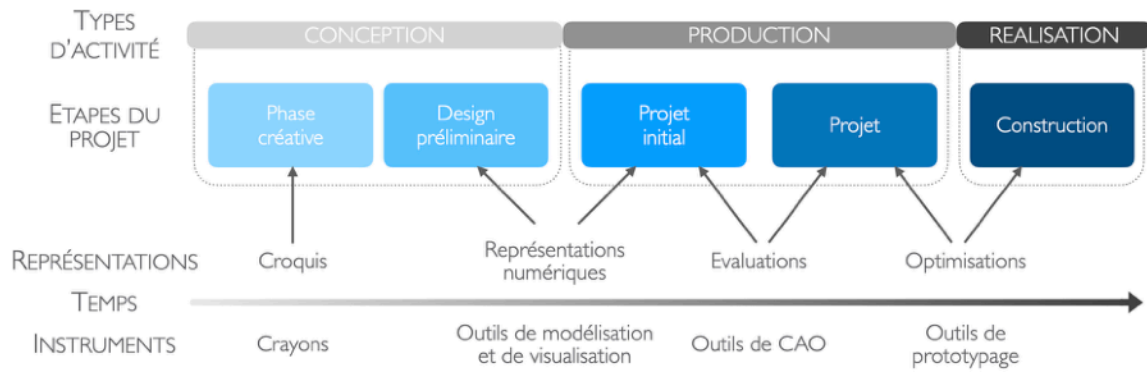


Figure 5. Etapes du projet architectural (d'après Safin, 2011, p. 20).

La première étape, appelée phase créative ou idéation, consiste en la génération des idées principales, structurant le projet à venir. C'est également lors de cette phase que la perception des contraintes se construit (Leclercq, 2005). Pour Lebahar (1983), cette phase est une activité de dialogue entre les représentations mentales et les représentations graphiques externalisées du projet tendant à réduire l'incertitude. Ainsi, le concepteur commencera par formuler spatialement les contraintes du problème posé, constituant par là une base graphique de simulation pour structurer le problème. Cette base s'accompagnera d'hypothèses pour réduire l'incertitude. Il y intégrera ensuite les solutions envisagées, l'amenant à une activité de précision géométrique du projet (Lebahar, 1983).

La phase suivante, le design préliminaire, consiste à étudier ces idées et les faire évoluer ou en générer de nouvelles. A ce stade, les documents sont encore des esquisses personnelles, parfois ambiguës, et permettant de projeter plusieurs solutions en parallèle.

Le concepteur rentre ensuite dans des activités de production avec la phase de projet initial. Lors de cette phase, l'artefact est résolu géométriquement et ses performances sont évaluées. Au terme du projet initial, le concepteur produit différents documents structurés et précis, compréhensibles pour une personne extérieure.

Finalement, l'étape de projet consiste en la caractérisation exhaustive de l'artefact conçu et en la production des plans d'exécution. La conception architecturale est alors terminée.

Dans le cadre de notre recherche, nous nous intéressons à la phase d'idéation, première phase de génération, finalement peu outillée (Safin, 2011), si ce n'est par des outils numériques de transposition du dessin, ainsi qu'à la dynamique BIM, prenant place dans les phases ultérieures de conception et de production, et étant au contraire outillée selon des protocoles précis, soulevant la question de la transition entre les deux. Nous construisons la représentation suivante du processus de conception afin de traduire graphiquement les caractéristiques de ces différentes phases. Notons qu'elle servira de base à la formalisation de nos analyses de la transition idéation-BIM au chapitre 6. Nous y retrouvons les boucles itératives convergentes de la conception, instrumentée des outils classiques, s'interrompant lors de la réalisation de la maquette BIM, dont l'abstraction ne fera que diminuer au fur et à mesure de la phase de production.

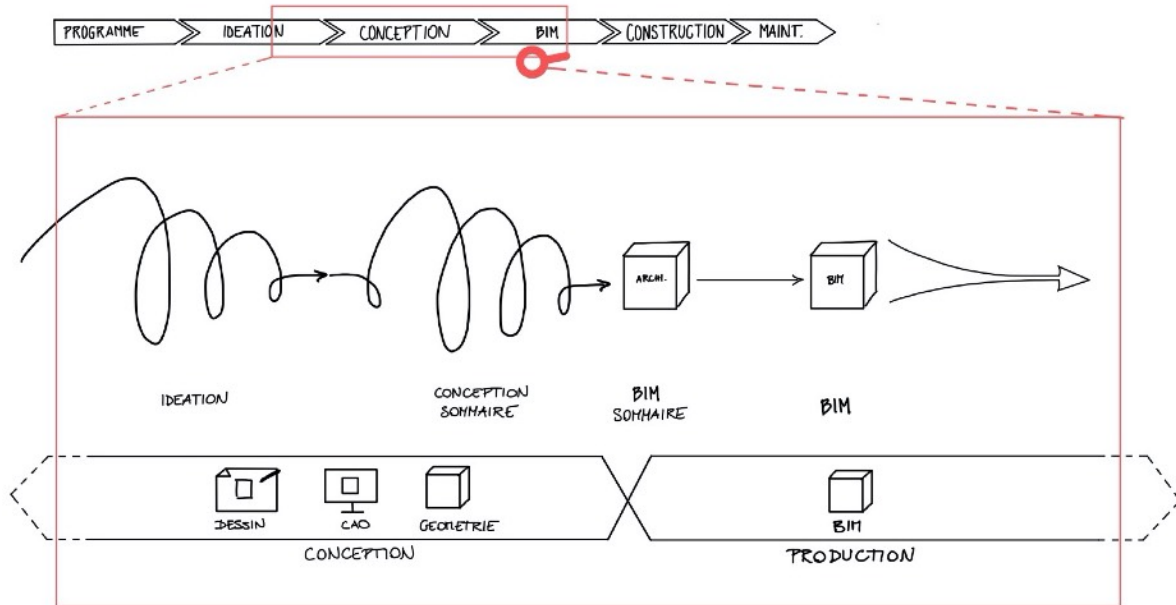


Figure 6. Vue globale du processus de conception architecturale.

Les sections suivantes aborderont les deux phases du processus de conception qui nous intéressent particulièrement dans cette recherche : l'idéation d'une part, en section 2.4, et le BIM d'autre part, en section 2.5.

2.4 L'idéation

2.4.1 Définition de l'idéation

Posons les bases de cette recherche en définissant l'idéation. « L'idéation est le processus de génération des idées utiles pour atteindre un état ou un résultat désiré » (traduit librement de Briggs & Reinig, 2010, p. 123). C'est une activité essentielle pour relier les différents pans du problème et y connecter les différentes solutions envisagées (Dorst & Cross, 2001). Elle apparaît principalement lors des premières phases du processus de conception. Et de micro-épisodes d'idéation continuent également d'apparaître tout au long du processus, dès qu'un problème est soulevé (Elsen *et al.*, 2010).

Les idées, quant à elles, sont plutôt définies, en *engineering design*, comme étant « une solution possible à un problème donné » (Shah *et al.*, 2003, in Kim & Maher, 2021, p. 441). En sciences cognitives, elles sont définies comme « un problème cognitif dont le concepteur tient compte au cours du processus de conception » (Kim & Maher, 2021, p. 441).

Rappelons que cette génération des idées peut se faire par application des connaissances du domaine (Visser, 2001), par analogie (Darses, 2004), ou lors de la redécouverte du projet (Safin, 2011).

2.4.2 Facteurs favorisant ou limitant l'idéation

Comme documentés dans la littérature, plusieurs facteurs favorisent, ou au contraire limitent, cette activité d'idéation. Ils sont synthétisés à la figure ci-après.

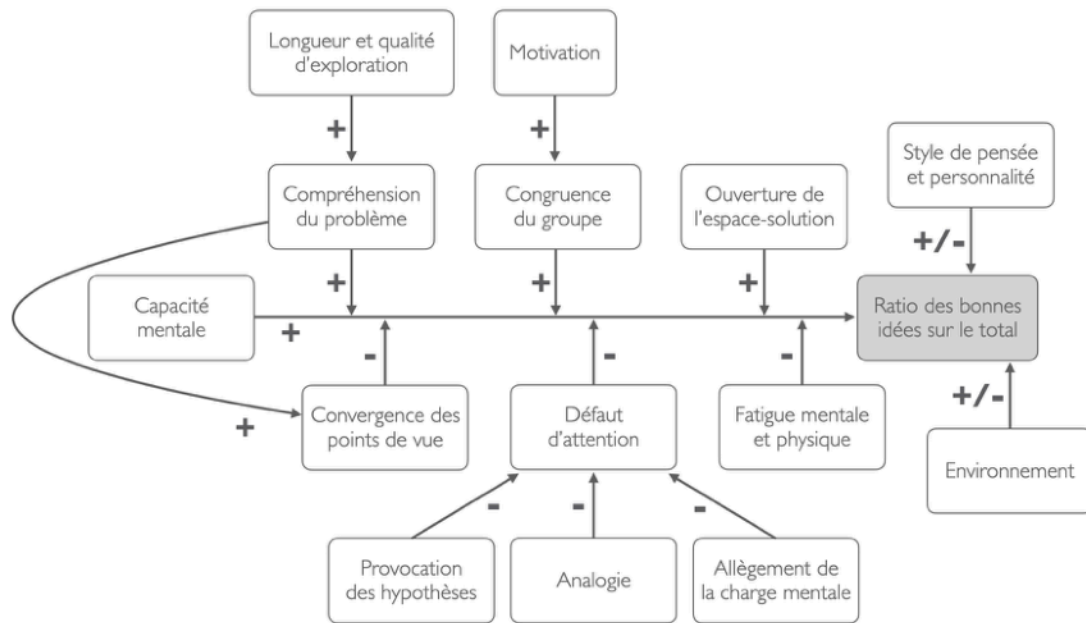


Figure 7. Facteurs impactant l'idéation (notamment d'après Sternberg, 2006 ; Briggs & Reinig, 2010).

Dorst et Cross (2001) affirment que les idées créatives et les concepts émergent au terme d'une longue et profonde analyse du problème. Ward (2001) appuie ce point en exprimant que le niveau de créativité est fonction de la longueur et de la qualité de l'exploration. Cette exploration consiste pour lui en l'évaluation, la modification et l'élaboration des concepts jusqu'à ce qu'ils deviennent le produit créatif. Middle (1996, *in Darses, 2009*), au contraire, montre que, au plus le niveau de connaissance des contraintes du projet augmente et au plus les points de vue convergent, au moins les décisions sont réversibles et la capacité d'action large.

Knoll et Horton (2011) décrivent trois types de processus d'idéation : les techniques d'analogie, basées sur des cas similaires ; des techniques de provocation, remettant en question les hypothèses sous-jacentes ; et des techniques aléatoires, mobilisant des stimuli variés.

Pour Sternberg (2006), la créativité émerge de 6 sources : la capacité intellectuelle, le style de pensée, la personnalité, la motivation, les connaissances et l'environnement.

Une théorie intéressante, la Bounded Ideation Theory (Briggs & Reinig, 2010 ; Reinig & Briggs, 2012), nous permet de synthétiser et nuancer les différents points de vue existants dans la littérature sur les facteurs de performance de l'idéation. Le principe fondamental de cette théorie est de considérer que le but de l'idéation n'est pas de fournir une grande quantité d'idées mais plutôt d'obtenir des idées de bonne qualité, définies par les auteurs comme des idées aidant substantiellement à atteindre le but visé. Ceux-ci précisent que la génération des bonnes idées est limitée par une série de facteurs. Nous parcourons ces différents facteurs ci-après et pointons leurs effets, illustrés par rapport à une courbe d'idéation idéale représentée dans la figure ci-après.

Le premier facteur limitant est la *capacité mentale*, incluant la capacité intellectuelle, l'expertise relevant du domaine mais aussi la disponibilité de ces connaissances et leur potentiel chaînage en associations successives. La seconde limite est liée à l'*espace-solution* : une tâche de conception ouverte, pour laquelle le nombre de solutions satisfaisantes est illimité, ne limitera pas l'idéation, contrairement à une tâche de conception fermée où, à un moment donné, toutes les bonnes idées existantes auront été suggérées. Le troisième facteur limitant est la *compréhension du problème*. En effet, face à un problème mal défini, comme en conception architecturale, le(s)

concepteur(s) peine(nt) à générer de bonnes idées. Notons qu'au fur et à mesure de la tâche, le problème est de mieux en mieux cadré. Son effet limitant diminue donc. La quatrième limite est appelée limite d'*attention*. Il est en effet impossible de penser à tous les concepts existants pouvant être mobilisés. En outre, Briggs et Reinig mettent en évidence l'existence d'un processus d'allumage chaîné des concepts qui limite la capacité à explorer de nouvelles possibilités et à penser hors du cadre, d'autant plus en l'absence de stimulus externes. La charge mentale, due à des tâches parallèles ou à des distractions, freine aussi la capacité à générer de nouvelles bonnes idées. Le cinquième frein à l'idéation est appelé la *goal congruence boundary*, la limite de concordance des objectifs, désignant selon les auteurs le degré de perception de l'intérêt pour l'individu de travailler au but commun pour remplir ses objectifs personnels. Ensuite, d'autres freins, découlant de *facteurs sociaux*, comme la peur du jugement du groupe, peuvent aussi impacter l'idéation. Finalement, la *fatigue*, en termes d'endurance mentale mais aussi physique, est également un facteur limitant de l'idéation.

Face à tous ces facteurs, sur lesquels il nous est difficile d'agir, au-delà d'une prise de conscience individuelle de la part des concepteurs, nous choisissons d'intervenir plutôt sur les mécanismes de génération des idées, ce qui semble plus facilement réalisable et implémentable dans les pratiques. Nous interviendrons ainsi sur le plus puissant de ces mécanismes : l'analogie, une activité cruciale du processus de conception, orientée vers la génération de solutions.

2.4.3 L'analogie

Dans leur étude sur le raisonnement par analogie, Leclercq et Heylighen soulignent qu'« en architecture, comme dans d'autres domaines de conception, les problèmes de conception sont généralement mal définis ou difficiles à résoudre. Cette difficulté fait du raisonnement par analogie une stratégie de conception potentiellement puissante, puisqu'elle peut apporter des connaissances précieuses d'une situation connue à la situation de conception mal définie qui nous occupe. » (Leclercq & Heylighen, 2002, p. 2). L'analogie visuelle, notamment, permet d'améliorer la qualité de la conception ainsi que la qualité des solutions proposées (Casakin 1997 ; Casakin & Goldschmidt, 1999 ; Ball & Christensen, 2009, 2019). Analogical reasoning and mental simulation in design: Two strategies linked to uncertainty resolution. *Design Studies*, 30, 169-186.). « Le potentiel de l'analogie n'est pas seulement de l'ordre d'une heuristique, ou de l'ornement du discours, (...) il tend vers une production du sens, une constitution » (Chupin, 1998; p. 328). Chupin (1998) avance également que le raisonnement analogique est un mécanisme de génération de l'architecture précieux et au coeur même des conversations réflexives de conception.

Commençons par re-préciser que l'analogie est la ressemblance établie par l'imagination entre plusieurs objets de pensée. Cette action assimilatrice transforme ainsi un objet de pensée sous l'influence d'un autre. Le raisonnement par analogie, quant à lui, est ce raisonnement d'induction qui conclut à la ressemblance entre les objets de pensée. « Aldo Rossi reconnaissait en l'analogie une forme de mise en relation adéquate et privilégiée » (Chupin, 1998, p. 325).

Ce raisonnement analogique est influencé par la perception visuelle, par le contexte et par les apprentissages sociaux (Bonnardel, 2000 ; Leclercq & Heylighen, 2002). Il prend place en deux temps : dans un premier temps, un appariement spontané est réalisé entre des éléments superficiellement similaires ; dans un second temps, la pensée rationnelle corrige cet appariement

après avoir vérifié ses conditions d'application en l'adaptant. Notons que Descola, ethnographe et chercheur en anthropologie sur la question de la cognition notamment, affirmait : « les êtres humains reconnaissent partout les similitudes morphologiques entre les organismes lorsque leur juxtaposition les y invite, et ils ont tendance à structurer ce type de connaissances dans une arborescence, le dispositif d'économie de mémoire le plus économique pour le stockage et l'extraction de données lexicales » (librement traduit de Descola, 2010, p. 334).

« Raisonner par analogie, en architecture, est la démarche par laquelle ces éléments sources favorisent soit la compréhension, soit la reformulation du problème posé. » (Scaletsky, 2003, p. 36). Ainsi, comme nous le savons, le raisonnement par analogie présente deux rôles dans les activités de conception (Casakin, 1997 ; Bonnardel, 2000 ; Ball & Christensen, 2009, 2019). Analogical reasoning and mental simulation in design: Two strategies linked to uncertainty resolution. *Design Studies*, 30, 169-186.) : d'une part, identifier une potentielle nouvelle solution, par exemple être inspiré par la façade d'un bâtiment pour choisir un matériau de revêtement extérieur, et, d'autre part, valider une proposition, dans notre cas de choix de revêtement, valider le matériau proposé car sa mise en oeuvre a été possible et semble bien résister au temps sur le bâtiment voisin. L'analogie permet en outre une mise en oeuvre plus rapide de ces activités de génération et d'évaluation de solutions. Elle est largement mobilisée dans les premières phases de la conception, tout en continuant d'apparaître dans la suite du processus (Le Coguiec, 2012).

Chupin (1998), dans sa thèse, fait de l'analogie une problématique à part entière, ouvrant les questionnements sur son rôle argumentaire, la distinction entre contenu analogique et forme analogique, les critères de classement des analogies, les frontières disciplinaires entre sources d'analogie, l'usage qui en est fait et leur rôle dans la conception.

Leclercq & Heylighen (2002), dans leur étude sur l'analogie, définissent une série de variables en regard de ces éléments pré-cités. Cela nous permet de caractériser et de mieux appréhender l'analogie, répondant ainsi à ces questionnements.

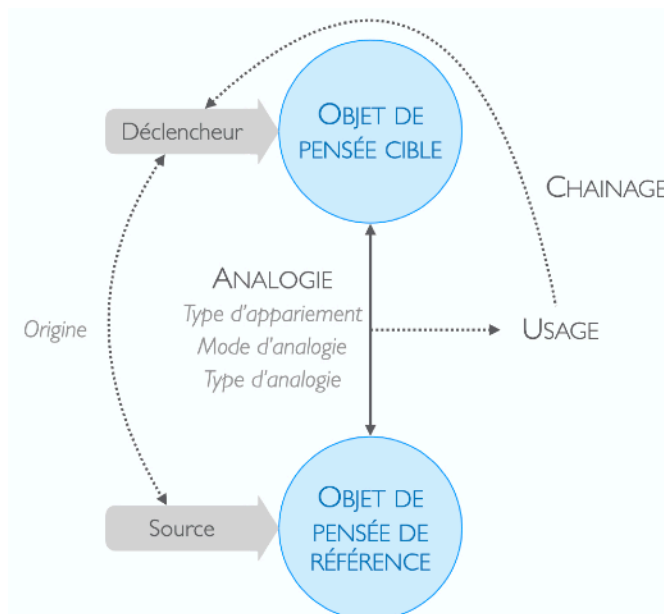


Figure 8. Diagramme schématisant un raisonnement analogique (basé sur Leclercq & Heylighen, 2002).

La figure 8 schématise par ailleurs ces différentes variables de caractérisation des analogies décrites par Leclercq et Heylighen (2002) et utilisées dans notre recherche. Ainsi, l'objet de pensée inspirant l'analogie peut être de plusieurs natures différentes. Il peut être visuellement présent dans l'environnement ou extrait de la mémoire du concepteur, soit en référence à une connaissance professionnelle, soit en référence à une expérience personnelle (c'est la *source* de l'analogie). L'objet de référence peut venir du même domaine que celui de l'artefact conçu, par exemple dans la comparaison de deux bâtiments, ou provenir d'un autre domaine (i.e. l'*origine* de l'analogie). L'appariement peut se faire en regard de similitudes d'articulations entre les objets, de similitude de caractéristiques ou par un transfert global de l'objet référent dans le domaine actuel de conception (appelé le *type d'appariement*). L'analogie peut être consciente ou inconsciente (i.e. le *mode* d'analogie) et spontanée ou sollicitée (i.e. le *type* d'analogie). Finalement, quatre types *d'usages* existent : une analogie peut être intégrée au projet avec succès, elle peut être pertinente mais finalement non-intégrée, elle peut être inadaptée et donc rejetée et finalement elle peut amener à déclencher d'autres analogies chaînées. Dans leurs expériences sur le raisonnement analogique, ces chercheurs ont d'ailleurs constaté qu'une large majorité des analogies présentes en conception sont spontanées et très fréquentes, suggérant que cette forme de raisonnement est naturelle, et que l'objet d'analogie réside souvent dans les relations structurantes d'un élément plutôt que dans la globalité des caractéristiques de cet élément.

2.5 La dynamique BIM

2.5.1 Définition du BIM

Aujourd'hui, la 4^{ème} révolution industrielle impacte la société, notamment le secteur de la construction. Les ressources d'informations statiques et fragmentées se transforment en ressources d'informations centralisées ; nous passons globalement des documents papier aux bases de données évolutives et partagées (Poirier *et al.*, 2018). Le BIM est avancé comme un pilier du déploiement de la construction 4.0. Patrascu et Hémond (2019, p. 71) affirment même que « le *Building Information Modeling* est posé tel un étendard du progrès de la construction et de la gestion des bâtiments ».

Les définitions du BIM pouvant être contradictoires dans la littérature (De Boissieu, 2020), nous prenons quelques lignes pour préciser la définition du BIM employée dans ce manuscrit. Hijazi définit le BIM comme « des propriétés physiques 3D avec des informations graphiques et non graphiques et des formats de données de documentation pour toutes les phases de l'esquisse, de la conception et de la construction, qui sont considérées comme un processus de gestion utilisant des plates-formes spécifiques pour le cycle de vie du projet » (librement traduit de Hijazi & Omar, 2017, p. 143). Hochscheid spécifie que « l'acronyme « BIM » signifie *Building Information Model/Modeling/Management*. Il désigne une technologie innovante qui regroupe un ensemble de méthodes, procédés et outils de travail permettant d'alimenter (*Building Information Modeling*) et d'exploiter une base de données contenant des informations d'un ouvrage tout au long de son cycle de vie » (Hochscheid, 2018, p. 52). L'information bâtiment est connectée à « une maquette numérique (*Building Information Model*), qui est une représentation numérique des caractéristiques géométriques et fonctionnelles d'un ouvrage. Elle constitue une source d'informations partagées utile pour la prise de décision au cours de toutes les phases du cycle de vie d'un ouvrage (...). Pour que les informations puissent être utilisées, il convient de les gérer (*Building Information Management*) (...) à chaque passage d'un acteur (ou phase) du projet à l'autre (...) » (Hochscheid, 2018, p. 52). Pour De Boissieu (2020, p. 1), « le BIM désigne un ensemble de pratiques mettant en

jeu la manipulation et l'échange de données du bâtiment entre les acteurs du projet, tout au long de son cycle de vie. Les technologies numériques de modélisation, simulation et communication, mais aussi les méthodes de travail qui supportent ces pratiques renouvellent les outils du projet. C'est tout le paysage de savoir-faire et de capacités de l'industrie du bâtiment qui se transforme ». En effet, le BIM transforme donc ce qui serait un simple processus de gestion et de coordination des données en une approche collaborative tout au long de la vie du projet (Celnik & Lebègue, 2014; Svetel, Jaric & Budimir, 2014). Il s'agit d'une méthode de travail intégrée qui associe un modèle numérique produit à l'aide d'un logiciel de modélisation à un ensemble de processus collaboratifs exploitant ce modèle (Celnik & Lebègue, 2014; Svetel, Jaric & Budimir, 2014). Ce modèle numérique est la référence unique pour tous les acteurs impliqués dans la conception et la construction du bâtiment (Kensek, 2015). Il compile toutes les données et informations relatives au bâtiment dans un modèle unique (Svetel, Jaric & Budimir, 2014; Chone *et al.*, 2016).

2.5.2 Concepts propres au BIM

Les usages du BIM varient selon la phase du processus lors de laquelle il est mobilisé. Sont ainsi distingués le BIM de conception, le BIM de construction, le BIM de gestion et le BIM de déconstruction (Hochscheid, 2018). Le BIM fait l'objet d'un cadre administratif précis composé des différents documents visibles ci-après, encadrant les pratiques dans les projets BIM. Ces différents documents permettent, entre autres choses, de structurer la gestion du *workflow*, c'est-à-dire la représentation de l'enchaînement et de la répartition de l'ensemble des tâches, et du *data flow*, c'est-à-dire l'ensemble des données créées, structurées et exploitées.

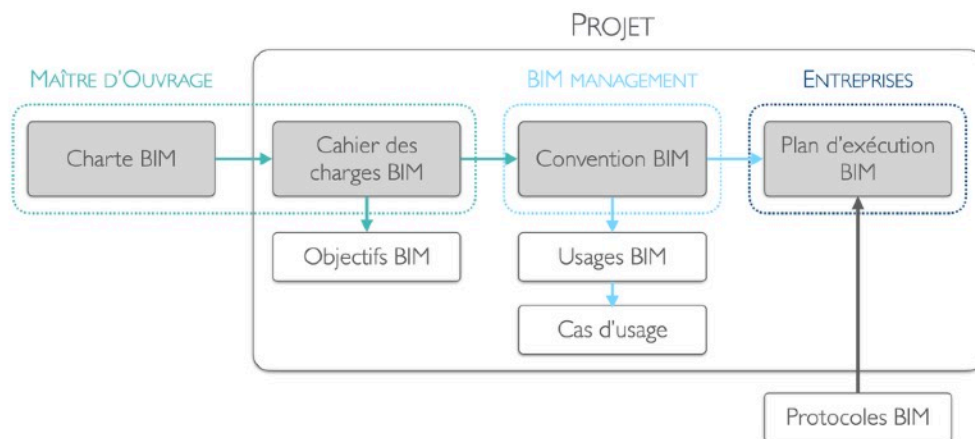


Figure 9. Documents encadrant le travail et les pratiques dans les projets BIM (basé sur Hochscheid, 2018)

Les informations bâtiments nombreuses et pas toujours utiles, il a fallu élaborer une description des niveaux de détail attendu pour les maquettes. Ainsi, les LOD (*Level of Detail/Development*) et les LOI (*Level of Information*) ont été développés pour préciser respectivement les niveaux de détail géométriques, les niveaux de développement de la maquette et les niveaux d'information intégrée. Plus précisément, le concept LOD "est utilisé pour décrire le développement d'un modèle numérique du bâtiment à travers les différentes étapes de son cycle de vie. Il formalise la nature progressive du processus de conception, ce qui améliore la qualité des décisions prises. Dans la plupart des approches, les différents niveaux de développement sont décrits à l'aide de définitions textuelles (informelles) et d'illustrations graphiques pour divers éléments de

construction. Ensemble, ces définitions représentent la qualité de l'information requise, c'est-à-dire sa fiabilité, sa précision et son exhaustivité. " (librement traduit de Abualdenien & Borrmann, 2019, p137). Au fur et à mesure que la conception du bâtiment progresse, les niveaux de développement augmentent (Latiffi *et al.*, 2015; Hochscheid & Halin, 2018; BIMForum, 2018; Abualdenien & Borrmann, 2019). La phase de conception est ainsi divisée en 4 sous-phases de niveaux LOD différents détaillées ci-après et illustrées à la figure 10.

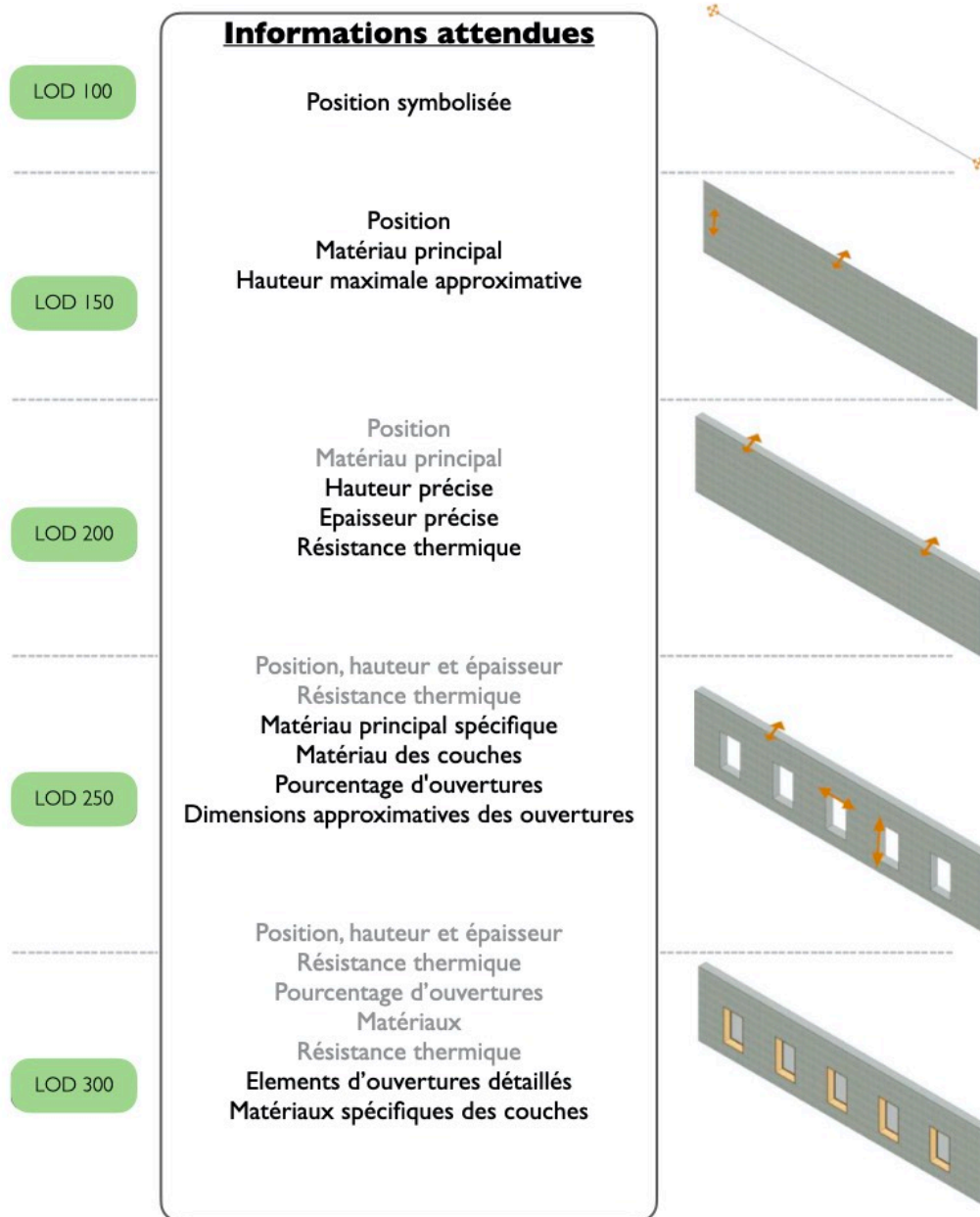


Figure 10. Exemple de la progression des LODs pour un mur de façade.

Les quatre phases sont :

- Préconception, ou esquisse, (LOD 100) : à ce stade, les idées sont générées. Le niveau 100 correspond aux éléments génériques et non géométriques. Les informations sont présentées sous forme de symboles, d'exemples de références ou d'éléments textuels.
- Conception préliminaire, ou avant-projet sommaire, (LOD 200) : les idées sont étudiées, de nouvelles apparaissent et le projet est résolu sur le plan géométrique. Les documents deviennent plus précis. Le niveau 200 présente des éléments génériques dont la quantité, la forme, la taille, l'emplacement et l'orientation sont précis. Le choix des solutions se fait par l'analyse des performances.
- Conception détaillée, ou avant-projet détaillé, (LOD 300) : le projet est résolu géométriquement et ses performances sont évaluées. Les documents sont structurés et précis. À ce niveau, tous les éléments sont modélisés avec leur quantité, leur taille, leur forme, leur emplacement et leur orientation, qui peuvent être mesurés directement à partir du modèle sans se référer à des informations non modélisées.
- Production, ou dossier exécutif, (LOD 350) : le projet est caractérisé de manière exhaustive et les documents d'exécution sont produits. En plus des éléments directement mesurables à partir du modèle, ce LOD comprend une interface entre tous les systèmes de construction, permettant notamment la coordination entre les acteurs et la détection et l'évitement des conflits.

Le système LOD n'est pas encore standardisé au niveau mondial, mais un système global a commencé à émerger à travers le Level of Development Specification (BIMForum, 2018), basé sur l'American Institute of Architects, et adopté en particulier en Belgique, par chaque conseil national de la construction. D'autres directives ont également été proposées. Par exemple, le Royaume-Uni a introduit sept niveaux de définition caractérisant le niveau de détail et le niveau du modèle (Abualdenien & Borrmann, 2019). Un autre exemple est celui du Danemark, qui comprend sept niveaux d'information correspondant aux étapes traditionnelles de la construction (Van Berlo & Bomhof, 2014).

Le BIM est une manière intégrée de travailler. Il n'est pas seulement un usage de maquette(s) 3D mais un processus de collaboration autour de l'exploitation de cette maquette (Celnik & Lebègue, 2014). La notion qualifiant ce niveau d'exploitation des pratiques BIM par une équipe, est le niveau de maturité. Il est détaillé par Hochscheid (2018) :

- Au niveau 0, les acteurs élaborent séparément les différents documents du projet en 2D. Cela correspond à du dessin assisté par ordinateur.
- Le niveau 1 est une modélisation orientée objet : les acteurs modélisent une maquette 3D permettant de générer les différents documents du projet, qu'ils s'échangent de manière unidirectionnelle.
- Au niveau 2, appelé collaboration orientée modèle, les acteurs réalisent des maquettes détaillées du projet, les partagent mutuellement et en exploitent les informations. Ces partages peuvent avoir lieu en *closed BIM*, ou en *intraopérabilité*, c'est-à-dire entre des logiciels d'un même groupe, conçus pour fonctionner ensemble, ou en *open BIM*, en *interopérabilité*, c'est-à-dire dans des formats de fichier indépendant de tout éditeur ou logiciel.
- Finalement, le niveau 3 est une intégration orientée réseau : les acteurs ont accès à une maquette unique stockée en ligne et éditable par tous de manière synchrone (ce dernier niveau restant à ce jour théorique).

De nombreuses plateformes collaboratives BIM ont vu le jour pour supporter ces activités d'échange. Elles permettent en outre le stockage des maquettes, leur visualisation et leur vérification, notamment au moyen des *clash detection*, c'est-à-dire des vérifications de la maquette par simulation détectant les conflits d'interférence spatiale entre composants modélisés.

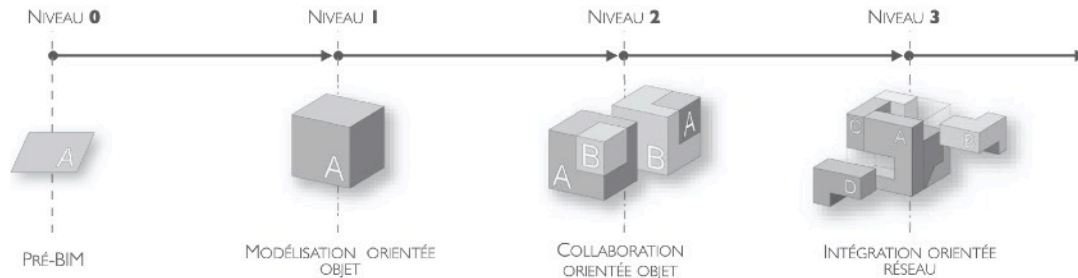


Figure 11. Niveaux de maturité des usages BIM (basé sur Succar, 2010)

Comme nous venons de le voir, le modèle numérique unique de référence pour tous les acteurs du projet est en fait une collection de maquettes plurielles. Par simplicité d'écriture et légèreté de lecture, nous ne marquerons pas ce pluriel systématiquement dans la suite du manuscrit et parlerons plutôt du concept, de l'artefact, de « la maquette BIM » pour désigner l'ensemble de ces modèles numériques.

2.5.3 Avantages des technologies BIM

Comme nous l'avons vu, les technologies BIM sont mises en oeuvre dans le but de répondre à des enjeux sociaux et économiques de performance des bâtiments. En effet, avec la conscientisation de l'évolution climatique actuelle, l'art de bâtir fait face à une demande pressante de performances en termes de durabilité environnementale. La démarche collaborative du BIM est présentée comme une solution potentielle pour transformer la conception actuelle par lots en une conception intégrée dans laquelle tous les acteurs sont impliqués et articulés dès le lancement du projet (NSCSC, 2010).

Cette évolution des pratiques apporte incontestablement des bénéfices pour les études de faisabilité, le suivi des travaux et la livraison du chantier. En reconstruisant le bâtiment virtuellement, la maquette BIM permet de lever une quantité de points d'articulations nécessaire entre les "lots" et de les résoudre à moindre coût, en comparaison de leur coût de résolution lorsqu'ils sont découverts sur chantier. Celnik et Lebègue (2014) attestent d'une amélioration qualitative mais aussi quantitative du bâtiment. Shin, Jung et Kim (2022), dans leur étude comparative de projets similaires menés avec et sans BIM, observent également un gain de temps sur la globalité du processus de conception dans les projets menés en BIM.

Martin relève tout de même que « le BIM est à la fois un produit – vendu à grands renforts de propagande commerciale et de séminaires de formation par Autodesk, le champion Big Tech en architecture – et une sorte de pré-produit, autrement dit un système infrastructurel dont dérivent des produits comme les bâtiments ainsi que d'autres signifiants. » (Bressani *et al.*, 2019, p. 134).

2.5.4 Limites des technologies BIM

Les technologies BIM font l'objet de débats, au sein des acteurs et des chercheurs de la conception et de l'art de bâtir. Pour Patrascu et Hémond (2019, p.p 80-81), « les dynamiques à l'œuvre s'inscrivent dans (...) une idéologie de la « bonne gestion ». Il est question de « construire mieux », de « tenir compte des performances à atteindre », d' « optimiser la planification », d' « optimiser la conception du bâtiment », de « mieux appréhender le projet et son exécution », etc. Cette idéologie s'énonce par l'intermédiaire du triptyque *performance* (l'objectif des organisations), *rationalité* (la manière de procéder des organisations afin de mettre en place des formes d' « optimisation »), et *maîtrise* (qui renvoie à l'idée d'un contrôle des organisations) ». Bressani, Carpo, Martin, Vardouli et Picon (2019) questionnent d'ailleurs le lieu de réel gain (dans l'efficacité de construction, les formes différentes, ou réellement pour la conception) et la nature de l'impact indéniable sur les fondements même de l'architecture ainsi que sur l'organisation sociale et collective des processus de conception. Bressani y appuie que « Dans leur forme « idéalisée », les logiciels BIM permettent le développement d'un processus radicalement collaboratif, où designers, ingénieurs, constructeurs, gestionnaires, et toutes sortes de consultants, depuis les analystes des coûts jusqu'aux intervenants communautaires, ont quasiment la possibilité de travailler simultanément les uns avec les autres. Le projet prend forme à travers le dialogue, ou sans doute plus précisément à travers la négociation, entre divers participants, un scénario qui, concrètement, aboutit à une redéfinition fondamentale de la notion d'auteur en architecture, voire à sa disparition qui, au moins potentiellement, peut s'avérer libératrice. Le BIM peut avoir des effets positifs si cette collaboration réunit des voix différentes et distribue jusqu'à un certain point les rôles, les fonctions et les incidences, avec pour objectif de canaliser les expériences collectives des « modes d'existence », pour user d'une expression latourienne. Il peut inversement avoir des effets négatifs s'il ne sert qu'à augmenter le niveau de contrôle, d'efficacité et de profit, ce qui donnerait une plus grande latitude aux gestionnaires de construction pour maîtriser toutes les étapes de la production architecturale et en ferait de ce fait les auteurs cachés. » (Bressani *et al.*, 2019, pp. 131-132). Vardouli ajoute que « Les études ethnographiques sur le BIM brossent un tableau moins optimiste des conséquences de la délégation à un système d'information des traductions entre les sphères professionnelle et matérielle : compter sur une communication fluide génère souvent des accrocs » (Bressani *et al.*, 2019, p. 132).

En outre, cette proposition technologique est conçue pour optimiser économiquement et écologiquement la construction du bâtiment, et non sa conception (Levan, 2016; Guéneau, 2019), constituant ainsi la première limite du BIM. Nous retrouvons donc des phases de conception contraintes par le BIM avec un effort et une charge de travail supplémentaire pour le concepteur en récupérant les bénéfices seulement dans la suite du cycle, en phases de construction (Sergeevich *et al.*, 2019). MacLeamy (dans Dautremont *et al.*, 2020) synthétise bien ce phénomène dans la figure ci-après, au moyen d'une courbe d'effort variant selon les étapes du cycle de vie du bâtiment.

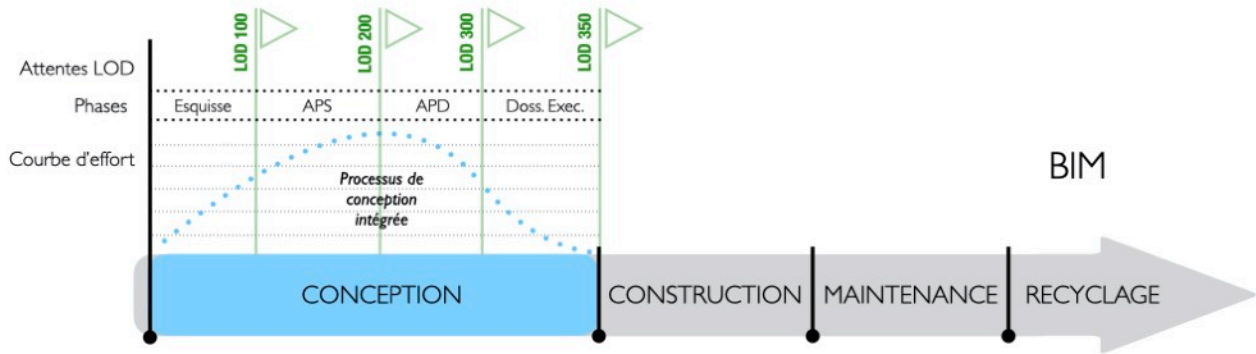


Figure 12. Courbe d'effort du BIM tout au long du cycle de vie du bâtiment, sur base du graphique de MacLeamy (Dautremont et al., 2020).

Sergeevich *et al.* (2019) relèvent que la limite la plus globalement rencontrée lorsqu'on se penche sur les technologies BIM est que ces technologies de l'information bâtiment ne peuvent, malgré des tentatives d'amélioration de développement, s'intégrer aux pratiques de travail déjà existantes et aux outils traditionnels mobilisés dans les processus intégrés de conception.

En outre, le BIM remonte aujourd'hui très en amont des processus de conception. Il n'a cependant pas encore prouvé son efficacité (LIST, 2015; Doutriaux, 2018). La maquette numérique, recensant toute l'information descriptive et formatée du projet, trop restrictive et rigide restreint les possibilités d'évolution du projet dans un sens créatif alors que l'objectif de ces phases amont est justement de permettre l'idéation, c'est-à-dire l'émergence, le déploiement et l'échange d'idées nouvelles. En effet, Vardouli affirme que « les réalisations produites grâce aux outils numériques impliquent un excédent d'information et de code – une situation qui n'est pas sans corollaires, ni sur le plan de la paternité et de la main d'œuvre, ni sur le plan éthico-politique. En plus de cet excédent productif, les outils numériques créent aussi des sujets qui répondent aux manières de voir, de penser et de faire, déterminées par l'interface » (Bressani *et al.*, 2019, p. 118). Ces outils numériques impactent également l'architecture comme le montrent Latour (2006) et Carpo (2017; Bressani *et al.*, 2019), qui reconnaissent une influence de l'outil sur le langage architectural développé. Citons à titre d'exemple l'apparition forte des porte-à-faux depuis l'avènement des outils de modélisation par extrusion de formes tels que SketchUp, comme observé par Eric Le Coguiec dans ses recherches (publication à venir).

Le retour sur investissement du BIM est également questionné (LIST, 2015). Si la diffusion et l'implémentation du BIM est grande, un retard est par contre observé dans son adoption, c'est-à-dire dans l'intégration du BIM dans les pratiques (Hochscheid, 2018).

Hochscheid (2018) précise que l'adoption d'une nouvelle technologie dépend de plusieurs facteurs : généraux (liés aux personnes, au contexte, aux solutions proposées et à la communication sur celles-ci) mais aussi technologiques (liés au secteur, à l'économie, à la culture ou encore à la formation et la technique). Dans le cas du BIM, ce retard d'adoption est expliqué par l'écart entre le contexte et les objectifs architecturaux et de la construction. Cette nouvelle technologie est jugée non adaptée à l'architecture par les acteurs en raison de la faible qualité graphique et de la rigidité de l'outil. Il est par ailleurs introduit dans les agences par de jeunes architectes, sur des versions non officielles du logiciel, pour des raisons de coût d'investissement, et il apparaît comme compliqué à employer (Hochscheid, 2018). Plusieurs auteurs corroborent ces limites à l'implémentation (Li *et al.*, 2019; Tan *et al.*, 2019).

D'autres auteurs constatent également que les usages sur le terrain divergent de ceux promis.

Rahhal (*et al.*, 2020) observe que la majorité des informations échangées entre les acteurs concernent leur coordination et des questions de compréhension et que peu d'informations échangées portent directement sur la modélisation de la maquette BIM, leur tâche propre. Elle constate également que la maquette BIM n'est pas, contrairement aux principes initiaux, le seul support d'échange d'informations. Celle-ci est complétée par de nombreux documents comme des schémas, des dessins de perspective, des textes ou des tableaux. La communication seule, sans le support de la maquette, est également employée pour véhiculer de l'information. Calixte (2019b, 2021) corrobore ces conclusions. Elle observe l'usage en agence d'espace d'affichage complémentaire pour le partage des travaux individuels et pour garder trace de l'historique du projet. Elle explique ces phénomènes notamment par le manque de maniabilité et d'opérabilité des maquettes BIM. Les bâtiments modélisés étant complexes et comprenant une multitude d'informations, les maquettes s'en trouvent alourdies. Apparaît alors l'usage d'espaces de collaboration alternatifs utilisant des outils traditionnels (papier-crayon, ...) pour co-concevoir.

Le BIM impacte également la répartition des tâches et l'organisation des concepteurs (Guéneau, 2019). Pour Patrascu et Hémond (2019, p. 78), « le terme « collaboration » associé au BIM – préféré aux termes « coordination » et « coopération » – est (...) employé comme un attracteur sémantique, un “mot-valise” connoté positivement ». Calixte (2019b, 2021) observe que, sur terrain, les acteurs ne travaillent pas uniquement en collaboration² via les maquettes BIM mais conçoivent aussi en I-Space (au sens de Ben Rajeb (2012)³), c'est-à-dire individuellement, sur des parties distinctes de la maquette. Ces parties sont ensuite reliées les unes aux autres dans les maquettes lors de moments de We-Space, c'est-à-dire de travail dans un même espace mental collectif. Ces moments d'actualisation du projet et de mise en commun sont des moments de synchronisation cognitive des acteurs (Calixte *et al.*, 2019b; Calixte 2021). Les I-Space de chacun y sont enrichis des informations communes tandis que la maquette commune se voit complétée des différentes progressions individuelles. Cette substitution de la conception annoncée collaborative dans les méthodes BIM par des alternances de conception individuelle puis de synchronisation cognitive a lieu car la capacité actuelle des machines ne permet pas d'interagir en temps réel à plusieurs sur les maquettes. Il est plus facile pour les acteurs d'assembler régulièrement les parties individuelles (Calixte *et al.*, 2019b; Calixte 2021). La conception collaborative annoncée est donc plutôt, sur terrain, une conception distribuée.

2.5.5 Pistes d'amélioration du BIM

2.5.5.1 Etudes existantes visant l'amélioration du BIM

Pour nourrir cette révolution numérique et pour cerner les challenges de cette nouvelle technologie, de nombreuses études internationales ont été menées sur l'interopérabilité des objets du BIM ou encore sur la mise en œuvre technique du processus BIM (CEFRIO, 2011). Nous abordons ci-après quelques-unes de ces études, par ailleurs synthétisées par Naville et Ben Rajeb (2016).

² Pour rappel, nous dénommons ici « collaboration » les activités menées à plusieurs avec un partage des tâches et des buts (voir section 2.2.3).

³ Voir section 2.2.3, au chapitre 2.

A l'international, Staub-French (2011), dans son analyse au Canada, a observé l'implantation du BIM dans plusieurs contextes de métiers et de projets. Il a également étudié via des cas réels d'échelles variées quelles étaient les meilleures pratiques BIM sur terrain.

Une démarche concrète, proposée par un groupe de recherche de Penn State University est largement utilisée au sein des méthodes et outils développés (CIC, 2010). Cette approche permet d'identifier les objectifs BIM et la suite de tâches nécessaire pour les atteindre puis de définir et d'intégrer ces exigences à l'échelle du projet et en intégrant les différents acteurs (Naville & Ben Rajeb, 2016).

En Europe, plusieurs recherches visent à évaluer les pratiques BIM. Il y a notamment le développement de la méthode BIMetric (LIST, 2015; De Boissieu *et al.*, 2016; Abdirad, 2017), réalisée par plusieurs laboratoires du Luxembourg et de France et qui étudie le retour sur investissement de l'implémentation de ces processus et méthodes BIM dans des projets.

Selon Naville et Ben Rajeb (2016) et Lee et Borrmann (2020), de nombreux guides et standards ont été publiés à travers le monde comme le Statsbygg BIM manual de Norvège (en 2013), le Guide BIM de Singapour (en 2013), le PAS 1192 au Royaume Unis (en 2013), le Plan de Transition Numérique dans le Bâtiment élaboré en France (en 2016, puis 2017) ou encore The Guide to BIM en Belgique (datant de 2015 et mis à jour en 2018, toujours référence en 2021). Ces documents ont pour objectif de recommander une marche à suivre pour organiser un projet BIM via la définition des échanges entre les acteurs ou via la prescription d'exigences à atteindre.

Plus récemment, de nombreux guides sont élaborés comme un guide pratique pour le management des projets (Baldwin, 2019), un guide des standard BIM mondiaux (Ganah & Lea, 2021) ou encore

Par ailleurs, les transformations des pratiques architecturales liées au BIM sont étudiés dans la littérature. Comme résumé par De Boissieu (2020), plusieurs chercheurs documentent la transformation numérique des pratiques (Reis *et al.*, 2018), la diffusion de l'innovation dans les pratiques d'agences (Hochscheid & Halin, 2018) et plus particulièrement, l'évaluation de la maturité des pratiques (Abdirad, 2017; De Boissieu *et al.*, 2016), ou de leur adoption (Kassem & Succar, 2017; Hochscheid & Halin, 2018; Sacks, *et al.*, 2018; Charef *et al.*, 2019).

Si ces méthodes permettent de guider et standardiser l'utilisation des technologies BIM entre les différents acteurs de la construction, et si la littérature étudie les enjeux d'adoption et de diffusion du BIM, elles n'abordent pas la problématique du changement des pratiques internes au sein des phases en amont du processus de conception. Elles n'abordent pas non plus la question du basculement entre la conception imaginative et la conception productive, auquel nous nous référerons sous le terme de transition.

2.5.5.2 *Problématique générale de notre recherche*

Nous proposons donc, au travers de cette thèse, de traiter la question de la transition de la conception préliminaire architecturale vers le BIM, intégrant la démarche collaborative, contextualisée et orientée vers les concepteurs. Cette démarche se distingue du stade applicatif brut du BIM, largement étudié par ailleurs, en se plaçant en amont de la transition, au moment du passage au modèle numérique.

Notre recherche vise l'étude de l'implémentation technologique des artefacts de conception au sein des processus collaboratifs. Concrètement, elle cherche à comprendre comment instrumenter numériquement les phases amonts du processus de conception architecturale pour en collecter

automatiquement les informations utiles et nécessaires aux activités d'idéation (traduites dans les croquis, plans, maquettes, annotations et autres spécifications graphiques ou textuelles). Grâce à cette articulation, celles-ci seront alors aptes à être par la suite implémentées à la dynamique BIM.

La conception consiste, comme nous l'avons vu, à spécifier un artefact apporté en réponse à un problème donné. Cet artefact mental est souvent externalisé en représentations tangibles réalisées au moyen d'instruments. La spécificité de l'architecture réside dans l'absence de solution optimale face aux multiples contraintes interdépendantes et mal définies et dans l'absence de méthode de résolution prescrite.

Nous considérons cette activité de conception comme un affinement progressif de la solution au fur et à mesure des représentations construites et transformées. Le concepteur est en conversation avec ces différentes représentations. L'activité fait également elle-même l'objet de réflexions et est grandement influencée par son contexte. Elle est réalisée en réseau avec des Moyens de conception, c'est-à-dire des instruments adjoints de schèmes d'usage et de ressources (im-)matérielles, eux-même acteurs de cette activité.

Dans cette thèse, la **conception** est donc vue comme **une activité de conversation réflexive située et de construction de représentations instrumentée où l'objet médiateur est également acteur.**

Ces activités de conception architecturale s'organisent en un processus à quatre phases : l'idéation, faisant émerger les idées et contraintes principales ; le design préliminaire (ou esquisse), où les idées sont étudiées, modifiées et complétées ; le projet initial (ou avant-projet sommaire), résolvant géométriquement les solutions et évaluant leurs performances et finalement la production (ou avant-projet détaillé), caractérisant de manière exhaustive l'artefact dans des documents formalisés.

Dans ce chapitre, nous avons également vu que BIM, bien qu'il semble prometteur pour répondre aux enjeux de performance écologique dans les phases de construction, est difficilement adapté aux phases d'idéation, qu'il impacte pourtant en remontant en amont du processus de conception. Son usage diffère en outre sur terrain, comme l'observent certains auteurs qui constatent (1) l'utilisation de représentations complémentaires en plus de la maquette BIM censée regrouper l'ensemble de l'information et (2) des étapes de conception individuelle synchronisées ensuite cognitivement.

***D**esign is, as we have seen, the specification of an artefact in response to a given problem. This mental artefact is often externalised into tangible representations realised using instruments. The specificity of architecture lies in the absence of an optimal solution when faced with multiple interdependent and ill-defined constraints and in the absence of a prescribed method of resolution.*

We see this design activity as a progressive refinement of the solution as representations are constructed and transformed. The designer is in conversation with these different representations. The activity itself is also subject to reflection and is greatly influenced by its context. It is carried out in a network with design means, i.e. instruments associated with usage schemes and (im)material resources, which are themselves actors in this activity.

*In this thesis, **design** is thus seen as an **activity of situated reflexive conversation and construction of instrumented representations where the mediating object is also an actor.***

These architectural design activities are organised in a four-phase process: ideation, bringing out the main ideas and constraints; preliminary design (or sketch), where the ideas are studied, modified and completed; initial design (or preliminary design), geometrically solving the solutions and evaluating their performance and finally production (or detailed design), exhaustively characterising the artefact in formalised documents.

***I**n this chapter, we also have seen that BIM, although it seems promising to address the ecological performance issues in the construction phases, is not well suited to the ideation phases, which it does impact by going upstream in the design process. Its use also differs in practice, as observed by some authors who noted (1) the use of complementary representations in addition to the BIM model, which is supposed to include all the information, and (2) individual design steps that are then cognitively synchronized.*

Chapitre 3

Cadre conceptuel

Dans ce chapitre théorique, nous abordons les différents concepts mobilisés dans la suite de ce travail de recherche. Nous les déconstruisons et opérationnalisons de manière à permettre au lecteur d'être outillé pour comprendre les analyses menées par la suite. Nous plongeons ainsi dans l'activité de conception médiatisée avec les objets médiateurs et les représentations externes. Nous abordons ensuite les différentes stratégies d'assistance à la conception ainsi que les formes d'instrumentation mobilisables.

In this theoretical chapter, we will discuss the different concepts involved in the rest of this research. We will deconstruct and operationalize them in a way that will allow the reader to be equipped to understand the analyses carried out afterwards. We will thus dive into the mediatized design activity with mediator objects, and external representations. We will then discuss the different design assistance strategies and the forms of instrumentation that can be used.

3.1 Clefs d'analyse de l'activité de conception

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, la conception sera analysée au travers de sa progression dans les niveaux d'abstraction, de ses conversations réflexives et des transformations de ses représentations. Nous allons opérationnaliser dans ce point l'activité même de conception, au-delà du processus global et des modèles de conception que nous venons de voir au chapitre précédent. Trois pans de cette activité de conception sont particulièrement intéressants au vu du sujet de cette thèse : sa dimension médiatisée, les représentations externes et l'activité de mise au net.

3.1.1 L'activité médiatisée

Traiter de la transition idéation-BIM induit d'étudier les outils de conception. Dans cette section traitant de l'activité médiatisée, nous réintroduirons donc tout d'abord, en exprimant notre vision de ces différents termes et concepts, la notion d'activité puis nous ferons apparaître le rôle, bien connu de la littérature, de l'objet médiateur dans cette activité avant de mener une réflexion théorique sur les différences entre objet médiateur, outil, instrument et média. Nous questionnerons également la nature de cet élément médiateur : est-il objet ou acteur, de la conception ? Pour terminer, nous introduirons une notion clef de cette recherche, construite en regard des théories précitées : le Moyen de conception.

3.1.1.1 Théorie de l'Activité et de l'instrumentation

Commençons par réintroduire la notion d'activité. Le concept fondateur en recherche lorsque nous abordons la notion d'activité est la *Théorie de l'Activité*, développée par Vygostky (1978) et Leont'ev (1974). Pour rappel, cette théorie est structurée autour de trois notions hiérarchisées : l'*activité*, l'*action* et l'*opération*. Leont'ev (1981, in Calixte, 2021) précise que l'*activité* est la visée du travail, un but conscient et précis ; que les *actions* sont engendrées par l'activité pour cerner la problématique et les ressources humaines ou matérielles devant être mobilisées ; et finalement que les *opérations* correspondent à la manière dont sont réalisées les actions.

Leplat (1997) ajoute à cette théorie une notion supplémentaire intéressante. Selon lui, toute activité fait partie intégrante d'une pyramide, schématisée ci-après, entre 3 éléments en interaction : l'*activité*, la *tâche* et le *sujet*. Il positionne l'activité au sommet de cette pyramide car il la considère comme l'élément le plus complexe et parce qu'elle définit la tâche et le sujet, même si ceux-ci l'influencent également. Calixte (2021) précise que, dans cette théorie, l'*activité* est définie à la manière de Vygostky et Leont'ev ; la *tâche* est le but à atteindre et qui permet de produire, de contrôler ou d'organiser ; et que le *sujet* peut être appréhendé comme un individu, dont les compétences sociales sont étudiées, ou comme un acteur, dont ce sont alors les compétences opérationnelles qui sont considérées. Dans notre recherche, nous nous attacherons à considérer principalement les individus comme des acteurs de la tâche de conception.

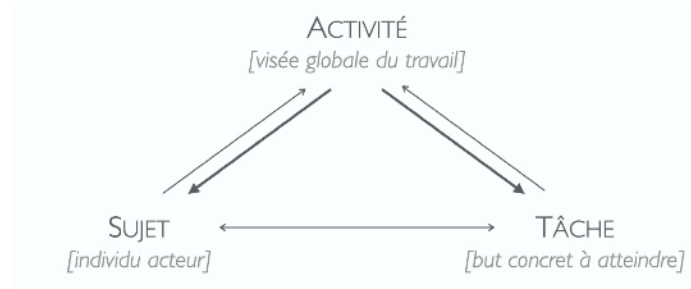


Figure 13. Pyramide de l'activité selon Leplat (1997).

Pour être réalisée, l'activité est médiatisée par un ensemble d'artefacts (Bobillier Chaumon & Clot, 2016) ou d'objets médiateurs (Engeström, 1987) dans un triangle de relations d'interaction comme illustré ci-après.

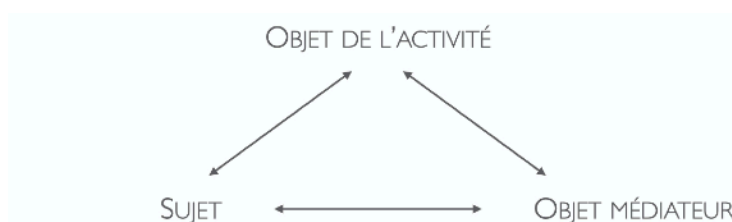


Figure 14. Triangle de l'activité médiatisée.

En conception architecturale, cet objet médiateur est l'objet (crayon, ordinateur, logiciel, etc.) qui est lié à la représentation (dessin, maquette numérique, etc.) à créer (figure 15). Il agit pour rappel comme intermédiaire entre le designer et lui-même ou entre le designer et les autres (Elsen, 2011). Le nouveau concept d'objets médiateurs étend la notion d'artefacts, précédemment utilisée pour désigner les objets de production, aux représentations externes (Elsen et al., 2010). Les termes d'objet intermédiaire (Vinck & Jeantet, 1995; Boujut & Blanco, 2003) et d'objet frontière (Star, 1989) désignent également ce rôle d'objet médiateur de la communication entre concepteur et tâche. Notons que ces objets ont, selon Béguin (2004), une dimension physique, i.e. le type d'objet tangible (papier, crayon, ordinateur) mais aussi une dimension symbolique, i.e. l'essence de l'objet (l'écriture pour un livre par exemple).

Parallèlement, la théorie de l'*approche instrumentale*, élaborée par Rabardel et Béguin (2000), apporte la notion d'*instrument* pour désigner un artefact associé à un schème d'usage, spécifique à l'acteur (figure 15). Ils définissent par instrumentation l'application d'un schème d'usage différent de celui pour lequel l'outil a été conçu (d'autres auteurs parlent de détournement, et nous préférons ce terme plus explicite), par instrumentalisation l'intégration de ces nouveaux usages aux fonctions de l'outil, et par champ d'instrumentation la structure cognitive anticipant le choix d'outil et de schème. Cependant, la théorie de Rabardel exclut certains usages bien qu'ils soient observés dans les pratiques, comme les préférences personnelles d'instrument ou l'impact de la coordination d'équipe (Calixte, Baudoux, et al., 2019a). Néanmoins, les notions d'artefact et de schème d'usage qu'il introduit constituent des clefs de compréhension précieuses des activités médiatisées.

D'autre part, nous observons que l'utilisation de logiciels de modélisation ont une part de plus en plus importante dans le processus de conception. Ainsi, Calixte (et al., 2019a; 2021) fait émerger le terme d'outil qui désigne un artefact ou un ensemble d'artefacts employés pour la réalisation d'une action. Ils peuvent être physiques ou numériques et comprennent des codes propres à

l'activité. Elle apporte également la notion de ressources en complément à l'approche instrumentale. Cette notion englobe les éléments de l'environnement de travail utilisables par l'acteur pour mener sa tâche et sont à différencier du contexte de l'activité. Le contexte de l'activité, lui, est l'ensemble des éléments organisationnels (hiérarchie, modes de fonctionnement de l'entreprise), spatiaux (locaux, matériel) et numériques (serveurs, logiciels) qui forment le cadre imposé de l'activité. Les ressources désignent tout élément de l'environnement de travail, qu'il soit matériel, comme les outils à disposition, propre au sujet individuellement, comme ses compétences ou aptitudes personnelles, ou encore apporté par le collectif, comme une méthode de travail de l'équipe (Calixte et al., 2019a).

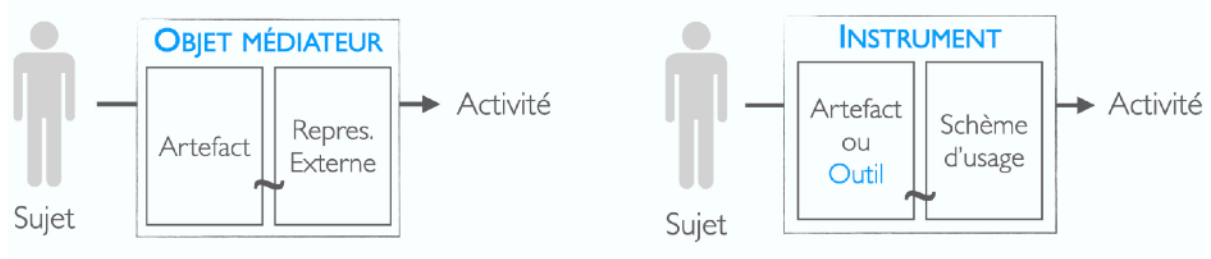


Figure 15. Notions d'objet médiateur et d'instrument, basé sur Engeström (1987), Rabardel & Beguin (2000).

3.1.1.2 Sociologie des objets

Le rôle d'objet médiateur, qu'il soit appelé artefact, outil ou instrument, prend une place importante dans l'activité de conception. Afin de répondre à notre questionnement sur la nature de cet objet, nous convoquons la sociologie des objets avec la théorie de l'acteur-réseau de Latour, la notion d'agentivité des objets de Queré et les apports de Simondon.

Latour (2006) caractérise les objets de conception en trois catégories :

- les objets *acteurs*, qui viennent, au même titre que le sujet, modifier la situation donnée ;
- les objets *médiateurs*, qui transforment les éléments qu'ils portent ou leur sens;
- et les objets *intermédiaires*, qui véhiculent le sens des éléments sans le transformer.

Cet auteur précise que le rôle d'objet *médiateur* n'est finalement visible que par moment. La plupart du temps les objets modifient l'activité de conception et sont donc objets acteurs. Latour et Yaneva expliquent : « les centaines de maquettes et de dessins forment plutôt une matière première artistique qui stimule l'imagination tactile, surprend le créateur au lieu de lui obéir passivement et aide les architectes à fixer des idées inconnues, à mieux comprendre le bâtiment à venir et à formuler des alternatives, des options nouvelles » (Latour & Yavena, 2008, p. 5).

Cette notion d'objet acteur est théorisée dans la théorie du *faire faire* (« *make make* ») de Latour (1995, in Yates, 2002). Latour (1995, in Yates, 2002) ne fait plus de distinction entre le(s) sujet(s) et le(s) objet(s). Dans cette théorie, tous les acteurs et les objets sont impliqués dans l'action de « faire » car les choses que nous faisons nous font « faire » également. L'activité est plutôt considérée comme un chainage de fabrication reliant des entités humaines ou non-humaines, au lieu de parler d'état de l'objet antérieur ou postérieur à l'action. Queré appuie cette vision de l'activité en confirmant que les objets modifient le déroulement de l'action. Ils sont donc bien des acteurs, ce qu'il théorise dans l'*agentivité des objets*, qui peut se traduire par le statut d'agent ou la capacité d'action que possèdent les objets (Queré, 2015).

Nous remarquons également que, dans les recherches menées sur les objets médiateurs en conception architecturale (Elsen, 2011 ; Safin, 2011 ; Calixte, 2021), les objets dits médiateurs prennent effectivement un rôle d'acteur en stimulant l'imagination et les phénomènes de redécouverte et en aidant à fixer les idées et supporter la compréhension du projet, comme l'affirment Latour et Yavena (2008). Il existe néanmoins une distinction, à notre sens, entre objet actant et acteur humain. En effet, les objets actants tels que décrits par Latour manquent de matérialité (Queré, 2015). Le fait que Latour ne les considère pas comme des éléments composant le processus les rends inertes, inanimés (Ingold, 2012 *in Queré, 2015*).

Queré dit que pour « Gilbert Simondon : il y a genèse (différenciée) des objets, et cette genèse est une affaire de prise de forme à travers une série d'opérations réparties entre les agents et les objets. La forme n'est pas donnée d'avance ; elle émerge dans une articulation d'opérations de différentes natures » (Queré, 2015, p. 5). Pour Simondon (1989 *in Queré, 2015*), le sujet prépare donc la médiation qui s'accomplit ensuite d'elle-même. Notons que l'agentivité des objets est quelque chose qui se décide. Ce n'est pas une nature continue et subie. Nous considérons pour notre part que l'action résulte de la préparation humaine et de la médiation de l'objet qui prend un rôle d'acteur.

En synthèse, de nombreux chercheurs s'accordent à dire que les objets et les actions sont alimentés par les pensées et que les pensées sont, à leur tour, alimentées par l'action de faire (Descola, 2013). Ces nouvelles relations entre objets et idées/matérialité ou entre agents humains et agents non-humains rouvrent la définition de nos outils de conception. Précisons que notre thèse ne porte pas sur la sociologie pragmatique mais que cette sociologie des objets de Simondon et Latour a impacté notre vision de l'objet médiateur et nous a amené à être attentifs à ce rôle actant, à cette influence, des objets. C'est pourquoi nous proposons dans la section ci-après une définition différente. Ainsi, nous ne convoquerons pas directement ces notions et définitions de l'agentivité des objets dans nos grilles d'observations des activités de conception mais elles ont directement alimenté la construction de notre nouvelle notion théorique du Moyen de conception (détaillée ci-après).

Nous terminerons juste cette section sur la sociologie des objets par cet extrait de Simondon traduisant toute la complexité de la question de la nature des objets.

« Ce déphasage de la médiation en caractères figuraux et caractères de fond traduit l'apparition d'une distance entre l'homme et le monde ; la médiation elle-même, au lieu d'être une simple structuration de l'univers, prend une certaine densité ; elle s'objective dans la technique et se subjective dans la religion, faisant apparaître dans l'objet technique le premier objet et dans la divinité le premier sujet, alors qu'il n'y avait auparavant qu'une unité du vivant et de son milieu : l'objectivité et la subjectivité apparaissent entre le vivant et son milieu, entre l'homme et le monde, à un moment où le monde n'a pas encore un complet statut d'objet ni l'homme un complet statut de sujet » (Simondon, 1989, p. 168) Cet extrait met en évidence, en d'autres termes que précédemment, à la fois la différence de nature entre les objets (médiateurs) et les sujets (concepteurs), qui ne sont tout de même pas identiques en tous points, mais également le flou de leur statut : ils ne sont respectivement ni pleinement objets (car en partie agents modificateurs, et donc acteurs, du processus), ni pleinement sujets (car en partie dirigés par leurs outils).

3.1.1.3 Développement de la nouvelle notion du Moyen de conception

Il reste donc à notre sens un manquement dans les différentes notions qualifiant jusque-là l'activité médiatisée et les objets médiateurs. En effet, c'est souvent l'objet en lui-même, et quelque peu son usage grâce à Rabardel, qui est théorisé, renforçant la perception de passivité de l'objet médiateur dans l'activité de conception. Or, comme nous venons de le voir, il est réellement acteur (ou objet actant) de cette conception.

Nous désirons dans notre recherche analyser les actions mises en place pour concevoir et produire les représentations du projet, au-delà des objets et outils et au-delà des représentations en elle-même. Nous avons donc fait une première tentative de définition d'un concept complémentaire à ceux existant au travers du Moyen de conception, dans sa première définition (Baudoux *et al.*, 2019). Dans celle-ci, nous désignons par Moyen de conception, l'action instrumentée mise en oeuvre pour concevoir, *i.e.* structurer le problème, générer ou évaluer une solution. Cette première définition permet de nuancer et distinguer l'action réalisée de la représentation graphique produite ou de l'outil employé. A titre d'exemple, un concepteur peut employer un logiciel de modélisation 3D afin de dessiner un plan, créer la volumétrie ou encore simuler des ombres portées. En sens inverse, avec le modèle 3D réalisé sur le logiciel, le concepteur peut en extraire une perspective sur support 2D, e.g. une impression ou une capture d'écran, comme il peut naviguer en immersion dans le modèle. Nous différencions donc l'action cognitive ou physique permettant de concevoir (*i.e.* le *moyen*), et la représentation externe de l'artefact conçu, même si ces deux éléments s'influencent mutuellement.

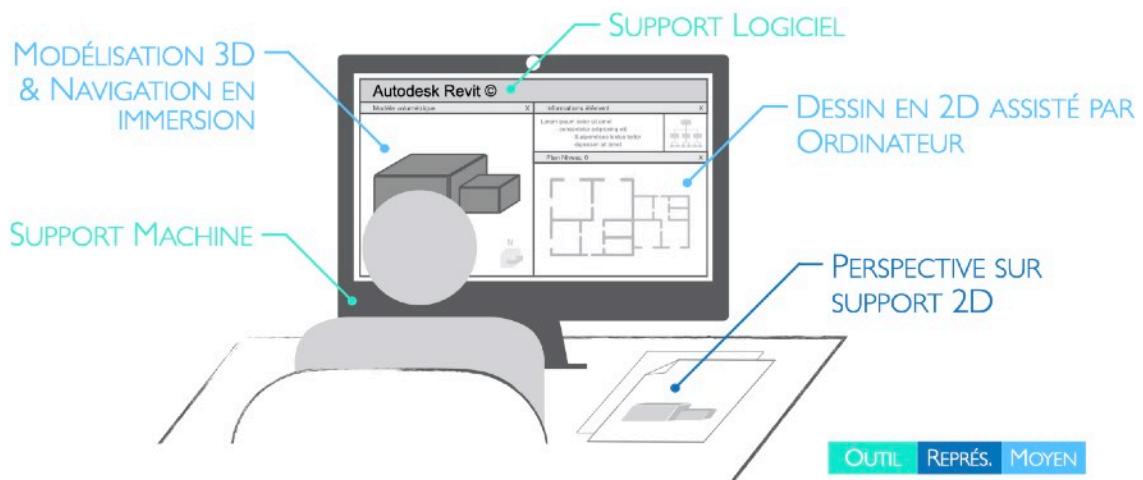


Figure 16. Schéma illustratif de la multiplicité des outils, représentations produites et moyens.

Nous formalisons, avec la chercheuse Calixte, une théorisation de cette notion de moyen de conception (Calixte, Baudoux, Ben Rajeb & Leclercq, 2019a). Cette théorisation s'ancre dans la notion d'instrument et le raisonnement de Rabardel, associant pour rappel un schème d'usage à un artefact, auxquels nous intégrons la notion de ressource issue des réflexions théoriques et des observations en agence menées par Calixte (2021). Le terme *Moyen* désigne alors l'ensemble des ressources associées au schème d'usage pour réaliser une action. (Calixte, Baudoux, Ben Rajeb & Leclercq, 2019a).

En reprenant la structure de l'objet médiateur associant artefact et représentation, nous désignons dans cette thèse par *média* l'association du moyen de conception et de la représentation externe produite.

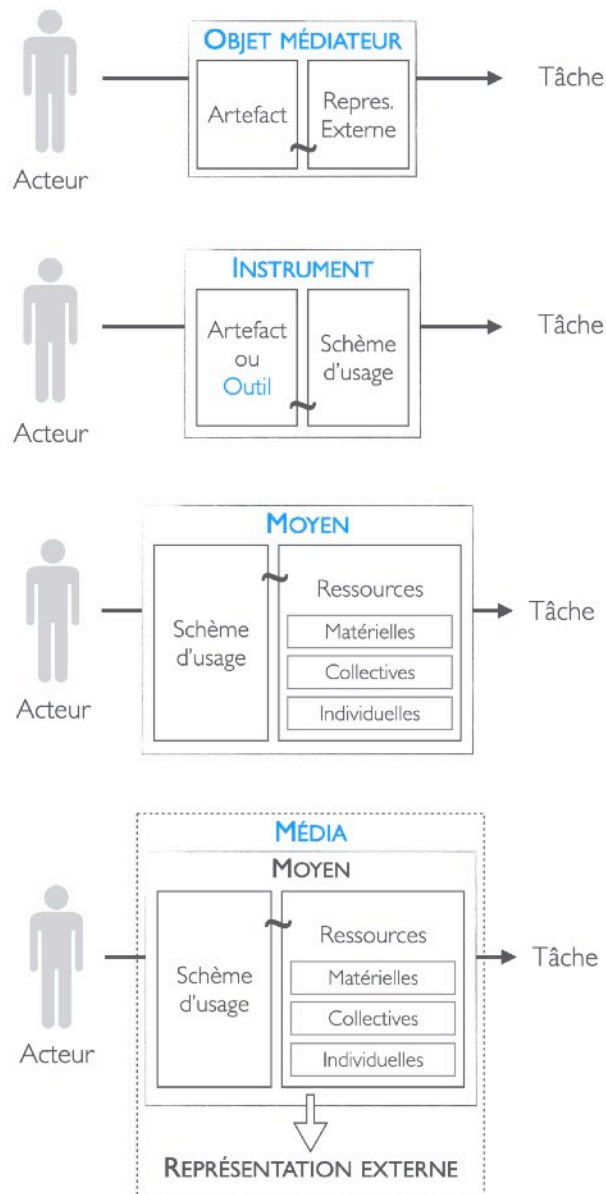


Figure 17. Notions d'objet médiateur, d'instrument, de Moyen, basé respectivement sur Engeström (1987), Rabardel & Beguin (2000) et Calixte, Baudoux, Ben Rajeb & Leclercq (2019a), ainsi que celle de média.

Nous développons également une classification de ces moyens de conceptions. Pour ce faire, nous nous nourrissons des réflexions d'Elsen (2011) sur les différents objets médiateurs et leurs rôles dans la conception ainsi que des types d'activité de conception décrits par Safin (2011).

Nous nous inspirons en outre de la classification des médias de Self (*et al.*, 2009) synthétisée dans le tableau ci-après. Cette classification est réalisée autour de cinq caractéristiques structurantes : le niveau de détail, le niveau d'ambiguïté, la capacité de transformation, le niveau d'engagement et le mode de communication (Self *et al.*, 2009).

Table 2. Synthèse de la classification des médias en 11 typologies de Self (et al., 2009).

Type de conception	Classe d'outil	Pertinence pour les caractéristiques suivantes				
		Niveau de détail	Niveau ambiguïté	Capacité transfo.	Niveau engagmt	Modes commu.
Conception conceptuelle	Modèle numérique (3D print)	0	0	0	-	-
	Maquette physique	-	0	+	0	+
	Communication du concept	-	-	+	-	+
	Esquisse digitale	0	-	0	-	0
	Esquisse conventionnelle	0	-	+	0	+
Conception de développement	Modèle numérique	+	0	-	+	0
	Dessin conventionnel	-	0	0	0	0
	Dessin numérique	0	0	0	0	0
Conception détaillée	Simulation physique	0	+	0	+	0
	Simulation prototype	+	+	-	+	-
	CAO de pré-production	+	+	-	0	-

3.1.1.4 Développement d'une classification de ces Moyens de conception

Suite à ces éléments théoriques de description des objets méfiant la conception et à la définition de notre notion de *Moyen de conception*, nous proposons la classification de moyens de conception suivante (Baudoux et al., 2019 ; Baudoux & Leclercq, 2023a) :

- *L'image de référence*, pour toute conception par analogie vis-à-vis de représentations préexistantes. Le concepteur fait appel à une référence, à une représentation déjà existante, plus ou moins similaire à sa situation afin d'identifier une solution ou de valider une proposition. Cette représentation préexistante peut être l'image d'un objet, la photo d'un autre bâtiment d'un autre architecte, la représentation en tout ou partie d'un autre bâtiment conçu par l'acteur, des représentations précédentes de l'objet architectural, ...

- *Le dessin papier main*, c'est-à-dire la conception via une production graphique à la main sur support papier. Le concepteur produit, au moyen d'instruments graphiques traditionnels, une représentation de l'objet sur un support papier. Ces instruments graphiques peuvent être crayons, stylos, feutres, gommes, ... Par support papier, nous entendons tout support traditionnel non numérique, à savoir papier, calque ou autre support physique simple improvisé (serviette, dos d'enveloppe, ...).

- *Le dessin numérique main*, lorsque la production graphique à la main est réalisée sur support numérique. Le concepteur produit à main levée, grâce à un stylo numérique, une représentation de l'objet sur un support informatique. Ces supports comprennent tablette graphique, tableau interactif, ordinateur à écran tactile, ...

- La *DAO 2D*, pour toute conception via une production graphique bidimensionnelle assistée par ordinateur. Le concepteur produit, via l'utilisation d'un logiciel de Dessin Assisté par Ordinateur, une représentation 2D de l'objet. Ces logiciels de DAO peuvent être de type Autocad ou bien Archicad ou SketchUp en conception en plan.
- La *DAO 3D*, lorsque la conception est réalisée via une production graphique tridimensionnelle assistée par ordinateur. Le concepteur produit, via l'utilisation d'un modeleur géométrique, un modèle 3D numérique de l'objet. Ces logiciels de DAO peuvent être de type SketchUp ou Archicad en conception en volumétrie.
- La *maquette*, pour toute production d'un modèle tridimensionnel physique. Le concepteur réalise un modèle physique 3D de l'objet architectural au moyen de différents outils et matériaux (cutter, carton, bois, imprimante 3D, découpe laser, ...).
- La *CAO paramétrique*, pour toute conception paramétrique assistée par ordinateur. Le concepteur réalise un modèle numérique 2D ou 3D de l'objet via l'utilisation de paramètres et de fonctions. Il fera varier ou non ces paramètres afin de générer différentes solutions alternatives. Il s'agit d'une association de la DAO 2D/3D et du prototype.
- Le *prototype*, lorsque la conception se fait par simulations statiques ou dynamiques. Le concepteur réalise des simulations afin d'évaluer différentes solutions alternatives. Ces simulations peuvent être statiques (regarder l'ombre portée d'un bâtiment à l'instant t) ou dynamiques (regarder la course du soleil tout u long de la journée) et physiques (balader une lampe torche au-dessus d'une maquette) ou numériques (faire tourner une simulation d'ensoleillement dans un modèle numérique 3D du bâtiment).

Ces 8 typologies sont illustrées par des exemples concrets dans la figure ci-après.

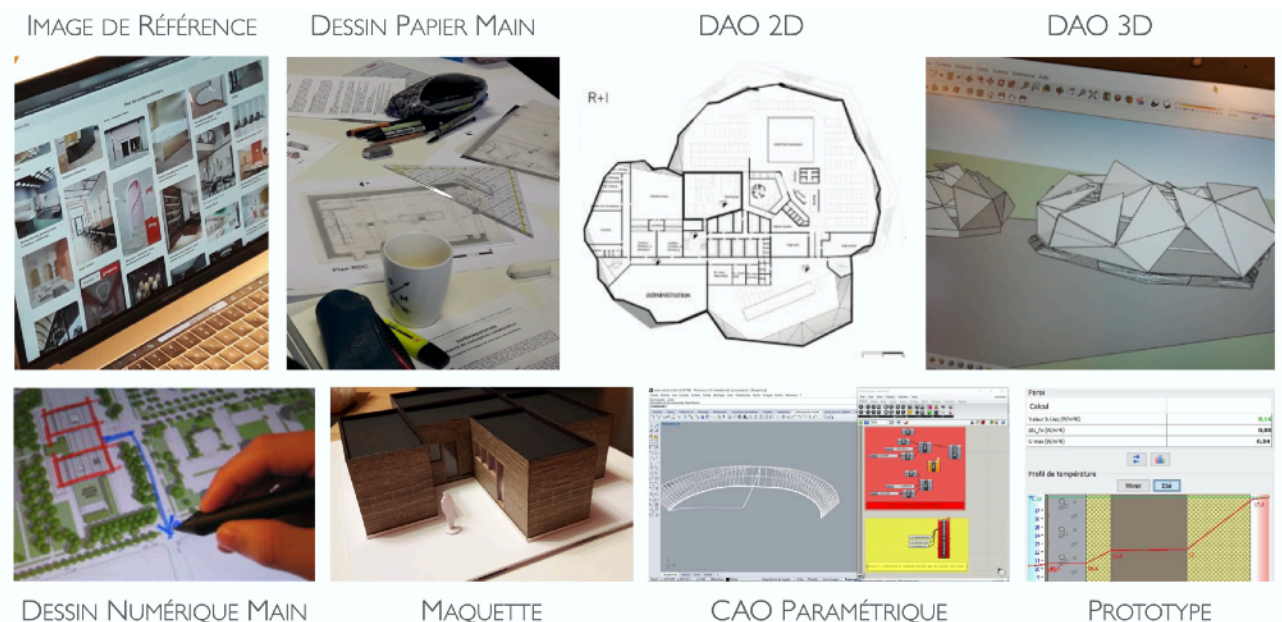


Figure 18. Exemples d'activités concrètes illustrant chacune des 8 typologies de moyen de conception (Baudoux et al., 2019).

3.1.2 Les représentations externes

Traiter de la transition idéation-BIM, c'est également se questionner sur le rôle des représentations de l'objet conçu et de ses transformations.

3.1.2.1 Représentations internes et externes

Rogalski écrit parfaitement qu'« en introduisant le terme et la notion d' *artefacts cognitifs* (Norman, 1991) et en analysant leur impact sur l'activité cognitive, il [Normann] a contribué à faire reconnaître dans l'approche cognitiviste le fait que les connaissances sont aussi externes. Certes, les représentations externes restent symboliques, mais la cognition est distribuée : cognition interne au sujet, et aussi cognition externe dans les représentations graphiques et plus généralement dans les artefacts cognitifs. » (Rogalski, 2004, p. 109). En effet, l'activité cognitive de conception est à la fois interne et externe : le concepteur élabore des représentations mentales, dites représentations internes, mais aussi des représentations physiques, dites représentations externes, du projet qu'il est en train de concevoir (Safin, 2011). Ces représentations externes sont pour rappel définies comme l'« ensemble des possibilités de figuration de l'information » (Safin, 2011, p. 35).

Descola renforce cela en ajoutant que, pour lui, « l'une des caractéristiques universelles de l'esprit humain (...) est la conscience d'une dualité entre les processus matériels (que j'appelle la physicalité) et les états mentaux (que j'appelle l'intériorité) » (librement traduit de Descola, 2010, p. 337).

3.1.2.2 Rôle cognitif des représentations

Nous considérons que ces représentations externes expriment l'état intermédiaire de l'objet et permettent d'évaluer les solutions (Darses *et al.*, 2004). Elles sont aussi utilisées comme support pour la communication. L'importance de ces modalités de représentation et d'expression autres que le verbal est largement reconnue en « cognitive design research » (Visser, 2010).

Ces bénéfices sont dûs à trois rôles cognitifs que jouent les représentations externes et sur lesquels nous souhaitons insister : la matérialisation de l'information, l'allègement de la charge mentale et la structuration du comportement, détaillés par Darses (2009), Kirsh (2010) et Safin (2011).

La **matérialisation de l'information** est fournie par les représentations car elles font figurer graphiquement les différentes informations sur des supports tangibles, rendant ces informations manipulables, persistantes et partageables. Il est ainsi plus facile pour le(s) concepteur(s) de reformuler le projet et de le réinterpréter pour générer de nouvelles solutions, allant même jusqu'à des phénomènes de redécouverte du projet aboutissant à de nouvelles idées et à l'exploration de nouvelles pistes. Les représentations externes favorisent également les mouvements de *see-transform-see*. Cette matérialisation facilite les modifications du projet, en permettant des modifications non-destructives, en assurant leur traçabilité, et en favorisant la comparaison (soit en comparant directement deux solutions évaluées soit par analogies avec d'autres projets). Finalement, la capacité même de matérialiser l'information est gage de cohérence de la solution. En effet, une solution indéfinie ou incohérente ne sera en effet pas dessinable ou nécessitera d'être définie et corrigée pour être dessinée.

L'**allègement de la charge mentale** résulte justement du fait que les informations sont matérialisées. Leur traitement devient perceptif donc plus rapide et plus efficace. Elles sont ainsi utilisables directement sans nécessiter une formulation orale explicite de la part de l'auteur ni une interprétation de la part des autres acteurs. Elles sont également manipulables sans solliciter la mémoire de travail.

Grâce à cette matérialisation des informations et à l'allègement de la charge mentale, les tâches cognitives ordinaires deviennent plus efficaces et des tâches cognitives complexes deviennent possibles. La cognition se déroulant là où elle est la moins coûteuse, elle a donc parfois lieu en externe (Kirsh, 2010).

Finalement, les représentations externes ont un rôle de **structuration du comportement** car la manière dont est présentée l'information conditionne le comportement cognitif du concepteur (Zhang, 1997). C'est ce que Zhang appelle le *déterminisme représentationnel*. Notons que cet effet varie selon l'individu et l'environnement.

Les représentations externes sont par là des objets de conception en tant que tels (Lecourtois, 2010). Le dessin, l'action de dessiner, est d'ailleurs, selon de nombreux auteurs, un support de ces conversations de conception entre acteur et représentation externe.

Les rôles cognitifs des représentations externes et leurs bénéfices associés sont à garder en mémoire quand nous étudierons dans les chapitres suivants la question de l'instrumentation de la conception.

3.1.2.3 Rôle de la trace graphique

Un point essentiel constitutif de ces représentations externes est la trace graphique. Nous la considérerons définie comme un ensemble de signes constituant la représentation d'un moment de conception (Lecourtois, 2010), comme une ressource produite par les concepteurs et regroupant les actions cognitives et gestuelles ainsi que les enjeux négociés autour du projet lors des (in)validations de solutions (Gregori *et al.*, 2011).

Le rôle de la trace graphique est multiple. Elle est, dans un premier temps, témoin de la conception et permet l'ancrage en mémoire du processus (Lecourtois, 2010). Dans un second temps, elle formalise une idée ou schématise un élément et est ainsi porteuse de signification pour le projet apportant un soutien à la parole (Elsen, 2011). Elle cristallise également les débats menés autour du projet et les évaluations concernant les différentes solutions proposées (Gregori *et al.* 2011, Gregori & Fixmer, 2013).

Elles sont donc considérées comme des objets intermédiaires, des outils de conception reliant le processus de conception passé à celui à décider pour la suite (Lecourtois, 2010).

3.1.2.4 Caractérisation des représentations

Selon Safin (2011), les représentations externes peuvent être caractérisées selon 7 dimensions. Elles peuvent être :

- *analogues*, ressemblantes à la réalité de l'objet, ou *symboliques*, abstraites et faisant appel à des symboles ;
- *visuelles*, ne sollicitant que la perception visuelle, ou *multimodales*, sollicitant plusieurs modes de perception ;

- *synthétiques*, exprimant un point de vue technique, ou *expressives*, simulant l'usage ou l'esthétique de l'objet ;
- *univoques* ou *ambiguës* ;
- *interactives*, répondant à l'action de l'observateur, ou *contemplatives*, invitant à seulement observer sans interaction ;
- *immersives*, plaçant l'observateur dans l'espace et lui donnant ainsi une expérience spatiale ou *émersives*, plaçant l'observateur en dehors de l'espace observé ;
- *2D*, *3D* ou *3D sur support 2D*, ce dernier désignant la représentation d'un élément 3D sur un support 2D comme dessin d'une perspective sur papier par exemple.

Notons que ces dimensions, à l'exception de la dernière, ne sont pas binaires mais présentent bien une continuité d'états possibles entre les deux extrêmes cités ici. Notons également qu'une même représentation peut être caractérisée différemment en fonction de son usage (Safin, 2011).

3.1.2.5 Proposition d'une classification des représentations

Sur base des réflexions d'Elsen (2011) sur les différents objets médiateurs et leurs rôles dans la conception ainsi qu'à partir de la classification précitée de Safin (2011), nous développons notre propre classification des représentations externes dans leur usage en support à la communication (Baudoux *et al.*, 2019 ; Baudoux & Leclercq, 2023a). Nous synthétisons cette catégorisation en 7 mots-clefs :

- *L'image de référence*, pour toute image, croquis ou photo non produit par les concepteurs. Le concepteur utilise en support un élément visuel extérieur à la conception, correspondant de près ou de loin à l'élément discuté.
- Le *texte* ou les *mot-clefs écrits*, c'est-à-dire des mots constituant à eux seuls une représentation indépendante. Le concepteur exprime sous forme de texte ou mot-clef écrit tout ou une partie du problème ou d'une solution. Cette représentation n'est pas directement liée à une autre contrairement à une annotation qui peut être textuelle.
- *L'annotation*, pour tout croquis ou note superposée à une représentation préexistante. Le concepteur annote, c'est-à-dire superpose, symbole, mot ou trait, sur une représentation précédente.
- Le *schéma* ou *croquis*, lorsque c'est une production symbolique simplifiée à la main ou sur ordinateur. Le concepteur utilise un dessin simple et symbolique représentant tout ou une partie d'une solution au problème de conception ou du problème lui-même.
- Le *plan* ou la *coupe*, pour toutes les productions graphiques 2D sous forme de plan ou coupe de l'objet. C'est un support élémentaire dans les pratiques architecturales.
- La *perspective 2D*, lorsque nous avons un point de vue fixe d'un objet tridimensionnel représenté sur un support bidimensionnel. Le concepteur utilise un support 2D montrant une perspective extérieure ou intérieure d'un objet 3D. Cela implique un point de vue fixe.
- *L'immersion 3D*, si la représentation est un modèle tridimensionnel immersif numérique ou physique. Le concepteur présente un parcours dynamique dans un modèle tridimensionnel numérique ou physique pré-élaboré. Cela permet plusieurs points de vue pour l'observateur qui est projeté dans l'espace observé.

Notons que ces typologies de représentations sont indépendantes de l'outil utilisé et de l'action réalisée pour les produire. Prenons l'exemple du logiciel Autocad. Le concepteur peut employer ce

logiciel afin de dessiner des plans du bâtiment, il a donc produit un "plan/coupe 2D", tout comme il peut dessiner le schéma formel du projet, il a donc produit un "schéma/croquis". Et inversement, ce schéma peut résulter d'une action de "Dessin papier main", d'une action de "Dessin numérique main", de "DAO 2D" ou encore de "DAO 3D ».

Ces 7 typologies sont illustrées par des exemples concrets dans la figure ci-après.

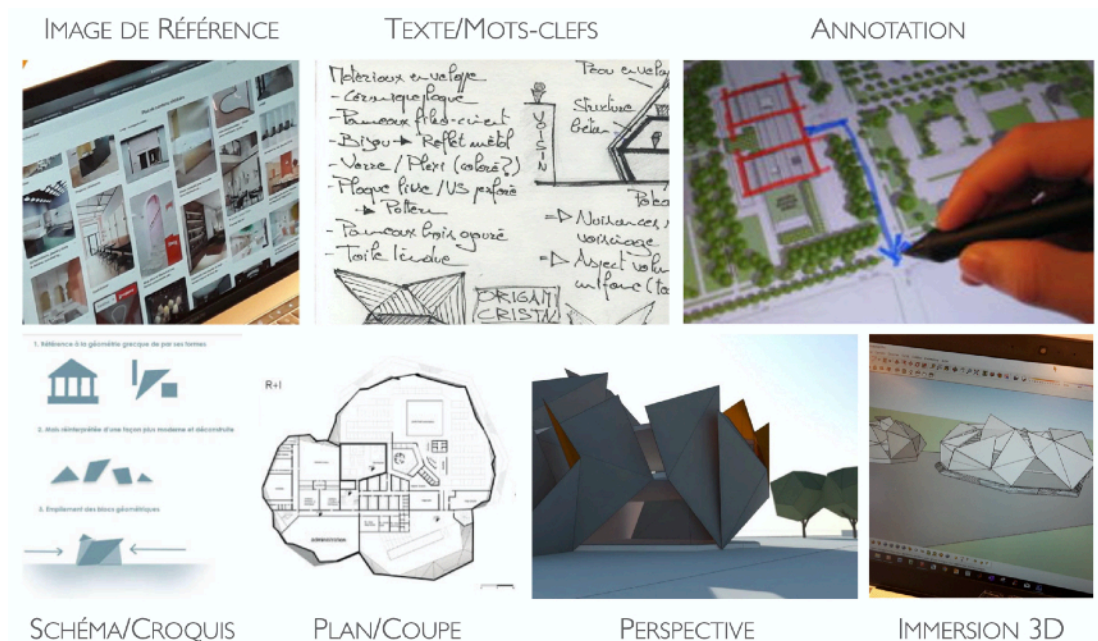


Figure 19. Exemples de documents concrets illustrant chacune des 7 typologies de représentation externe (Baudoux et al., 2019).

3.1.2.6 La mise au net

Dans nos études sur les activités de conception, nous serons amenés à traiter de la mise au net des représentations externes. Cette activité de mise au net est une activité permettant de passer des *esquisses conceptuelles* aux *croquis synthétiques*, deux notions théorisées par Elsen et Leclercq (2007) pour distinguer les différentes formes d'esquisses architecturales.

Les *esquisses conceptuelles* sont des représentations dessinées de l'artefact qui soutiennent la conception et plus précisément l'émergence des idées et l'exploration des solutions. C'est un outil de réflexion ouvert qui doit suivre le flux de pensées rapide. Pour cela, l'esquisse suit le principe d'économie en favorisant l'implicite. Seules les traces nécessaires sont dessinées et elles n'ont bien souvent dès lors de sens que pour l'acteur qui les a produites. De plus, cette lecture ambiguë permet l'exploration par ré-interprétation et la créativité.

Les *croquis synthétiques*, eux, sont des dessins, souvent plantaires et effectués à main levée, réalisés rapidement pour soutenir la communication. C'est une synthèse graphique de l'artefact en cours de conception. Les traces figurées sont celles à retenir au terme de l'exploration et de la validation. Il réduit donc l'incertitude puisqu'il valide une option de solution et qu'il précise explicitement les différentes informations. Il est à noter que ces informations peuvent rester de l'ordre des intentions, encore non résolues géométriquement. Les croquis synthétiques lèvent l'ambiguïté mais ne précisent ni ne détaillent pour autant l'artefact. Ces représentations sont également souvent annotées pour faire figurer les intentions difficilement dessinantes.

Par la suite, le projet validé et résolu fera l'objet de représentation au moyen de *plans nets*. Descriptions graphiques explicites et normées du projet, ce sont des documents structurés et précis, compréhensibles pour une personne extérieure caractérisant exhaustivement l'artefact conçu

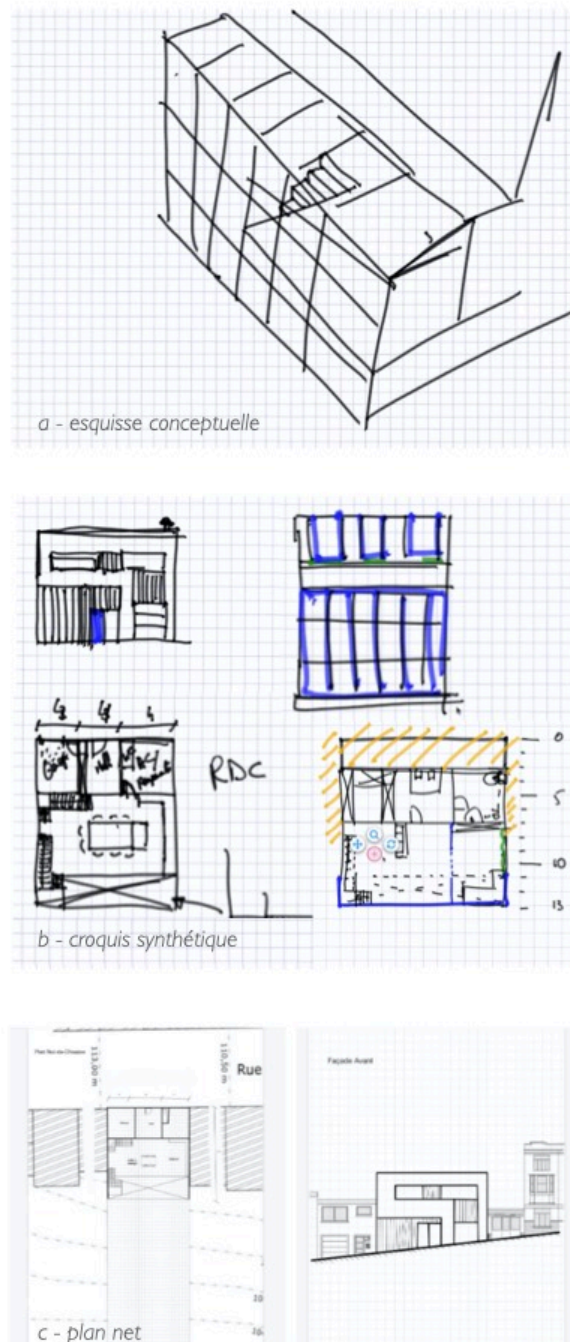


Figure 20. Progression pour un projet fictif entre esquisse conceptuelle, croquis synthétique et plan net.

Etudiant cette transformation des esquisses conceptuelles en croquis synthétiques puis en plans nets, Safin relève quatre activités et rôles de la mise au net (Safin, Juchmes & Leclercq, 2008 ; Leclercq, Juchmes & Safin, 2014) :

- « une **simplification graphique** opère par réduction du nombre de traits, soit en choisissant un trait parmi plusieurs possibles, soit en ne recopiant pas dans la mise au net certains éléments

graphiques (hachures, annotations etc.) Cette opération permet de réduire le flou de l'esquisse, mais ne s'accompagne pas nécessairement d'une réduction de l'imprécision.

- une **réduction de l'imprécision** s'observe de manière très claire lors des mises au net à la règle qui s'accompagnent très souvent de vérifications dimensionnelles (largeur d'un couloir, surface d'un local, recul du bâtiment, etc.).

- une **réduction de l'ambiguïté** s'opère par une évolution du dessin vers des conventions graphiques partagées ou par l'explicitation du contenu par ajout de légendes ou de symboles.

- une **sélection d'une solution**. Sur les esquisses de brouillon, il n'est pas rare de voir coexister plusieurs solutions architecturales. La mise au net opère un choix parmi différents possibles présents dans l'esquisse de simulation. » (Leclercq, Juchmes & Safin, 2014, pp. 22-23).

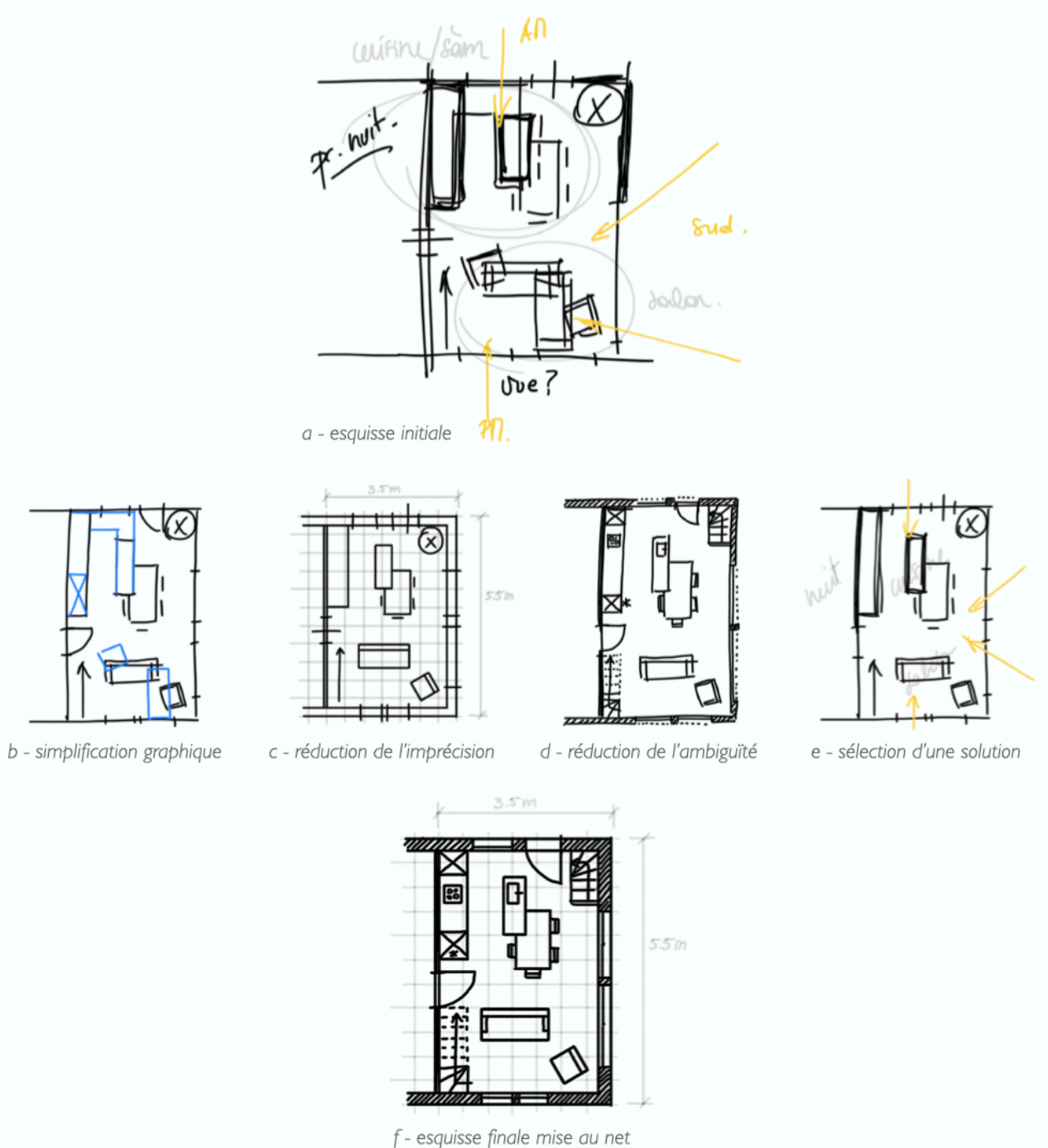


Figure 21. Exemple fictif d'illustration des traces résultant d'une activité de mise au net.

De manière à mieux pister les mises au net dans les activités de conception observées, il nous sera intéressant de nous référer à Safin (*et al.*, 2008) qui recense cinq activités concrètes, dans le cas de conception sur papier, témoignant de l'observation d'une mise au net par le concepteur :

- Choisir un tracé en repassant dessus de manière à l'épaissir, ce qui permet de figer certains éléments de manière à donner du contexte provisoire au reste des pistes en exploration ;
- Dessiner aux instruments, ce qui réduit l'imprécision et rapproche de la projection de l'objet figuré ;
- Préciser les mesures, constituant une vérification fonctionnelle des dimensions des éléments conçus ;
- Expliciter au moyen de légendes ou de mobilier typique, donnant ainsi des indications sur le fonctionnement des espaces conçus ;
- Utiliser la gomme, ce qui témoigne d'une correction de l'artefact.

Dans le cas d'usages de moyens de conception numériques, les quatre rôles de la mise au net restent identiques mais l'objectif général, la gestion de l'espace de représentation et la temporalité des actions sont modifiés (Safin, Juchmes & Leclercq, 2008). En effet, dans des environnements papier-crayon ou analogiques, la mise au net a lieu pour clarifier les représentations ou les caractéristiques du projet, tandis qu'en environnement numérique, le concepteur ne peut dessiner que au net pour pouvoir dialoguer avec la machine. En outre, Safin observe que sur papier, les dessins de net et de brouillon se superposent sur des calques différents et le concepteur passe facilement de l'un à l'autre, finissant par faire coexister brouillon et net, tandis qu'en numérique les nets et les brouillons restent dans des espaces de dessin distincts et surtout le concepteur termine la mise au net de l'ensemble des documents avant de seulement revenir aux dessins brouillons pour de nouvelles explorations.

3.2 Assistances à la conception

L'un des objectifs de cette thèse étant d'améliorer la transition idéation-BIM, nous devons aborder, d'une part, les différentes stratégies d'assistance de cette conception, dégagées par les ergonomes et cognitivistes étudiant la conception et, d'autre part, les outils mis en place actuellement pour soutenir ces activités, que ce soit en aidant le dessin ou en aidant la conception. Nous terminerons en positionnant notre proposition d'assistance.

3.2.1 Stratégies d'assistance

Les stratégies d'assistance à la conception ont largement été documentées dans les années 1990-2000 selon l'angle de la psychologie cognitive ergonomique, via les travaux de Falzon (2004) et de Darses, Détienne et Visser (2001), et selon l'angle de la conception architecturale via la thèse de Safin (2011)

Ces auteurs identifient notamment quatre types fondamentaux d'assistances :

- l'assistance à la structuration du problème ;
- l'assistance à la génération des solutions ;
- l'assistance à l'évaluation des solutions ;
- l'assistance au suivi des décisions.

Pour chacune de ces stratégies d'assistance, nous synthétiserons en quelques mots les activités qu'elles tentent de résoudre avant d'aborder quelques exemples d'outils ou méthodes concrétisant cette forme d'aide. Cette synthèse se base sur un travail de recherche précédent (Baudoux, 2019).

Précisons que cette section ne constitue pas un état de l'art exhaustif des assistances à la conception. Les approches étant nombreuses et variées, nous présentons ici uniquement les axes principaux d'assistance ayant dessiné l'élaboration de notre recherche.

3.2.1.1 Assister la structuration du problème.

Dès la première étape de conception naît une possibilité d'assistance pour le concepteur, lorsque celui-ci structure le problème en définissant les contraintes et les usages auxquels doit répondre le futur artefact. Cette aide à la conception peut revêtir la forme de méthodes structurées d'analyses (Darses, Détienne & Visser, 2001). En effet, l'artéfact répond non seulement aux exigences extrinsèques, comme les normes et règlements, ou intrinsèques, comme les volontés du concepteur, mais également aux besoins des différents utilisateurs ainsi qu'aux besoins de tous les environnements d'utilisation (Darses, Détienne & Visser, 2001). Parmi ces méthodes structurées d'analyse, retenons notamment la méthodologie d'analyse fonctionnelle qui propose d'établir une liste de fonctions de l'artéfact avant d'entamer le processus de conception ou encore la conception participative ou le *scénario-based design* (Liao, Chang & LAI, 2010), appelé aussi la fiction pour penser, qui permettent de mieux définir le problème.

Cependant, l'enjeu cette assistance à la structuration du problème est de respecter les caractéristiques spécifiques du processus de conception qui sont, entre autres, selon Safin (2011), le fait que la génération des solutions et leur évaluation sont conjointes et le principe d'itération entre « définition du problème » et « recherche de solution », et de respecter également les différents niveaux d'abstraction demandés lors des phases de conception allant des expressions de type intentions larges ou schémas aux expressions de type plan géométrisé caractérisé (Rasmussen et *al.*, 1994).

Or, la méthode d'analyse fonctionnelle, en clôturant l'analyse du problème avant la génération de solutions, ne respecte pas ces caractéristiques. Le concepteur ne peut procéder par itérations (Darses, Détienne & Visser, 2001). Par contre, la méthode du *scénario-based design* est en accord avec les spécificités de la conception architecturale et favorise l'explication des usages (Darses, Détienne & Visser, 2001).

Enfin, afin de mieux structurer l'espace-problème, il est également utile de varier les points de vue sur l'objet architectural (Safin, 2011). Ainsi, passer d'une représentation à l'autre permet de reconsidérer différemment le problème, ses contraintes et ses besoins. L'assistance à la structuration passe donc par une aide au changement.

3.2.1.2 Assister la génération des solutions

Un deuxième type d'assistance identifié est l'assistance à la génération de solutions.

Tout d'abord, comme nous venons de le préciser, aider à la structuration du problème est également une manière d'aider à la génération de solutions étant donné que de nouveaux points de vue sont dégagés, de nouvelles contraintes soulevées et de nouveaux leviers de créativité créés.

Pour Safin (2011), une aide pertinente à l'idéation serait d'aider au raisonnement analogique, en fournissant des sources d'inspiration, ou de créer de nouveaux modes de représentations. En

effet, ceux-ci peuvent ouvrir une approche plus originale avec un autre raisonnement et ainsi élargir les capacités de génération lorsque les modes de représentation traditionnels ne sont plus assez stimulants. Cependant, il est opportun que ces modes de représentation puissent soutenir autant les représentations d'un certain niveau de détails que celles relativement floues afin de pouvoir répondre aux exigences des différentes phases créatives.

De même, l'utilisation d'un support de travail offrant une égalité entre les concepteurs facilite l'intervention de chacun et l'échange d'idées et favorise la confrontation des points de vue. L'interaction entre les acteurs est ainsi accrue, augmentant la capacité de génération.

3.2.1.3 Assister l'évaluation des solutions

La première possibilité pour assister l'évaluation des solutions est de compléter les connaissances évaluatives du concepteur (Bonnardel, 1999). Cependant, pour rester attentif au respect du caractère ouvert du problème de conception, les solutions proposées au concepteur ne peuvent être prédéfinies, les solutions architecturales étant rarement transposables d'un problème à l'autre, mais doivent plutôt revêtir la forme de ressources d'évaluation.

De manière similaire, l'approche multicritère, par le biais d'une grille d'évaluation objective construite selon les spécificités du problème, permet au concepteur d'établir une liste exhaustive de critères d'évaluation et l'invite à la pondération (Safin, 2011). Cette méthode épaulé ainsi le concepteur dans l'évaluation des solutions.

Une dernière possibilité d'assistance est d'offrir au concepteur, en l'aidant à créer des représentations complémentaires ou alternatives de l'objet architectural, la possibilité de redécouvrir ce dernier sous un autre angle et ainsi de formuler de nouvelles critiques ou de détecter des erreurs (Elsen, 2011 ; Safin, 2011).

3.2.1.4 Assister le suivi du processus de décision

Finalement, un suivi des décisions est important. Il y a une « nécessité de conserver et de tracer les raisons qui ont conduit à la validation ou au rejet d'une solution de conception, dans l'objectif de faciliter et de fiabiliser la réutilisation des solutions passées » et un « besoin de décrire le chemin parcouru entre l'énoncé d'un problème et le choix d'une solution par l'objectivation des pratiques des concepteurs » (Darses, Détienne & Visser, 2001, p. 17).

Cette nécessité est appuyée par Visser (1999) ayant observé des concepteurs cherchant à comprendre les raisons de choix de solutions antérieurement appliquées à un projet, en reconstituant la procédure de résolution. Ils ont alors pu transposer et adapter ces décisions au projet en cours.

Selon Darses, Détienne & Visser (2001), tracer, par la création d'une représentation, le raisonnement de conception ayant abouti à la réalisation de l'artefact est essentiel. Ils précisent que cette traçabilité permet de « structurer les problèmes de conception, maintenir une meilleure cohérence dans la prise de décision, conserver des traces des décisions, communiquer son contenu à d'autres personnes, conserver une trace chronologique du processus de conception, établir des conditions pour la réutilisation » (Ibidem, p. 17).

Des annotations sous forme de problème/question ou sous la forme d'argument sont une possibilité d'assister la traçabilité dans le suivi du processus de décision. Toutefois, ces méthodes codifiant le raisonnement exigent un effort particulier des concepteurs et se heurtent à la signification des termes employés. Martin et al. (2011) a, en effet, pu démontrer que le sens d'un

terme n'est pas constant au travers des projets ni même entre les concepteurs. De plus, selon ce même auteur, la pondération émise lors des évaluations varie considérablement d'un projet à l'autre, d'un concepteur à l'autre, et ce même pour un critère commun.

Il importe donc que les aides au suivi du processus de décision respectent le caractère polysémique des termes et la variation possible des pondérations.

3.2.1.5 Points d'entrée d'assistance de cette thèse

Dans le cadre de notre recherche, **nous nous focaliserons sur l'assistance à la génération des solutions, à leur évaluation et à la traçabilité** par instrumentation de la conception. Nous détaillerons par la suite notre proposition d'assistance. Parmi les stratégies d'assistances citées ci-dessus, plusieurs principes seront mobilisés comme :

- aider au raisonnement analogique pour stimuler la créativité, en fournissant des images d'inspiration ;
- présenter différents points de vues et représentations de l'artefact conçu, favorisant ainsi la redécouverte sous un autre angle et par là la détection d'erreurs, l'évaluation des solutions, la génération de nouvelles propositions plus satisfaisantes mais aussi, dans une certaine mesure, la structuration du problème et la reconnaissance des contraintes ;
- employer des outils que tous peuvent utiliser sur un même pied d'égalité (éviter le stylo unique qui ne reste que dans la main du leader ou le plan dont une position autour de la table rend plus facile la lecture, etc.) favorisant ainsi les interactions ;
- et conserver, dans une chronologie, les traces graphiques caractérisant l'artefact ainsi que des traces témoignant de validation ou d'invalidation des propositions.

3.2.2 Outils d'aide à la conception

Les stratégies d'assistances étant posées et notre recherche s'orientant vers une instrumentation de la conception, nous nous sommes intéressés aux outils déjà développés et employés pour concrétiser cette aide à la conception. Nous dressons ici succinctement le paysage de ces outils afin de cerner la forme d'instrumentation la plus pertinente dans notre cas de recherche.

3.2.2.1 Les outils de Dessin Assisté par Ordinateur

Pour assister le dessin, les domaines de la conception (mécanique, design industriel, architecture, etc.) se sont vus dotés de nouveaux outils numériques, appelés *outils de DAO*, pour *Dessin Assisté par Ordinateur*. Ils ont ensuite été complétés d'*outils de CAO*, pour *Conception Assistée par Ordinateur*. Notons qu'en anglais, un seul terme existe, regroupant ces deux notions sans distinction : *les outils CAD*, pour *Computer-Aided Design*.

Revenons tout d'abord brièvement sur l'histoire de la DAO/CAO afin de mieux comprendre l'émergence progressive de ces outils. Pour cela, nous nous basons sur les travaux très détaillés et riches de Carpo (2013, 2017), Picon (2010), Hochscheid (2018) et Gaudilliere (2022).

Picon (2010), dans son analyse historique de la culture numérique en architecture, établit que « les transformations qu'on observe aujourd'hui (...) sont aussi le produit d'un processus historique

beaucoup plus complexe et de plus longue haleine que la conversion récente des architectes au numérique. » (Picon, 2010, p. 9). En effet, pour Picon, certains chercheurs, souvent technophiles, voient le numérique comme une nouveauté radicale et soudainement apparue, tandis que d'autres, souvent philosophes, considèrent que les prémices du numérique résident déjà dans l'invention de l'écriture. Les historiens, desquels il se considère, se positionnent eux dans un juste milieu : considérant que le point de départ du numérique correspond à l'avènement de la nouvelle société de l'information, coïncidant avec la seconde révolution industrielle (19ème-20ème siècle), caractérisée par une forte croissance des productions et de leurs rendements. Il explique ce lien par l'ampleur générale des opérations de production des sociétés ayant créé le besoin de tracer cette large quantité d'informations nécessaires à l'organisation et au rendement de ces macro-structures. Le partage de l'information donne ensuite à celle-ci une portée sociale et fait de cet âge du traitement massif de données, le point d'émergence de cette société de l'information, elle-même à l'origine du développement des ordinateurs. Les implications architecturales de cette révolution sont alors faibles.

Mais Hochscheid (2018) rappelle que l'histoire des outils numériques de conception s'accélère à la sortie de la seconde guerre mondiale, avec la commercialisation concrète des premiers ordinateurs, alors encore réservés aux grandes entreprises de par leur coût. Peu de temps après, au début des années 60, les ancêtres des logiciels de DAO sont imaginés dans les laboratoires de recherche et rapidement, vers le milieu des années 60, ils arrivent dans l'industrie. Ces outils sont alors exclusivement de la modélisation 2D. Ce sont les secteurs aéronautiques et électriques qui développeront, au début des années 70, les premiers logiciels de modélisation 3D.

Au milieu des années 70, début des années 80, les ordinateurs deviennent moins encombrants et plus abordables. Leur commercialisation commence alors, et les logiciels, jusque là développés par les laboratoires de recherche ou les grandes industries sont maintenant développés par des sociétés d'édition. Apparaissent ainsi les logiciels AutoCAD, Allplan, ArchiCAD, Vectorworks et un peu plus tard Revit. Ce sont les logiciels édités, les softwares, qui sont maintenant la véritable infrastructure du numérique, et plus les machines, le hardware (Picon, 2010).

Le secteur de la construction étant composé de petites entreprises, contrairement à l'aéronautique ou l'automobile, capable avec leur taille de développer leurs propres outils, il a fallu attendre l'édition de logiciels par des sociétés indépendantes pour que ce secteur ait accès à une CAO spécialisée (Hochscheid, 2018). La CAO a la particularité de manipuler des objets 3D paramétrables comme des murs, des dalles, etc., alors que les outils jusque-là de DAO reprennent les composants du dessin à la main comme les traits, hachures, etc.

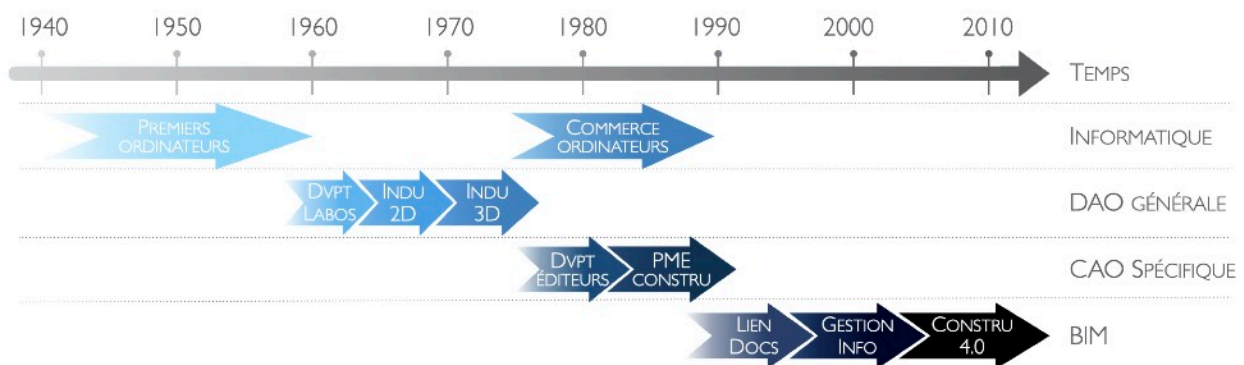


Figure 22. Synthèse chronologique des grandes phases d'émergence des outils numériques de conception pointées par Hochscheid (2018) et Picon (2010).

Reprécisons brièvement que les outils de CAO visent, dans leurs usages prévus, à représenter de manière détaillée et complète le produit de conception, typiquement en architecture les plans d'exécution, et à approcher le rendu réel de l'objet en 3D ainsi que son interaction avec son environnement, typiquement pour l'architecture la modélisation 3D illustrant l'intégration dans le contexte et les rendus de lumière et de texture.

A ces fins, leurs instructions programmatiques sont de permettre « :

- de dessiner et modéliser en plusieurs échelles et sur plusieurs calques virtuels, diverses formes (géométriques ou non), à partir le plus souvent d'une succession de points, de segments et de plans ;
- de modifier, copier et coller, faire des symétries, ajouter, corriger, translater, tourner, étirer, déformer, supprimer, projeter, de volumes, faces ou traits ;
- d'utiliser des codes de dessin pré-définis et standardisés ;
- de combiner certaines formes de base (connections de faces, booléens, ...) ;
- et, par extension, de transformer des typologies! : suppressions, coupes, intersections, ... ;
- d'utiliser des formes prédéfinies et paramétrables, ou d'en créer qui seront ajoutées à une bibliothèque de base ;
- de concevoir en respectant certaines proportions et cotes, ou au contraire de modéliser en échappant complètement à ces considérations dimensionnelles ;
- de communiquer aisément (...) et échanger de l'information » (Elsen, 2011, p. 69).

3.2.2.2 Autres outils existants

Au-delà de ces outils généraux de DAO existent plusieurs outils aidant la conception même du projet architectural. Nous retrouvons les outils de conception paramétrique, les prototypes et d'autres méthodes de conception. Gu et Ostwald (2012) répertorient également les environnements virtuels collaboratifs, la réalité virtuelle/augmentée, les environnements interactifs et le BIM. Nous cernons succinctement dans les pages suivantes leurs buts et caractéristiques.



Figure 23. Exemples d'autres outils numériques ou méthodologiques de conception développés en laboratoires.

Les **outils de conception ou de modélisation paramétrique** sont « 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. » (Stals, 2019, 78). Grâce à ce type d'outil, les concepteurs peuvent modéliser en fonctions de règles construites au préalable puis modifier leur modèle en modifiant ces règles ou leurs paramètres. Ils peuvent également essayer plusieurs alternatives basées sur la variation de ces paramètres.

Les **environnements virtuels collaboratifs** sont (Ben Rajeb, 2012) des dispositifs d'assistance à la construction d'un environnement de travail commun pour la conception collective, permettant d'élaborer et partager les idées à plusieurs. En situation de co-présence, cet environnement collaboratif apparaît spontanément dans les salles de réunion ou sur les plateaux de bureaux partagés. Mais dans les situations de collaboration à distance, il devient nécessaire d'assister cette construction de l'espace commun de travail. Plusieurs outils existent mais citons à titre d'exemple le Studio Digital Collaboratif. « Créé et développé au laboratoire Lucid-Ulg de l'Université de Liège, c'est un système qui vise à recréer virtuellement, à distance, les conditions de travail collaboratif en co-présence. (...) Le SDC combine à cet effet trois éléments (...) : 1- Une plateforme digitale numérique sous la forme d'une table graphique permettant d'une part la projection de plans et d'images en grand format (A0 par exemple) et d'autre part le dessin à main levée grâce à un stylet¹³ mis à disposition avec le système. 2- Un dispositif de visioconférence à travers un écran disposé face à l'utilisateur permettant de voir et d'écouter l'autre, dans le but d'assurer des réunions interactives et des communications à distance et en temps réel. 3- Cet ensemble est complété par un logiciel de dessin à main levée appelé Sketsha permettant d'importer des documents, de créer des calques, de produire des esquisses et des annotations et de les partager en temps réel et à distance. » (Ben Rajeb, 2012, p. 75).

En parallèle, de nombreux dispositifs d'**environnements interactifs** visent à outiller la communication des informations dans le cadre de présentations ou de sessions de conception collaborative. Ils font appel à des techniques variées de réalité augmentée, ou virtuelle ou à des fonctionnalités d'environnements virtuels collaboratifs, permettant de communiquer de manière interactive, en annotant en direct certains éléments appuyant le discours, en faisant défiler plusieurs variantes de solutions, etc. Citons à titre d'exemple le Hyve-3D, développé par Thomas Dorta. « Le Hyve-3D (...) est un dispositif qui se propose en tant qu'écosystème représentationnel immersif et intégral au sein duquel peuvent être réalisées à la fois les phases de l'idéation et de la communication d'un projet du design (...). Il consiste en un environnement de projection concave-sphérique qui repose sur le principe d'anamorphose des images par le biais d'un miroir, créant ainsi un espace immersif de RV dans lequel les designers peuvent dessiner à main levée à l'aide de stylets et de tablettes. » (Haj Ayed & Dorta, 2021, p. 29).

Nous venons de l'évoquer, les potentialités de la **réalité augmentée**, comme celles de la **réalité virtuelle**, peuvent être mises à profit pour outiller l'architecture, l'ingénierie et la construction (Noghabaei *et al.*, 2020). La réalité augmentée est définie comme l'ensemble des applications qui vérifient les trois propriétés suivantes : (1) la combinaison du réel et du virtuel, (2) l'interaction en temps réel, et (3) l'intégration du réel et du virtuel (Azuma, 1997). Elle se distingue des autres technologies et de la réalité virtuelle par l'environnement dans lequel l'utilisateur évolue, qui est réel et enrichi par l'ajout d'informations virtuelles (Azuma, 1997). En effet, la réalité virtuelle, elle, « construit un environnement totalement virtuel, dans lequel l'utilisateur est immergé

et interagit purement avec des éléments virtuels » (Gerckens, 2021, p. 11). Six formes d'application de la réalité augmentée/virtuelle se dégagent des pratiques des architectes adeptes : (1) comme une assistance à la communication, (2) en aide à la conception, (3) pour la révision des solutions proposées, (4) comme assistance à la construction pour les différentes tâches de planification, de sécurité et de chantier, (5) en soutien pour l'exploitation et la maintenance du bâtiment, et (6) pour la formation des architectes (Delgado *et al.*, 2020).

Finalement, les **prototypes** sont également largement utilisés dans le domaine de la conception architecturale. Les traditionnelles maquettes constituent déjà des prototypes physiques permettant de simuler des emprises paysagères ou volumétriques, des effets d'ombre portée ou d'ambiances lumineuses à l'intérieur du bâtiment, des rendus de matérialité, etc. Les prototypes numériques, quant à eux, sont couramment utilisés pour simuler des comportements de résistance mécaniques de la structure, de régulation thermique, d'ombre portée, etc.

Tout ces outils numériques sont cependant finalement peu utilisés dans les agences qui mobilisent presque exclusivement les outils classiques de dessin ou de DAO. Nous nous penchons donc plus en détail sur ces deux derniers.

3.2.2.3 *Avantages et limites du dessin par ordinateur ou à main levée*

Ces outils numériques de représentation présentent certains avantages et inconvénients par rapport au dessin traditionnel. Ces différents avantages et inconvénients sont résumés dans le tableau ci-après.

Bien que les outils et objets médiateurs en découlant aient souvent été étudiés, comme nous venons de le voir, selon une approche dichotomique esquisse-CAO (Cross, 1984; Tovey, 1989; Fish & Scrivener, 1990; Suwa & Tversky, 1996; Leclercq, 2005; Lebahar, 2007; Dorta, Lesage, & Pérez, 2009; Olsen et al., 2009, *in Elsen, 2011*⁴), nous tenons ici à étudier l'ensemble des médias de conception dans toute leur complémentarité et leurs usages combinés, en nous détachant de cette séparation en deux groupes étiquetés « intuitif, performant pour la créativité » et « détaillé, performant pour la production ».

⁴ Notons que l'étude du dessin de conception est moins courante ces dernières années. Le plus gros des recherches sur le sujet a été effectué dans les années 90 et début des années 2000. Néanmoins, leurs résultats sont toujours pertinents face aux activités cognitives de conception et aux pratiques communes dans les agences.

Table 3. Synthèse des avantages et inconvénients du dessin à main levée et du dessin assisté par ordinateur (Self, 2009 ; Elsen, 2011 ; Safin, 2011 ; Defays *et al.*, 2012 ; Le Coguiéc, 2012).

	Dessin à main levée (numérique ou papier)	Dessin Assisté par Ordinateur	
Avantages	<i>Naturel et intuitif</i>	<i>Accélère le détail du projet</i>	
	<i>Exploration facile et rapide des solutions</i>	<i>Pousse à la fixation des idées</i>	
	<i>Facilite l'appréhension du problème</i>	<i>Permet de détecter les erreurs</i>	
	<i>Facilite les redécouvertes</i>	<i>Supporte la complexité</i>	
	<i>Mélange de niveaux d'abstractions</i>	<i>Permet une visualisation 3D immersive</i>	
	<i>Ambiguïté d'économie et implicite</i>		
	<i>Traçabilité des essais</i>		
	<i>Non destructif</i>		
	<i>Constitue une mémoire externe opérationnelle</i>		
	<i>Soulage la charge cognitive</i>		
	<i>Assiste la communication</i>		
	<i>Aide à la construction d'un référentiel commun</i>		
Inconvénients	<i>Contenu lacunaire et implicite</i>	<i>Moins d'alternatives détaillées</i>	
	<i>Contenu peu clair et ambigu</i>	<i>Interface peu naturelle : souris, menus, ...</i>	
	<i>Instabilité : gommé, modifié, ...</i>	<i>Représente une charge cognitive</i>	
	<i>Econome : symboles, superpositions, ...</i>	<i>Apprentissage préalable nécessaire</i>	
	<i>Compréhension personnelle</i>	<i>Perte de données possible</i>	
	<i>Bas niveau de détail global</i>	<i>Repose sur un principe de déclaration précise, peu adapté à une créativité opportuniste</i>	
	<i>Représentation non dynamique</i>	<i>Pousse à la fixation des idées</i>	
	<i>Long et coûteux si exhaustif et détaillé</i>	<i>Représentation difficile des éléments non constructifs : ambiances, flux, usages, ...</i>	
		<i>Modifications beaucoup plus fréquentes et perfectionnisme chronophage</i>	

Dans le cadre de l'idéation, qui nous occupe ici, Self (2009) affirme que tous les outils, sauf les outils de CAO spécifiques à la pré-production, sont capables de supporter ces activités de génération et que le choix de l'outil à utiliser en fonction du degré de détail exigé incombe au concepteur. Il ajoute qu'en idéation, sont principalement nécessaires les outils capables de supporter la « *self-reflexion* » ainsi que les représentations ambiguës, et que, pour cela, les outils conventionnels d'esquisse resteront plus adaptés que leurs équivalents numériques. Cette faculté de support à la réflexion qu'ont les esquisses sera le principal axe retenu pour nos raisonnements futurs dans ce manuscrit de thèse.

D'autres auteurs rejoignent les propos de Self en déclarant que le dessin à main levée est préférentiellement utilisé en idéation parce qu'il est **abstrait et ambigu** et donc par là :

- adapté aux étapes peu développées (Safin, 2011) ;
- apte à créer rapidement des objets de pensée et donc à produire plus de solutions (Bilda & Demirkan, 2003) ;
- capable de laisser une liberté de réinterprétation, favorisant les découvertes inattendues, (Bilda & Demirkan, 2003) ;
- réducteur de complexité en ignorant certaines composantes du problème (McCall, 2001).

McCall (2001) ajoute qu'il est également préférentiellement utilisé parce que c'est un **processus non destructif**, permettant ainsi :

- de conserver l'historique de conception ;
- et de favoriser à nouveau les redécouvertes par l'action de recopier les éléments conservés.

Boujut et Blanco (2003) ajoutent que les esquisses et croquis permettent l'évaluation rapide des solutions, sont versatiles d'usage et supportent différents degrés de représentation. Ils sont en cela plus adaptés à soutenir les activités de conception face aux contraintes encore mal connues et à la perception en construction du problème à résoudre.

Safin (2011, p. 111) disait déjà qu'« une des voies prometteuses pour réconcilier la souplesse du dessin et les possibilités offertes par l'informatique est d'utiliser le dessin numérique à main levée ». Pour constituer, dans les pratiques, une réelle solution prometteuse, les interfaces d'esquisse numérique devront permettre de dessiner de façon naturelle et simple, et donc à cet effet être basées sur un usage au stylo, sans besoin d'entrée textuelle au clavier (Plimmer & Apperley, 2002, *in Safin, 2011*). Depuis, des logiciels de dessin numériques respectant cela ont effectivement été développés, citons à titre d'exemple les bien connus Procreate ou Trace. Les esquisses numériques devront également apporter une plus-value à la conception. C'est déjà le cas par essence puisqu'elles apportent une feuille de papier infinie et facilement sauvegardante ou partageable (Safin, 2011). Mais une augmentation potentiellement puissante est la reconnaissance de ces esquisses numériques à main levée pour générer des modèles informatiques. Nous dépasserons donc ce simple usage de logiciel d'esquisses numériques, transposant en numérique les fonctionnalités papier-crayon, pour étudier la plus-value de la reconnaissance d'esquisse.

3.2.2.4 Cas particulier de la reconnaissance d'esquisse

Attardons-nous donc sur le cas particulier de ces outils d'interprétation d'esquisses architecturales. Safin distingue trois approches parmi les différents outils numériques exploitant les esquisses architecturales (Safin, Juchmes & Leclercq, 2008 ; Leclercq, Juchmes & Safin, 2014) :

- Les environnements numériques, transposition des outils traditionnels : ils proposent le pendant numérique des outils traditionnellement utilisés en conception préliminaire, avec stylet,

tablette, calques, etc, en lieu et place des crayons, feutres, papiers, claques, etc. Citons à titre d'exemple le logiciel bien connu Procreate.

- Les outils d'interprétation des croquis 2D : ils analysent et interprètent les esquisses traditionnelles réalisées à main levée pour générer un modèle numérique de l'artefact.
- Les outils de modélisation 3D spécifiques à la conception architecturale préliminaire : ils permettent de modéliser numériquement l'artefact en 3D à partir de commandes gestuelles au stylo ou de perspectives de l'objet conçu.

Comme tout développement d'outils computationnels, la logique de fonctionnement du logiciel peut s'inscrire dans le paradigme de d'approche *connexionniste* ou dans celui de l'approche *symbolique*.

Gaudilliere, dans sa thèse sur les pratiques computationnelles en architecture entre 1965 et 2020, les synthétise ainsi : « Pour les symbolistes, penser c'est calculer des symboles qui ont à la fois une réalité matérielle et une valeur sémantique de représentation. Pour les connexionnistes, penser s'apparente à un calcul massivement parallèle de fonctions élémentaires. Autre différence entre les deux, le symbolisme travaille à partir de la séparation entre software et hardware, se concentrant exclusivement sur les modalités logiques du traitement de l'information, alors que les connexionnistes sont persuadés de la nécessité du couplage entre traitement de l'information et processus physique, dont les processus biologiques. » (Gaudilliere, 2022, pp. 108-109).

De manière simplifiée et plus concrète, une logique symbolique est faite de règles pré-définies et d'instructions explicites, réduisant successivement le champ des possibilités d'action, (e.g. un carré est reconnu comme tel parce que c'est un ensemble de segments de droites adjacents formant une forme fermée, les segments étant au nombre de 4, de longueur identique et orientés relativement avec un angle de 90°) tandis qu'une logique connexionniste se base sur les connaissances fournies et des probabilités statistiques de reconnaissance (e.g. un carré est reconnu comme tel parce qu'il est similaire à une famille d'éléments appelés « carré » et différents des autres familles d'éléments « losange » ou « triangle »).



Figure 24. Schéma comparatif des approches symbolique et connexionniste.

En synthèse globale, le connexionnisme était prédominant jusqu'au milieu des années 1960, mais les machines s'avèrent finalement trop difficile à construire avec les limites techniques de l'époque. Le symbolisme prend alors de plus en plus d'ampleur, jusque dans les années 1990. Depuis, l'approche connexionnisme redevient prédominante (Gaudilliere, 2022).

Nous projetons, dans les perspectives de développement de cette recherche, d'adopter une approche symbolique.

3.2.2.5 Faisabilité technique de la reconnaissance d'esquisses à main levée

Ding et Liu (2016) dressent le paysage de ces technologies dans leur dernière revue systématique de la littérature sur le sujet, que nous complétons des rares publications plus récentes⁵.

Les technologies de reconnaissances d'esquisses de conception sont de plus en plus matures. Citons les logiciels *SketchIt* (Stahovich, 1996), *ASSIST* (Davis, 2002) ou *UDSI* (Notowigigdo, 2004), pour la conception mécanique ; ou les outils de Valveny et Marti (2000), de Lee *et al.* (2008), *EsQUIsE* (Leclercq & Jumches, 2002; Jumches, Leclercq & Azar, 2004) ou *NEMo* (Demaret & Leclercq, 2011, 2012) propres à l'architecture.

Ces technologies sont déjà capables d'interpréter les pixels des lignes pour générer des formes géométriques mais aussi des dessins plus abstraits, en combinant les informations de direction et de vitesse du tracé (Stahovich, 1996; Davis, 2002). Elles peuvent reconnaître du texte, des formes géométriques et des flèches (Notowigigdo, 2004) ainsi que des symboles attendus et prévisibles (Stahovich, 1996; Davis, 2002). Elles sont donc capables de comprendre un dessin, et même des descriptions du comportement souhaité dans le cas de *SketchIt*, pour générer le *composant* correspondant. Dans le domaine de l'ingénierie mécanique, il est déjà possible de proposer des variantes de ces *composants* (Stahovich, 1996).

Ces traces graphiques peuvent être récoltées en numérisant une esquisse réalisée sur papier, ce qui permet de concevoir sur n'importe quel support mais implique alors d'interrompre ponctuellement l'activité de conception. Une façon de contourner ce problème serait de dessiner directement au moyen d'outils d'esquisse numérique, que ce soit sur tablette ou avec un stylet géo-localisé (Notowigigdo, 2004). Plusieurs natures d'input sont possibles et déjà développées : du dessin 2D en plan, du dessin 2D dans plusieurs plans spécifiés formant un espace 3D, du dessin en immersion dans un modèle 3D ou du dessin en perspective (Ding & Liu, 2016).

Actuellement, il est encore essentiel d'avoir une compétence et une connaissance approfondie des règles spécifiques au domaine d'application de la technologie pour éviter toute ambiguïté dans l'interprétation du dessin (Segzin & Davis, 2007; Ding & Liu, 2016).

Pour finir, les logiciels sont capables de réaliser un modèle 2D et/ou 3D sur base de l'interprétation de plusieurs formes d'esquisses. En terme d'*output*, nous recensons des représentations 2D, des modèles 3D et des diagrammes sémantiques. Il existe différentes techniques d'assemblage (Ding & Liu, 2016) : en modélisant les formes géométriques et les positionnant les unes par rapport aux autres, en modélisant des scènes composées de chaque *composant* reconnu sémantiquement puis assemblés, ou encore en modélisant des maillages 3D.

⁵ Les travaux récent en termes de reconnaissance d'esquisse traitent presque exclusivement de l'architecture logiciel et des performance des systèmes neuronaux ou de deep learning et ne sont mis en pratique que sur des tâches d'interprétation de dessins d'objets du quotidien (comme *SketchPointNet* de Wang (*et al.*, 2018) ou *SketchGAN* de Liu (*et al.*, 2019)). Ils ne sont pas appliqués à la conception. Quand ils traitent de l'architecture, alors c'est au départ de plan CAD ou de modèle 3D que la reconnaissance est effectuée, et non d'esquisses à main levée (comme *GAN* de Huang et Zheng (2018)).

3.3 Perspectives retenues pour la reconnaissance d'esquisse

Comme nous l'avons vu dans ces deux chapitres théoriques, l'activité de conception en architecture fait l'objet de nombreuses recherches. Jusqu'à présent, la conception a beaucoup été étudiée en la synthétisant en divers modèles d'activité générale, comme l'activité de résolution de problème en trois étapes structuration-génération-évaluation de Simon (1969), l'activité opportuniste de transformations successives *see-transform-see* de Schön (1983), etc. Les activités de conception ont également beaucoup été étudiées par le prisme des outils avec notamment la théorie de l'activité introduisant le triangle sujet-objet d'action-objet médiateur (Engeström, 1987), l'approche instrumentale de Rabardel et Beguin (2000) qui introduisent la notion d'instrument comme objet auquel on applique un schème d'usage, et puis Latour et Yaneva (2006, 2008) qui considèrent les objets comme des acteurs faisant partie d'un réseau au même titre que le concepteur. Des outils concrets d'aide à la conception architecturale ont été étudiés en détail. Citons notamment l'interprétation d'esquisse par Leclercq (1996) et Safin (2011), le BIM par Poirier, Staub-French et Forgues (2015, 2017). Finalement, les activités de conception ont également été étudiées par le prisme des activités cognitives comme dans les travaux d'ergonomie de Falzon (2004, 2005), ceux sur la résolution de problème de Darses (2009) et ceux de Détienne sur les activités cognitives collaboratives (2007, 2021).

Avec avoir exploré succinctement toutes ces disciplines, les motivations de notre thèse sont d'analyser plus spécifiquement cette activité de conception pour en dégager des connaissances plutôt orientées sur la gestion des informations tout au long du processus de conception et pour construire une assistance aux conversations réflexives entre concepteur et représentations externes.

Dans un objectif d'assistance aux activités de conception, il est possible de se pencher sur la structuration du problème, sur la génération des solutions, sur leur évaluation, sur le caractère collectif des activités ou sur la traçabilité des décisions. Notre travail de recherche portera principalement sur les assistances à la génération et à l'évaluation des solutions et, dans une moindre mesure, sur la traçabilité des décisions.

Les concepts suivants seront fondamentaux dans la lecture de ce manuscrit :

- l'**idéation**, activité de génération d'idées ou première phase du processus ;
- l'**objet médiateur**, tout objet (instrument ou représentation) assurant la médiation entre le concepteur et sa tâche de conception ;
- la **représentation externe**, externalisation tangible de l'image mentale de l'artefact en conception permettant la décharge mentale et la redécouverte ;
- le **moyen de conception**, soit l'action mise en place pour concevoir ;
- le **média**, désignant ici l'association d'un moyen de conception et de la représentation qu'il permet de produire ;
- l'activité de **mise au net**, choix des traits à conserver et leur reproduction ;
- l'activité d'**analogie**, idéation par re-/dissemblance ou association d'idées ;
- et l'**aide à la génération, à l'évaluation et à la traçabilité** des solutions.

***W**ith the aim of assisting design activities, it is possible to address the problem structuring, the solution generation, their evaluation, the collective nature of the activities or the traceability of decisions. Our research work will focus mainly on assistance in the generation and evaluation of solutions and, to a smaller extent, on the traceability of decisions.*

The following concepts will be fundamental in the reading of this manuscript:

- **ideation**, idea generation activity or first phase of the process ;
- the **mediator object**, any object (instrument or representation) mediating between the designer and his design task;
- the **external representation**, a tangible externalisation of the mental image of the artefact being designed, allowing mental discharge and rediscovery;
- the **design means**, i.e. the action taken to design;
- the **medium**, here designating the association of a means of design and the representation it allows to be produced;
- the activity of **cleaning up**, choosing the features to be preserved and reproducing them;
- the activity of **analogy**, ideation by re-/dissembling or association of ideas;
- and **assistance in the generation, evaluation and traceability of solutions**.

Chapitre 4

Problématique

Ce chapitre a pour objectif de développer la problématique constituant le coeur de cette thèse. Nous énonçons la question de recherche principale de cette thèse ainsi que ses sous-questions de recherche. Nous présenterons également le plan des différentes expérimentations menées pour y répondre et leur articulation. Nous formulons finalement les hypothèses circonscrivant ce travail.

***T**his chapter aims to develop the problem that constitutes the heart of this thesis. We will state the main research question of this thesis as well as the sub-questions to which the different conducted experiments aim to answer. We will list them and position them in a scheme of experiments in order to understand their articulation. Finally, we will explain the hypotheses that circumscribe this work.*

4.1 Problématique de notre recherche

Les enjeux de cette recherche ayant été établis et notre ancrage théorique ayant été élaboré, nous allons ici détailler la question que pose cette thèse et les sous-questions qu'elle génère. Nous expliciterons également la logique d'articulation des différentes expérimentations et observations que nous mettons en place pour répondre à ces sous-questions.

4.1.1 Questions de recherche

L'état de l'art a montré que, d'un côté, les recherches sur l'idéation étudient déjà les facteurs favorisant ou limitant la génération des idées. De l'autre côté, nombreuses sont les recherches portant sur le BIM, dans ses aspects techniques et de mise en oeuvre. Mais la relation entre les deux est peu documentée : elle est largement pratiquée mais peu étudiée. Hors cette connexion présente de nombreuses frictions, pour l'instant subies.

Dans ce manuscrit, nous questionnons : **comment instrumenter la conception architecturale pour générer, suivre, récolter et articuler l'information du travail d'idéation** en vue de fluidifier la transition entre la conception imaginative et la conception productive, au service des concepteurs et dans le contexte de la démarche BIM ?

Concrètement, nous désirons proposer une **méthode d'identification et d'articulation des informations-projets pour entretenir un modèle sémantique du bâtiment en conception**. Notre recherche se décline au travers de six sous-questions de recherche, schématisées et listées ci-après :

1. Quelles sont les limites de la transition actuelle entre les phases de conception préliminaire et les phases de conception productive à destination des livrables BIM ? (Chapitre 6, section 6.1)
2. Par quel principe d'instrumentation articuler les informations de l'idéation aux phases suivantes ? (Chapitre 6, section 6.2)
3. Comment suivre les informations tout au long du processus de conception ? (Chapitre 7)
4. Certains artefacts sont-ils plus appropriés et employés pour véhiculer les informations ? (Chapitre 6)
5. Comment récolter l'information dans le respect du processus du concepteur et en nourrissant son activité ? (Chapitre 8)
6. Comment formaliser ces informations en une articulation manipulable ? (Chapitre 9)

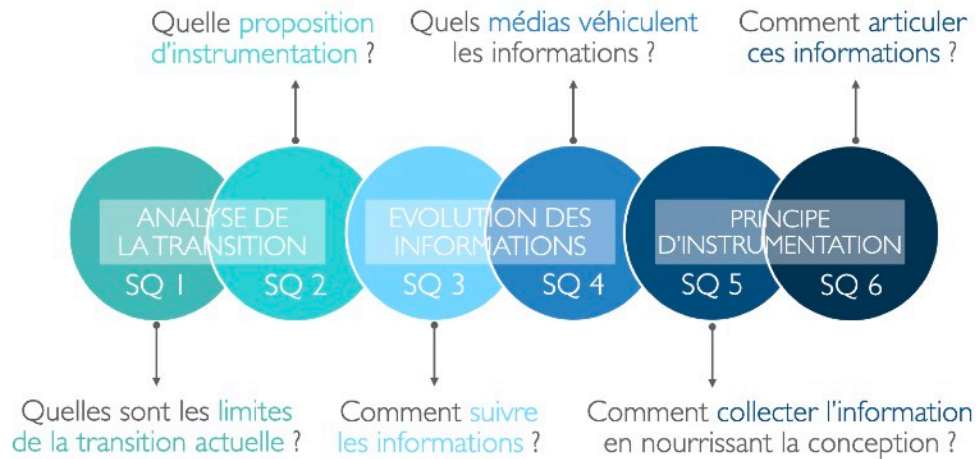


Figure 25. Schématisation des sous-questions de recherche par thématique.

4.1.2 Circonscription de la recherche

Tout d'abord, nous nous intéressons aux échanges entre acteurs et aux activités des acteurs. Nous ne chercherons pas à décrire les processus cognitifs qui transforment l'information ou l'objet architectural. La nature de ces processus cognitifs et leurs enjeux sont déjà largement étudiés par ailleurs, et depuis longtemps, par Darses (1992, 2004) et Falzon (2004, 2005).

Nos recherches analysant d'abord la gestion des informations et l'impact de l'instrumentation sur le processus de conception ou l'idéation et ne décrivant pas les activités cognitives entre co-concepteurs, nous ne plongerons pas ici dans l'analyse des modes de conception collective ni dans l'ensemble des activités cognitives spécifiques à celle-ci. Les activités collectives de conception sont déjà largement documentées, notamment par Détienne (2007, 2021) et Ben Rajeb (2012, 2018).

Les acteurs concernés seront uniquement des professionnels de la conception : le travail collaboratif ne considérera pas les démarches dites participatives, associant des non initiés. Celles-ci étant étudiées aujourd'hui en sciences sociales, dans les recherches sur la participation citoyenne, comme récemment par Schelings (2021).

Les artefacts seront considérés à travers les objectifs qu'ils visent mais pas pour le sens qu'ils portent. Nous n'aborderons donc pas le caractère sémiotique des représentations externes qu'ils constituent car c'est un point déjà étudié en détail par ailleurs par Joachim (2016).

Finalement, le passage au modèle BIM proprement-dit ne sera pas abordé, car il relève d'une préoccupation technologique qui n'est pas l'objet de notre réflexion. De plus, nous considérons que l'approche BIM actuelle constitue une technologie de transition qui évoluera encore.

Nos expériences se déploieront sur base de solutions techniques existantes, qui seront combinées et au besoin détournées. Cette recherche fondamentale vise en effet à comprendre l'activité de conception et les potentialités de son instrumentation, mais pas à développer ni implémenter sur terrain une nouvelle technologie. Ce point pourra faire l'objet de recherches futures.

4.1.3 Plan d'expériences

Pour répondre à ces différentes sous-questions de recherche, et conformément à notre posture méthodologique⁶, nous mettons en place plusieurs expérimentations. La figure suivante illustre leur articulation :

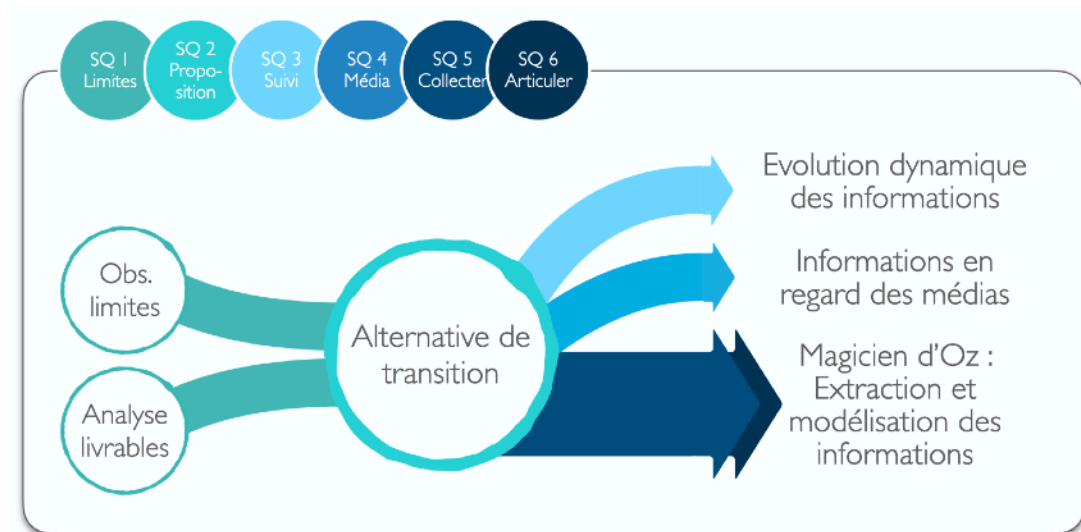


Figure 26. Articulation des différentes expériences menées pour répondre aux sous-questions de recherche.

Nous commençons par étudier in-situ, en milieu pédagogique, un processus de conception intégrée de plusieurs mois démarrant avec des phases de conception préliminaire puis détaillée, suivies par la mise en place d'une démarche BIM. Nous y observons les limites de la démarche BIM et analysons les livrables produits en fin de phase de conception afin de documenter et modéliser la transition conception-BIM telle qu'actuellement menée. Nous répondons par là à notre première sous-question de recherche : « Quelles sont les limites de la transition actuelle ? ».

Nous proposons ensuite une méthode alternative pour effectuer cette transition. Nous répondons ainsi à notre deuxième sous-question de recherche : « Quelle proposition d'instrumentation ? ».

Notre thèse visant à générer, suivre, récolter et articuler l'information du travail d'idéation, nous menons plusieurs expériences pour caractériser cette information. Ces expériences prennent place dans les phases de conception du processus de conception intégrée cité ci-dessus. Nous y observons in-situ l'évolution des informations à différentes granulométries temporelles et les médias utilisés pour générer et véhiculer ces informations. Ces observations nous permettent de répondre aux sous-questions de recherche 3 et 4 : « Comment évoluent les informations, via quels artefacts ou médias, et comment sont-elles rappelées ? ».

⁶ Détaillée au chapitre 5.

Finalement, pour évaluer la plus-value de notre proposition de méthode de transition, nous réalisons en laboratoire une expérience de type « Magicien d'Oz »⁷ immergeant des concepteurs experts professionnels dans une situation de conception outillée au moyen de cette proposition d'instrumentation, coeur de notre recherche. Ce dispositif nous permet d'étudier comment extraire et modéliser les informations conçues en temps réel et comment le concepteur converse-t-il avec ce dispositif. Nous répondons alors à notre sixième question de recherche : « Comment collecter l'information en nourrissant la conception ? ».

Cette expérience majeure ouvre la discussion de l'impact des conversations de réflexion homme-machine et le questionnement de la modélisation des informations. Nous tentons de répondre par cette discussion à notre septième et dernière sous-question de recherche : « Comment formaliser ces informations ? ».

4.1.4 Objectif de la thèse

L'objectif final de cette thèse est double :

- Outiller l'analyse de l'évolution des informations en conception architecturale et étudier comment se transforment les informations par le biais des médias de conception.
- Ouvrir une perspective d'instrumentation de la conception favorisant l'idéation et améliorant la transition vers la dynamique BIM.

⁷ Cette technique est régulièrement utilisée en informatique et en robotique pour évaluer les impacts d'une technologie sur les usages et les utilisateurs ainsi que pour étudier les interactions de ces derniers avec la machine (Rietz *et al.*, 2021 ; Browne, 2019). Elle a l'avantage de ne pas nécessiter le développement préalable de la technologie puisqu'elle consiste à simuler, en temps réel et par des humains dissimulés, les fonctionnalités du logiciel innovant.

De nombreuses études guident l'usage du BIM mais elles n'abordent pas l'impact des pratiques dans les phases amont ni la question du basculement entre conception imaginative et conception productive. Nous questionnons donc **comment instrumenter la conception architecturale pour générer, suivre, récolter et articuler l'information du travail d'idéation** en vue de fluidifier cette transition. Nous découpons cette question en 7 éléments :

- Quelles sont les limites de la transition actuelle ?
- Par quelle proposition d'instrumentation la fluidifier ?
- Comment évoluent les informations au travers du processus de conception ?
- Certains artefacts sont-ils plus appropriés pour véhiculer les informations ?
- Certaines informations sont-elles essentielles à la conception car rappelées ?
- Comment collecter l'information en nourrissant l'activité du concepteur ?
- Comment formaliser ces informations en modèle sémantique manipulable ?

***N**umerous studies guide the use of BIM but they do not address the impact of these practices in the upstream phases nor the question of the transition between imaginative and productive design. We therefore question **how to instrument the architectural design to generate, monitor, collect and articulate the information of the ideation work** in order to smooth this transition. We divide this question into 7 components:*

- *What are the limits of the current transition?*
- *By which instrumentation proposal can we make it smoother?*
- *How does the information evolve through the design process?*
- *Are certain artifacts more appropriate for conveying information?*
- *Is some information essential to the design process since it is recalled?*
- *How to collect information while enhancing the designer's activity?*
- *How to formalize this information into a manipulable semantic model?*

Chapitre 5

Méthodologie

Nous profitons de ce chapitre pour clarifier la construction de la recherche menée en détaillant les différentes méthodes de recherche mobilisées et combinées. Nous explicitons notre posture de chercheur parmi les courants épistémologiques et les divers paradigmes de recherche existants.

***W**e will take advantage of this chapter to clarify the construction of the research carried out by detailing the different research methods used and combined. We explain our posture as researchers regarding the epistemological currents and the various research paradigms.*

5.1 Méthode générale de recherche

Les types de recherches existantes en architecture sont nombreux et varient dans leur postulat ontologique, leur posture épistémologique et leur orientation méthodologique. Notons que dans ce type de recherche, ne sont pas toujours menées de réflexions méthodologiques. Ici, face à notre problématique, nous nous sommes intéressés à d'avantage comprendre comment tirer parti des différentes méthodes existantes et comment les articuler ensemble pour mener cette recherche. Nous décrirons ici notre posture de recherche générale ainsi que les différentes méthodes combinées et utilisées tout au long de cette recherche. Les différentes notions méthodologiques existantes sont issues des ouvrages de De Bruyne (*et al.*, 1974), de Le Moigne (1995), de Berthelot (2001), de Creswell (2006) et de Charmillot (2007).

5.1.1 Choix de notre posture générale de recherche

De manière générale, une recherche scientifique est sous-tendue par quatre pôles structurants (de Bruyne, Herman & de Schoutheete, 1974) : le pôle épistémologique, pour garantir la scientificité de l'objet en précisant le paradigme d'ancrage; le pôle théorique, pour construire les hypothèses et concepts; le pôle morphologique, pour énoncer les règles de structuration et de forme de l'objet scientifique; et le pôle technique, pour mettre en oeuvre le dispositif de recherche élaboré.

Pour le pôle épistémologique, il existe deux grandes postures possibles : la posture positiviste (aussi appelée explicative), issue des sciences dures, et la posture constructiviste (aussi appelée compréhensive), issue des sciences cognitives.

Nous nous ancrons dans le paradigme du **constructivisme** car nous favorisons la compréhension et l'étude emphatique des phénomènes étudiés au-dessus d'une vérité prouvée. La réalité est subjective et c'est plutôt l'activité mentale des acteurs du phénomène observé qui importe. Nous considérons l'activité des concepteurs comme résolument pensée et construite et non comme une activité passive uniquement déterminée par l'environnement.

Cette posture épistémologique du constructivisme se décline selon Charmillot (2007; 2021) dans le pôle théorique au travers de l'usage de théories de l'action. Pour le pôle morphologique, « les hypothèses sont définies de manière progressive, tout au long du processus d'analyse. Elles servent à guider la construction de l'objet. Une attention est portée aux formes de la recherche, à travers une réflexion sur l'écriture » (Charmillot, 2021, p. 1). Finalement dans le pôle technique sont préférés les entretiens compréhensifs analysés qualitativement aux autres méthodes possibles. Ces prédicats de Charmillot sont une base à l'élaboration de notre méthodologie mais nous l'enrichissons de méthodes complémentaires pour la récolte et l'analyse des données.

Le tableau ci-après synthétise les méthodologies de recherche courantes en architecture et met en avant leurs principales différences.

	ORIENTEE CURIOSITE				ORIENTEE MISSION		
	Recherche théorique	Recherche interprétative	Recherche empirique	Recherche par enquête	Recherche par simulation	Recherche qualitative	Recherche-action
<i>La connaissance s'acquière par ...</i>	Le raisonnement	La compréhension et le raisonnement	Nos perceptions	Les mesures et tests	La simulation artificielle	La compréhension profonde singulière	L'essai d'amélioration
<i>Le but est de ...</i>	Développer une théorie	Développer une compréhension	Identifier les causes	Identifier les causes	Comprendre le comportement	Décrire une situation singulière	Développer des résultats pratiques
<i>Au moyen de ...</i>	Déduction logique et critique	Expériences inductives	Expériences inductives	Expériences inductives	Modèle déduit et évaluation induite	Cas d'étude décrits avec empathie	Diagnostic et plan d'action
<i>Et par une analyse ...</i>	/	Descriptive	Paramétrique (corrélation)	Non-Paramétrique (chi-carré)	Qualitative ou quantitative	Descriptive du contenu	/
<i>Moi, chercheur je ...</i>	Cherche la validation	Cherche l'interprétation théorique	Suis objectif	Suis objectif	Extrapolé les comportements	Suis participant observateur	Suis collaborateur
<i>Issue de ...</i>	La philosophie et les mathématiques	L'histoire et les arts	Les sciences naturelles	Les sciences sociales	Les sciences de l'artificiel	L'anthropologie et l'ethnographie	La pratique
<i>Et souvent employée pour ...</i>	L'optimisation de la conception	L'histoire de l'architecture	Le test d'outils	La cartographie de comportements	Les analyses coût-bénéfice	L'observation de participants	Le plaidoyer et la démonstration

Figure 27. Tableau de comparaison de différentes postures de recherche courantes en Architecture (basé sur Johnson, s.d., s.t.).

Nous cherchons à développer une compréhension de l'activité de conception et à identifier les causes des différents comportements observés. Nous désirons mettre en place des expériences inductives que nous analyserons de manière descriptive mais aussi statistique. Notre posture dans cette recherche combine donc les caractéristiques d'une recherche **interprétative** et d'une recherche **empirique**, décrites dans le tableau ci-dessus.

5.1.2 Schéma méthodologique de notre recherche

Le schéma ci-après synthétise l'ensemble de notre cheminement de recherche et situe les différentes postures et modes de raisonnement combinés tout au long de la thèse.

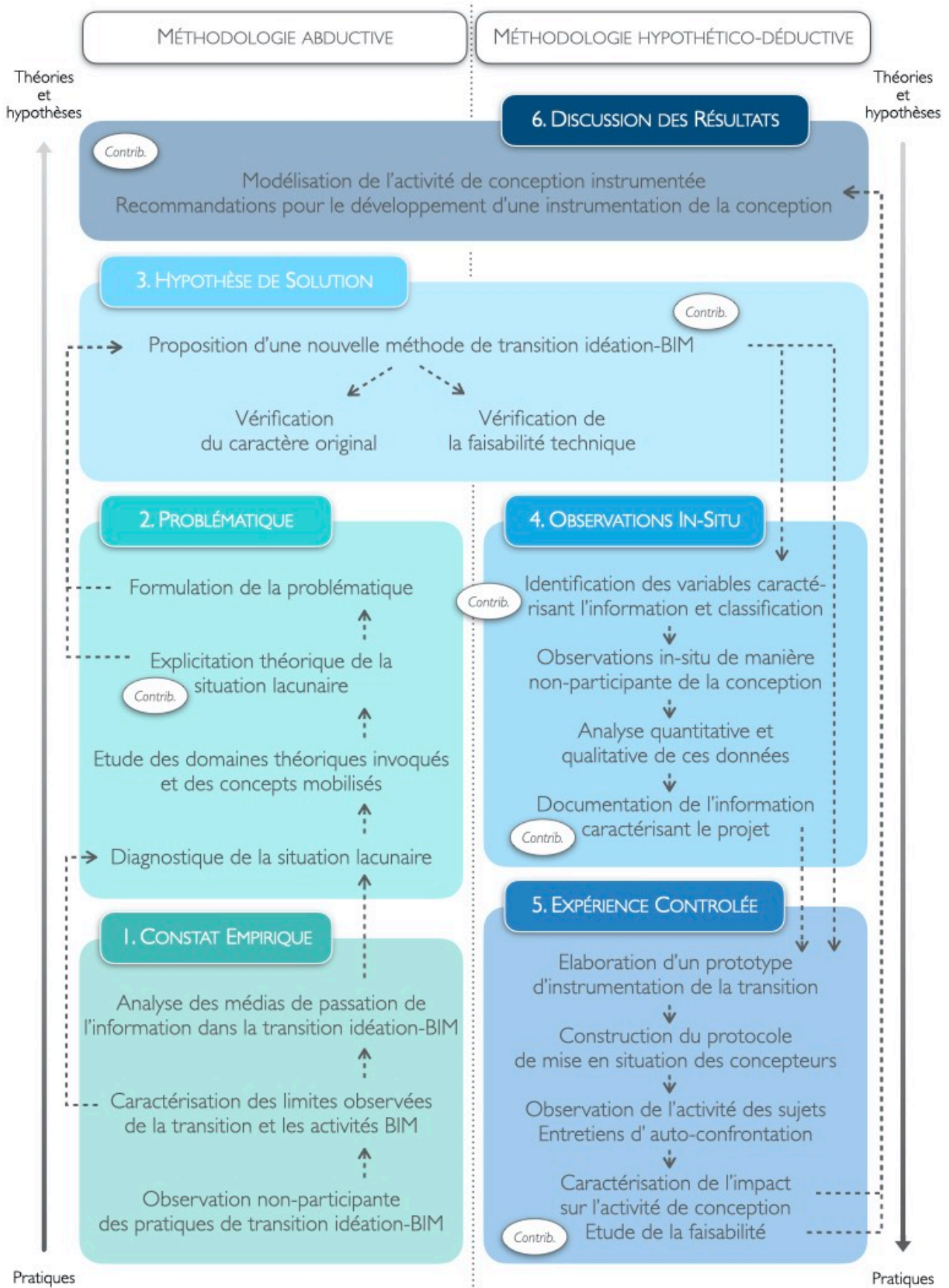


Figure 28. Schématisation de notre cheminement méthodologique de thèse.

Dans la littérature sont distingués trois modes de raisonnements, illustrés ci-après, sous-tendant la recherche :

- Le mode de raisonnement déductif (et hypothético-déductif) qui commence par recenser les concepts pertinents à la recherche menée et identifier des failles parmi les théories existantes. Il propose ensuite de nouveaux modèles (et hypothèses) qu'il teste afin de les confirmer ou de les infirmer.
- Le mode de raisonnement inductif qui, à l'inverse, commence par des observations spécifiques, affinées par des questions de recherche, qu'il généralise ensuite en théories.
- Le mode de raisonnement abductif qui démarre également par plusieurs observations spécifiques mais qui vise à identifier l'hypothèse d'explication ou la théorie la plus probable.

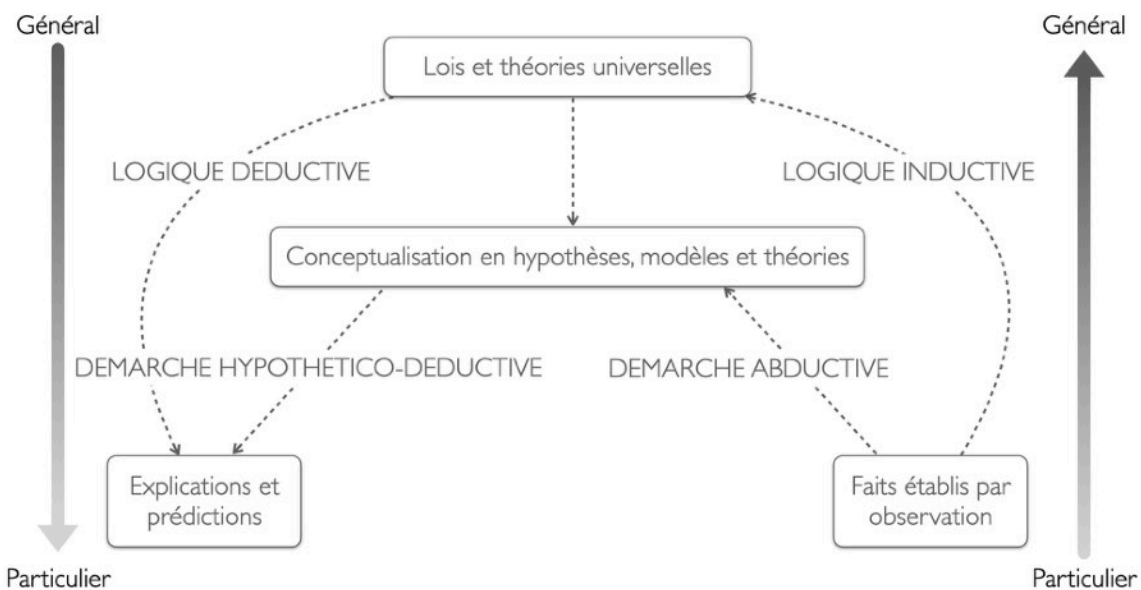


Figure 29. Schématisation des modes de raisonnement en recherche (basé sur Thiétart, 1999).

Nous combinons ces modes de raisonnement dans une boucle abduction-déduction de manière à faire émerger, sur base d'observations singulières, un principe de méthode conceptuelle qui sera ensuite vérifié en suivant un raisonnement hypothético-déductif.

Les trois premières phases de notre recherche suivent ainsi la logique du raisonnement **abductif** (points 1 à 3, figure 28), selon un mouvement d'ascension depuis les pratiques sur terrain jusqu'aux théories et hypothèses. Il nous semble nécessaire que cette recherche démarre du terrain, pour cerner au mieux les phénomènes et besoins que vivent les acteurs de la conception. Nous commençons donc par une étape de constat empirique, alimentant ensuite la formulation de la problématique. Ces deux étapes débouchent sur la proposition d'une hypothèse de solution.

Les deux phases suivantes de notre processus de recherche (points 4 et 5, figure 28) suivent le mouvement descendant depuis les hypothèses formulées vers la pratique, selon la logique du raisonnement **hypothético-déductif**. Nous désirons en effet dépasser la simple proposition théorique et vérifier son application et sa pertinence en la confrontant aux pratiques sur terrain. Nous irons ainsi observer en situation la gestion faite des informations, éléments au coeur de l'hypothèse de solution proposée.

La dernière phase (point 6, figure 28) remonte à un niveau théorique pour discuter les résultats obtenus et formuler des recommandations théoriques.

Ce processus de recherche se distingue donc par une combinaison de différentes approches de recherche. Notre volonté est de multiplier les angles d'étude de la transition et de la solution proposée pour pouvoir au mieux circonscrire leurs enjeux. Nous avons donc à cette fin associé des constats empiriques, des observations in-situ, des propositions théoriques et des expériences contrôlées.

5.1.3 Méthode de récolte des données

Nous empruntons nos méthodes de récolte de données aux sciences cognitives, à la psychologie ergonomique ainsi qu'à la recherche qualitative par théorisation ancrée. A ce titre, nos récoltes de données s'effectuent en grande partie au moyen d'observations non-participantes de cas d'étude. Nous complétons cette méthode de récolte de données, pour certaines expériences spécifiques, par des entretiens semi-dirigés, du *think aloud* et des auto-confrontations afin d'avoir accès aux pensées et logiques de décision des sujets observés.

Détaillons concrètement, en reprenant la schématisation de notre processus de recherche (figure 28), ces différentes méthodes de récolte de données successivement mises en place.

Dans la première étape de constat empirique (point 1, figure 28), nous réalisons des **observations non-participantes**. Les observations permettent un recueil global de données, directement relié à la situation réelle, sans interprétation du sujet ou du chercheur. Notre posture non-participante d'observateur complet présente l'avantage d'une récolte de données complète et en temps réel, sans besoin d'installer un matériel perturbateur comme des caméras, au contraire des postures de participant observateur ou de participant complet⁸. Elle évite également les biais directs liés au manque de recul et à l'influence du chercheur sur le phénomène observé. Elle peut cependant sembler étrange aux acteurs observés et les mettre mal à l'aise. Pour nous en prémunir, nous nous sommes faits discrets et avons pris une posture d'étudiant parmi la cohorte mais ne travaillant pas au projet observé. Nos observations, qui peuvent déjà par nature faire parfois émerger des sous-phénomènes non anticipés ou des éléments inattendus, ont été réalisées sans grille de manière à rester ouverts à toute émergence, sans biaiser, ni orienter, notre regard sur le phénomène. Pour le terrain de récolte, nous faisons le choix d'une **étude de cas**. En effet, nous souhaitons décrire qualitativement et avec détails ce phénomène en étant au plus près des acteurs. Une étude de cas est donc un moyen méthodologique privilégié pour être au plus proche du phénomène observé et pour avoir un accès complet aux données réelles du terrain. Nous avons veillé à ce que le cas d'étude choisi soit représentatif.

Pour notre seconde récolte de données, durant la quatrième étape (point 4, figure 28), nous menons à nouveaux des observations in-situ. Notre posture est toujours celle d'un observateur complet, pour les mêmes bénéfices, mais cette fois-ci nous nous outillons de grilles et de caméras. Nous cherchons à ce stade à documenter un point précis du phénomène étudié, l'usage d'une grille est donc plus pertinent pour récolter de manière systématisée les données. Nous construisons notre grille d'observation sur base de la littérature, pour les points déjà couverts par d'autres chercheurs, ou au départ du terrain, pour les nouveaux points encore non-couverts. Cette caractérisation au départ du terrain est établie selon la méthode de la **théorisation ancrée** (Glaser & Strauss, 1967;

⁸ La posture de participant complet est parfois tout de même nécessaire dans certains contextes bien particuliers où déclarer l'observation influencerait trop le phénomène étudié et rendrait cette dernière invalide, mais ce n'est pas notre cas ici.

Strauss & Corbin, 1994; Paillé, 1994) qui permet de théoriser un phénomène empirique de manière inductive. Cette méthode a l'avantage d'être ouverte à l'émergence. De plus, elle se révèle particulièrement précieuse ici, où il n'existe pas encore de classification utilisable pour certaines variables étudiées. La technique d'étiquetage de Lejeune (2019) permettra de faire émerger cette classification. Les caméras, mises en place en complément des grilles d'observation, permettront une récolte exhaustive des données pour compléter au besoin la prise de note.

Pour notre dernière récolte de données (point 5, figure 28), le terrain est un peu plus particulier puisque nous réalisons des **expériences contrôlées**. Ici, nous décidons de chaque paramètre régissant le contexte de l'activité observée car nous cherchons à ce stade à valider l'application et la pertinence de l'hypothèse de solution proposée en la confrontant aux pratiques des concepteurs. Nous construisons le protocole de mise en situation des acteurs puis nous observons leur comportement. Comme nous l'avons vu précédemment, les observations permettent un recueil de données global, directement relié à la situation réelle, sans interprétation du sujet ou du chercheur et elles peuvent faire émerger des sous-phénomènes non anticipés ou des éléments inattendus. Par contre, le chercheur n'a accès qu'aux données visibles. Pour palier à cet inconvénient, nous tirons parti des protocoles de *think aloud*, demandant au sujet de penser tout haut. Les observations sont en outre complétées par les entretiens, qui donnent, eux, accès aux avis, émotions, réflexions des acteurs du phénomène étudié, même si ces derniers seront toujours en partie reconstitués *a posteriori*. Nous procédons à deux types d'entretiens : des entretiens semi-dirigés, pour cerner le ressenti global de chaque sujet et pouvoir les comparer, et des entretiens d'auto-confrontation, pour questionner en détail certains sous-phénomènes observés et avoir accès aux logiques de comportement et aux raisons ayant dicté les activités des sujets. Nos entretiens semi-dirigés sont composés, pour chaque question d'une partie dirigée et d'une partie compréhensive. Dans l'**entretien dirigé** (Lallemand & Gronier, 2015), la structure des questions est normalisée et bien définie : leur formulation et leur ordre sont à respecter. Celles-ci sont fermées avec des réponses possibles, par oui ou non, ou avec des questions à choix multiples. Le temps total d'échange est également fixé. Cette normalisation permet de comparer les individus répondants puisque le cadre ne varie pas. Cependant, ces questions ne permettant pas vraiment la discussion, nous les avons complétées de questions d'**entretiens compréhensifs** (Kaufmann, 1996), pour creuser certains points évoqués par les sujets. Ceux-ci visent en effet à aller au-delà des questions impersonnelles qui amènent inévitablement à des réponses impersonnelles. Les questions de ces entretiens compréhensifs découlent des informations apportées par le sujet interrogé afin de construire une conversation engageant le chercheur autant que le sujet. Cet engagement amène le sujet à se livrer. Enfin, dans les **entretiens d'auto-confrontation** (aussi appelés entretiens d'explicitation) nous avons demandé à chaque sujet d'explicitier son vécu sur base de traces de son activité (ici les vidéos), lui permettant ainsi de se la remémorer au mieux. Cahour (*et al.*, 2016) énonce que, par ce fait, la mémoire du sujet est ravivée, évitant un biais de rationalisation ou de reconstruction *a posteriori* du vécu. Cette forme d'entretien permet donc de développer en profondeur l'expérience subjective du sujet.

Notons qu'avec ces méthodes, le chercheur est actif dans la récolte de données (Calixte, 2021). Des méthodes de collecte passive existent, comme des capteurs pour récupérer des mesures physiques, notamment la température ou l'humidité, des documents pour synthétiser les volontés ou l'évolution de l'activité dont des mails ou des rapports, un questionnaire à remplir pour récolter un large panel de données quantitatives ou qualitatives (Calixte, 2021), mais ces méthodes passives

permettant difficilement d'accéder aux explicitations des vécus et des activités humaines qui sont au coeur de la conception.

5.1.4 Méthode d'analyse des données

Notre approche **mixte**, qui mobilise conjointement, en complémentarité l'une de l'autre, les récoltes et analyses quantitatives et qualitatives est, à notre sens, l'approche idéale pour cette recherche car elle combine les avantages de ces deux méthodes. En effet, l'approche quantitative, en récoltant des données quantifiables et mesurables sur un échantillon statistiquement représentatif, permet de généraliser les résultats obtenus à l'ensemble de la population. Elle requiert cependant une préparation complexe en amont et s'accompagne d'un ensemble de biais et d'hypothèses à maîtriser. L'approche qualitative, quant à elle, donne accès aux mots, pensées et images relatives aux phénomènes étudiés. Elle est plus ouverte à la découverte de phénomènes et d'hypothèses non prévisibles. Ses résultats sont également généralisables une fois la saturation atteinte, c'est-à-dire lorsque les situations observées corroborent les résultats déjà obtenus sans amener de nouvel élément.

Ainsi, notre approche mixte permet d'analyser le phénomène étudié sous différents angles et différentes granulométries pour ainsi mieux le circonscrire.

Concrètement, nos analyses combineront les statistiques descriptives avec des descriptions qualitatives, notamment par théorisation ancrée, des phénomènes observés. Nous exploiterons également la synthèse visuelle et la modélisation pour analyser nos données.

Adoptant une posture entre recherche interprétative et empirique, nous nous ancrons dans le paradigme constructiviste et nous combinons démarches abductives et hypothético-déductives en empruntant nos méthodes de recherche aux sciences cognitives, à la psychologie ergonomique ainsi qu'à la recherche qualitative par théorisation ancrée.

Le plan de notre recherche se construit comme suit :

Nous commencerons par étudier in-situ un processus de conception intégrée articulant conception préliminaire puis détaillée et démarche BIM afin de documenter et modéliser la transition conception-BIM telle qu'actuellement menée. Nous élaborerons ensuite une méthode alternative de transition. Nous mènerons par ailleurs plusieurs expériences, in-situ et en expérimentations contrôlées, pour caractériser l'information, coeur de cette problématique, en regard de son évolution, des médias employés et des rappels effectués. Finalement, l'expérience majeure de cette thèse sera réalisée en laboratoire pour immerger des concepteurs professionnels en situation de conception instrumentée au moyen de notre proposition. Nous y étudierons comment extraire et modéliser les informations conçues en temps réel et comment le concepteur converse avec ce dispositif. Finalement, nous ouvrirons la discussion de l'impact des conversations de réflexion homme-machine et questionnerons la modélisation sémantique des informations.

***A**dopting a posture between interpretative and empirical research, we anchor ourselves in the constructivist paradigm and we combine abductive and hypothetico-deductive approaches by borrowing our research methods from cognitive sciences, ergonomic psychology as well as from grounded theory qualitative research.*

The plan of our research is built as follows:

We will start by studying in-situ an integrated design process that articulates preliminary and then detailed design with a BIM approach in order to document and model the design-BIM transition as currently conducted. We will then propose an alternative method of transition. We will also conduct several experiments, in-situ and in controlled trials, to characterize the information, the heart of this issue, with respect to its evolution, the media used and the recalls made. Finally, the major experiment of this thesis will be carried out in the laboratory to immerse professional designers in an instrumented design situation using our proposal. We will study how to extract and model the designed information in real time and how the designer converses with this device. Finally, we will open the discussion on the impact of human-machine reflective conversations and will question the semantic modeling of information.

Chapitre 6

Transition entre idéation et BIM

Ce chapitre constitue le premier volet opérationnel de notre recherche et vise à questionner la transition effectuée entre les phases de conception créative et de conception productive.

Pour répondre à notre première sous-question de recherche, nous commençons par identifier les limites de la transition idéation-BIM telle que menée actuellement, sur base de la littérature et d'observations d'un processus de conception intégrée articulant conception préliminaire, conception détaillée et démarche BIM.

Face à ce constat, nous élaborons un principe d'instrumentation, réponse à notre seconde sous-question de recherche, permettant de passer des documents graphiques conventionnels en architecture aux modèles numériques 3D caractéristiques du BIM. Nous formalisons ici de façon détaillée la problématique de transition idéation-BIM et nous faisons une proposition théorique de méthode de gestion de l'information bâtiment pour améliorer cette transition.

This chapter constitutes the first part of our research and aims to question the transition from creative design to productive design.

To answer our first research sub-question, we will start by identifying the limits of the current ideation-BIM transition based on the literature and on observations of an integrated design process articulating preliminary and detailed design with a BIM approach.

Faced with this situation and in response to our second research sub-question, we aim to develop a digitally instrumented method for moving from conventional architectural graphic documents to the 3D digital models characteristic of BIM. We thus propose here a detailed formalization of the ideation-BIM transition problem and a method for managing building information to improve this transition.

6.1 Transition actuelle entre idéation et BIM

Nous dressons ici un bilan de la situation actuelle en termes de pratiques de transition entre les phases de conception idéative préliminaire, puis de conception détaillée, vers une phase de production BIM. Ce bilan se base sur la littérature mais également sur des observations non-participantes menées dans un contexte de projet de conception intégrée articulant idéation et BIM. Il nous permettra ensuite de modéliser la transition actuelle.

6.1.1 Observation d'un processus intégré articulant idéation et BIM

6.1.1.1 Choix du processus observé

Pour observer les enjeux de la transition dans les pratiques sur terrain, nous avons décidé de mener une étude de cas. Nous désirons décrire qualitativement et avec détails ce phénomène de transition en étant au plus proche des acteurs. Une étude de cas est donc un moyen méthodologique privilégié pour être au plus proche du phénomène observé et avoir accès aux données réelles du terrain.

Les processus de conception en agence sont difficilement accessibles, conditionnés par les choix d'organisation et d'outillages de l'agence, et difficilement observables dans leur entièreté. Des recherches menées au sein de notre laboratoire sur les pratiques BIM des agences (Calixte *et al.*, 2019b) ont montré en effet les nombreuses limites de l'observation de pratiques professionnelles in-situ dans le contexte du BIM.

Nous avons préféré choisir pour cas d'étude l'Atelier de master de l'Université de Liège, en articulation avec le Projet-bâtiment l'Institut Mines-Telecom d'Ales. Ce contexte pédagogique précis et unique est un excellent terrain pour étudier l'articulation entre idéation et BIM. Ce choix nous permet d'avoir accès à l'ensemble des données du projet ainsi qu'à l'ensemble des méthodes de travail mises en place. Nous sommes dans une situation de maîtrise pour la récolte de données sur une chaîne de processus couvrant la conception depuis ses toutes premières phases d'idéation jusqu'à sa modélisation et son exploitation BIM. Un contexte d'agence ne pourrait permettre d'observer autant d'équipes de conception sur l'ensemble des étapes de leur processus et en documentant toutes leurs interactions entre les équipes de conception préliminaire et celles de spécification technique puis celles d'exploitation BIM (Calixte, 2021). Un contexte d'agence présenterait également un biais de départ qui est le non-choix de l'organisation d'équipe et des outils mobilisés pour la conception (Calixte, 2021).

Bien que nos observations prennent place dans un cadre pédagogique, les participants sont des concepteurs experts, dans leur quatrième année de formation, maîtrisant les méthodes et challenges de la conception. Des enseignants, qui ont une expérience pratique et/ou scientifique, ont élaboré un cadre particulier d'apprentissage. Conscients des enjeux des marchés publics et de l'impact des nouveaux outils numériques, ils ont conçu un atelier pour mettre les concepteurs dans des situations comparables à la réalité. Dans ce processus, les concepteurs mettent en œuvre des solutions qui répondent aux besoins et exigences spécifiques du projet. Ainsi, tout au long du processus de conception, on peut observer la concrétisation de ces idées génératrices à travers la création d'artefacts numériques, au moyen d'outils numériques.

Cette étude de cas a fait l'objet d'une publication en conférence (Baudoux & Leclercq, 2022a).

6.1.1.2 Articulation des différentes étapes du processus

Le processus observé est composé de trois grandes étapes, réparties au travers de trois cours qui s'articulent en une conception continue d'un même projet, comme illustré dans la figure ci-après. Ce dispositif pédagogique original a déjà été décrit de manière détaillée par Calixte (Calixte & Rahhal, 2019; Calixte, Cuffi & Leclercq, 2022).

Ce processus intégré s'étale sur trois quadrimestres, chaque étape durant trois à quatre mois. Le bâtiment conçu est un musée de 8 500 mètres carrés en site urbain et au programme multifonctionnel complexe.

La première étape du processus comprend les phases d'esquisse et d'avant-projet sommaire (APS). Elle prend place dans l'Atelier du 1er master Ingénieur Civil Architecte de l'Université de Liège (Belgique). La seconde étape consiste en la réalisation de l'avant-projet détaillé (APD) et s'effectue dans le cours de Projet-bâtiment de l'Institut Mines-Telecom d'Als (France) depuis 2010. Finalement la dernière étape, celle du BIM, est menée dans le cours de Studio Digital Collaboratif BIM de l'Université de Liège (Belgique), créé par Pierre Leclercq et Anabelle Rahhal depuis 2019.

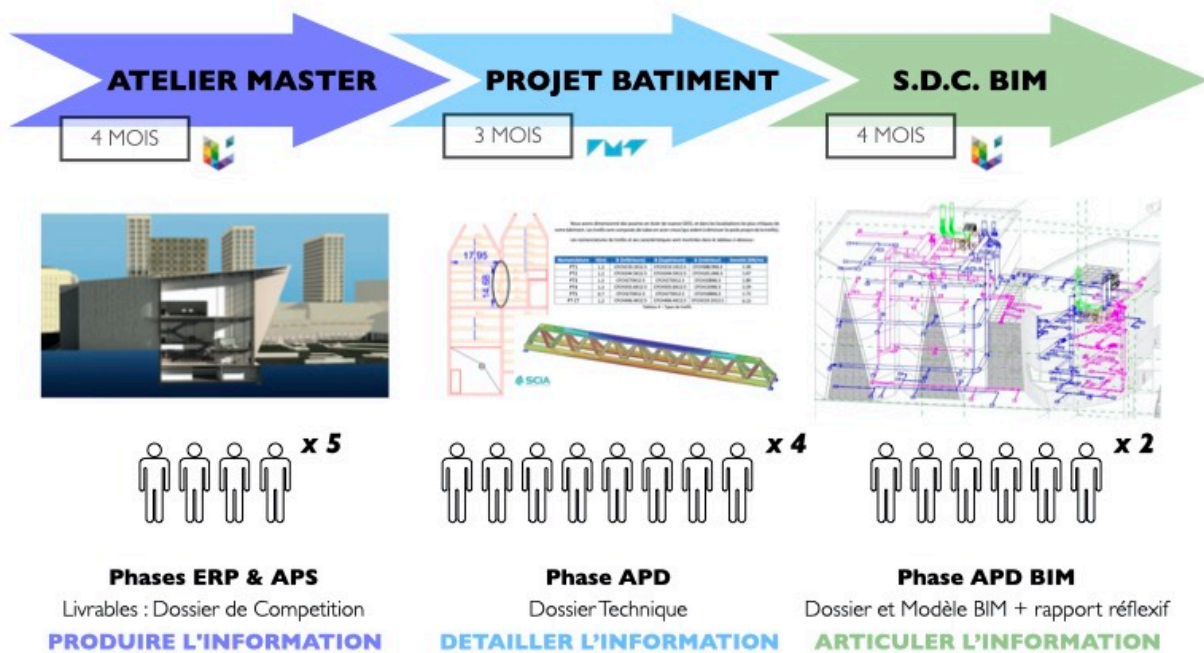


Figure 30. Articulation des différents cours composant le processus observé, sur base de (Calixte & Rahhal, 2019).

Ainsi, concrètement, dans l'Atelier d'architecture de master, les concepteurs conçoivent collectivement l'architecture du bâtiment, apportant une réponse formelle, fonctionnelle et technique (pré-dimensionnement, normes d'accessibilité, d'incendie, etc.) au programme. Les acteurs du Projet-bâtiment réalisent ensuite l'étude d'ingénierie. En se basant sur ces livrables et la documentation générée par les équipes de l'ULiège, ils mènent des études d'ingénierie tous corps d'état sur la structure, les méthodes d'exécution, l'enveloppe du bâtiment, le dimensionnement des réseaux (fluides CVC, électricité) ainsi que sur la conformité réglementaire du bâtiment. Enfin, les acteurs du Studio Digital Collaboratif BIM reprennent les livrables du Projet-bâtiment, créent le

modèle BIM à proprement parlé et utilisent ce modèle pour estimer les coûts, planifier le chantier, etc. (Calixte & Rahhal, 2019; Baudoux & Leclercq, 2022a).

6.1.1.3 Corpus de données étudiées

Nos observations ont été menées durant l'année 2021. Ce processus mobilise, respectivement pour chacune des trois phases, 5 équipes d'ingénieurs architectes (3 à 4 concepteurs par équipe), 4 équipes d'ingénieurs (7 à 8 concepteurs par équipe) et 2 équipes d'ingénieurs architectes (6 concepteurs par équipe).

Le bâtiment à concevoir avait pour fonction d'accueillir un musée d'histoire d'environ 8 500 m². Le programme demandait un espace d'accueil (600m²), des espaces d'expositions permanents (3 000m²), des espaces d'exposition temporaire (600m²), un restaurant de production et son salon de thé (900m²), des locaux pour l'administration (450m²), un auditorium et des salles d'ateliers pédagogiques (1000m²), un centre de documentation et de recherche (400m²), des espaces de conservation (700m²) ainsi que des espaces logistiques et techniques permettant la vie du bâtiment (1 000m²).

Nous avons collecté les documents transmis à la fin de l'Atelier d'architecture de master, pour chacune des 5 équipes. Ces documents, visibles ci-après, regroupent, pour chaque équipe :

- les trois fiches synthétisant l'ensemble du projet conçu, respectivement sur les axes : formel, fonctionnel et structurel ;
- les trois planches concours présentant le projet ;
- l'ensemble des plans de chaque niveau et les coupes associées ;
- le modèle numérique 3D du bâtiment ;
- un tableau listant l'ensemble des locaux, leur fonction et leur surface.

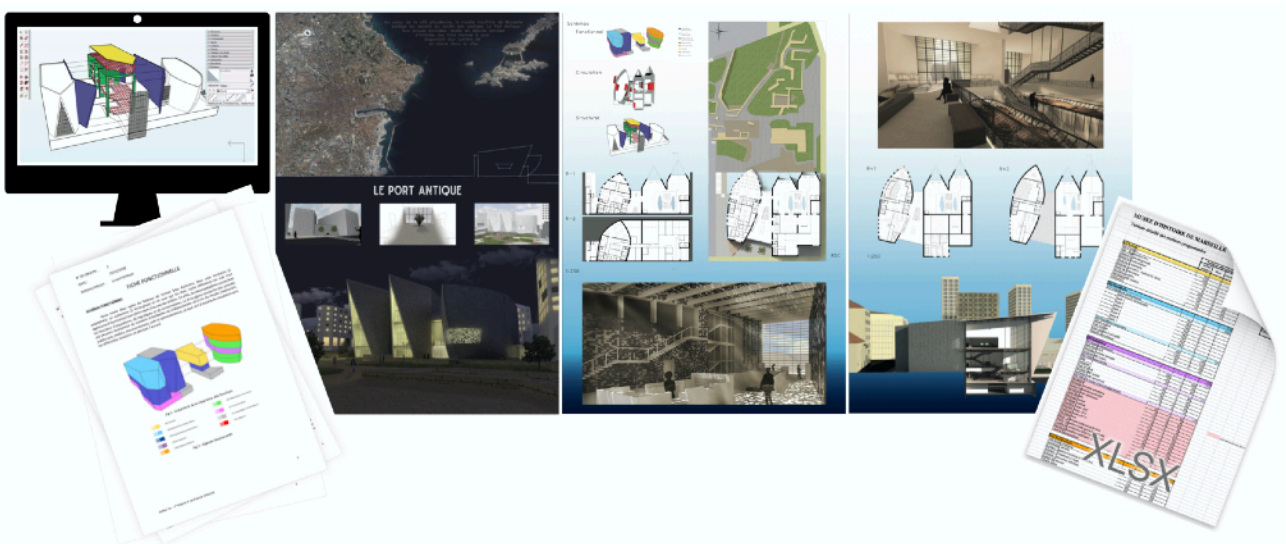


Figure 31. Exemple de livrables communiqués à la fin de la phase d'avant-projet sommaire (Baudoux & Leclercq, 2022a).

6.1.1.4 Analyse des livrables de l'Atelier de master

Nous commençons par analyser la manière dont l'information du projet est communiquée et transférée de la phase de conception, en fin d'Atelier, vers les phases suivantes de faisabilité et de

modélisation BIM, pour le Projet-bâtiment et le Studio Digital Collaboratif BIM. Cette analyse a déjà fait l'objet d'une publication en conférence (Baudoux & Leclercq, 2022a). Nous visons ici la compréhension des pratiques de transition pour répondre à notre sous-question de recherche, visant pour rappel à identifier les limites de la transition actuelle.

Pour mener cette analyse, nous collectons les livrables de la fin de l'Atelier de master (figure 31). Ce sont les éléments dont disposent les architectes et ingénieurs des phases suivantes pour poursuivre la conception du bâtiment, notamment au travers du processus BIM. Ces documents représentent donc les résultats attendus à la fin de la phase d'avant-projet sommaire.

Nous examinons chacun des documents et mettons en lumière les éléments nécessaires et attendus à la phase BIM, ainsi que les représentations utilisées pour les représenter.

Notons que ces composants spécifiques au BIM sont issus du guide BIM utilisé par le Centre Scientifique et Technique de la Construction, institut de recherche belge. Il se réfère à l'American Institute of Architects qui définit spécifiquement les différents Levels of Development, c'est-à-dire les différents niveaux de détail de la maquette, attendus en BIM. Dans notre cas, pour une fin de phase d'avant-projet sommaire, les *éléments* devant être définis sont les suivants, dans l'ordre du guide (BIMForum, 2018) :

Table 4. Ensemble des composants BIM attendus (BIMForum, 2018).

Espaces	Faux-planchers et faux-plafonds
Niveaux	Systèmes de distribution verticaux et horizontaux
Éléments de structure (fondations et grilles structurelles, éléments de soutènement, dalles sur sol, planchers et toitures)	Plomberie
Rampes et escaliers	HVAC
Façade (murs extérieurs, fenêtres, portes/grilles, persiennes et événements)	Protections incendie
Toitures	Equipements électriques et éclairage
Enveloppe extérieure aériennes	Installations extérieures (équipements pour les véhicules et les piétons, mobilier, routes/parking/zones piétonnes)
Éléments intérieurs (cloisons intérieures, fenêtres, portes/grilles, rampes, persiennes, finitions des murs/escaliers/plafonds, finitions des sols)	Site (modifications du site, aménagement paysager, services publics pour les eaux et les gaz, modifications du site électrique/communication)

Pour caractériser les types de représentations sur lesquelles figurent ces informations, nous utilisons une classification que nous avons développée précédemment (Baudoux *et al.*, 2019) et déjà

détaillée en section 3.1.2.5, au chapitre 3. Pour rappel, nous y avons différencié sept typologies de représentation de l'information :

- L'*image de référence* (abrégée par la suite en *RI*), pour toute image, croquis ou photo non produit(e) par les concepteurs;
- Le *texte* ou *mot-clef écrit* (*T*), c'est-à-dire des mots servant de représentation indépendante;
- L'*annotation* (*A*), pour tout croquis ou note apposé sur une autre représentation;
- Le *schéma* ou *croquis* (*S*), lorsque c'est une production symbolique;
- Le *plan* ou la *coupe* (*PS*), pour tous les plans des niveaux ou coupes du bâtiment;
- La *perspective 2D* (*P*), lorsque l'objet 3D est représenté en perspective sur un support 2D;
- L'*immersion 3D* (*I*), si la représentation est un modèle 3D numérique ou physique.


Le tableau ci-après synthétise les différents types de représentation utilisés par l'ensemble des cinq équipes pour chaque type d'*éléments* attendu pour la phase BIM.

Table 5. Représentation des différentes informations issues pour chaque type d'éléments attendus (Baudoux & Leclercq, 2022a).

Eléments d'information	Type de Représentation						
	RI	T	A	S	PS	P	I
Espaces		1 2 3 4 5	2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	4
Niveaux		5	3		1 2 3 4 5		1 4
Eléments de structure		1 2 3 4 5	3 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 4
Rampes et escaliers	1 2 5	1 2 3 5	3 5	1 2 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 4
Facade	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5		1 2 3 4	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 4
Toitures		2 3			1 3 4 5		
Enveloppe extérieure				5	2 5	2	
Eléments intérieurs	1 2 5	3 5	1 2 3	3	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	
Faux-planchers et faux-plafonds					1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	
Systèmes de distribution		1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 3 4 5	1 2 3 4 5	2	1 4
Plomberie	1	1 2 3 4 5		1 3	3 4 5	1	
HVAC	5	2 3		1	3 4 5		
Protections incendie		1 2 3 4 5	1 2 3 4 5		1 2 3 4 5		
Equipements électriques	5	5					
Installations extérieurs		2 3		1	1 3 4 5	1 4	
Site		1 2		1 2 4	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	

Légende

RI	Image référence	T	Texte écrit	A	Annotation
S	Schéma et croquis	PS	Plan ou coupe	P	Perspective 2D
I	Immersion 3D				

Moins utilisé  Plus utilisé 1 2 3 4 5 Numéro d'équipe

En examinant les différents types de représentation utilisées pour transmettre l'information synthétisée d'une phase à l'autre, quels que soient les *éléments* considérés, nous obtenons le graphique suivant :

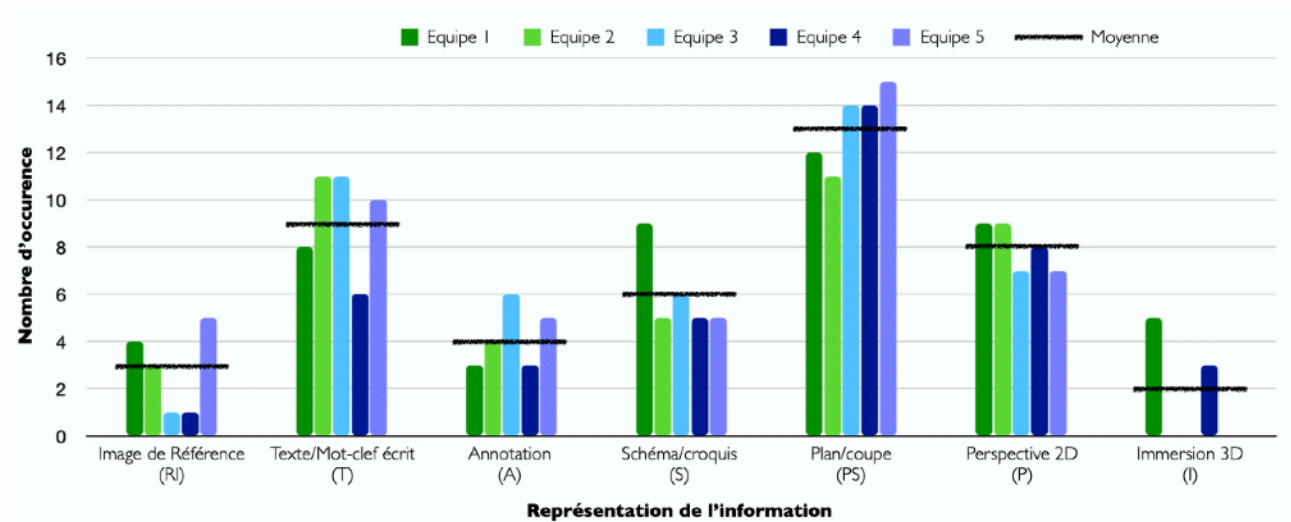


Figure 32. Proportion d'usage des différents types de représentation dans les livrables (Baudoux & Leclercq, 2022a).

Nous pouvons constater que les plans et coupes (PS), les perspectives (P) ainsi que les textes (T) contiennent la plupart des informations requises par la phase BIM et sont majoritairement utilisés dans la première partie du projet. Ces types de représentation apparaissent donc comme complets et polyvalents, car ils sont les plus denses en information du projet.

A la suite, les schémas et croquis (S) sont employés pour décrire, entre autre, les espaces, les éléments de structure et les circulations.

Enfin, les autres types de représentation, comme les images de référence (RI), les annotations (A) et l'immersion 3D (I), servent à communiquer des éléments spécifiques comme, respectivement, les façades et finitions intérieures, les cloisonnements et mesures incendie, et les niveaux et éléments de construction.

Il apparait également que certaines représentations spécifiques (RI, S, A, P), autres que les plans, coupes et textes, transmettent une quantité importante d'informations non attendues dans les livrables à la fin de l'Atelier. Les intentions des concepteurs, leur processus de prise de décision, les modifications apportées au projet, l'ambiance des espaces, les flux d'utilisateurs ainsi que l'historique du site sont transmis aux acteurs impliqués dans les phases suivantes sur base d'extraits de documents annotés, de diagrammes, de croquis et de perspectives. Ces informations sont donc essentielles à la conception et à la compréhension globale du projet.

La discussion menée dans cette analyse (Baudoux & Leclercq, 2022a) conclut que le BIM, en tant qu'outil de représentation composé de plans, coupes et textes associés aux composants géométrisés, transmet essentiellement la majorité des informations requises et exploitées dans les phases ultérieures, qui ont déjà été représentées sous cette même forme de plans, coupes, textes et perspectives. Les schémas et croquis par contre, contenant le reste des informations attendues, sont difficilement transposables à la maquette BIM.

En outre, toute l'information non attendue mais néanmoins essentielle pour comprendre le projet dans sa globalité, est perdue puisqu'elle est actuellement présente dans diverses

représentations mais pas dans celles exploitées par le BIM. Nous concluons que l'usage exclusif des maquettes BIM n'est pas suffisant.

En définitive, pour répondre à notre problématique concernant les limites de la transition des représentations traditionnelles vers le BIM, nous retenons que la gestion de cette transition dépend de la nature des informations et du type de représentation concernées. Les plans, les coupes, les perspectives brutes, l'immersion 3D et les informations textuelles sont facilement transposables à un modèle BIM, tandis que d'autres, tels que les croquis, les annotations graphiques, les perspectives de rendu, les images de référence et les informations textuelles non associées à des composants géométrisés, doivent être conservés dans des documents externes au modèle. Ce constat est également observé dans les pratiques BIM par Rahhal (*et al.*, 2020)(voir section 2.4.5 du chapitre 2).

6.1.1.5 Observations des pratiques dans le Studio Digital Collaboratif BIM

Pour compléter ces premiers résultats, nous observons également les pratiques des concepteurs dans les phases suivantes du processus, c'est-à-dire dans le Studio Digital Collaboratif BIM.

Nous nous plaçons pour cela en observateur complet (au sens défini en section 5.1.3 du chapitre 5, c'est-à-dire que nous ne prenons pas part à l'activité observée) et nous notons au fur et à mesure, les différents phénomènes observés. Cette méthodologie d'expérimentation nous permet d'assister aux réunions d'équipe qui sont consacrées à la préparation du protocole BIM, à la coordination du travail, à la modélisation du bâtiment, à la résolution des *clashes*⁹ et à l'exploitation des maquettes pour effectuer diverses analyses thermiques, structurelles, de flux de circulation, ...

Souvent, en architecture, le BIM est associé au côté technique des logiciels de modélisation de maquettes. Nous avons pu ici saisir l'ampleur des tâches de gestion du *workflow* et du *dataflow* et de gestion de l'interopérabilité¹⁰. Nous avons également observé plusieurs contradictions de l'environnement de travail, par exemple :

- entre la souplesse des nombreux outils libres et la rigueur nécessaire à la coordination du travail collaboratif : les acteurs doivent établir et respecter un protocole précis régissant leur travail et s'accorder sur le choix d'usages parmi l'ensemble des outils de modélisation 3D, de visualisation BIM et de détection de *clashes* ;
- entre processus linéaire et processus concourant : chaque acteur ayant son processus personnel mais devant converger avec ceux des autres acteurs pour atteindre des maquettes cohérentes ;
- entre l'organisation non-hiérarchique où chaque métier est responsable de sa production et l'organisation transversale ayant pour but d'obtenir un projet complet et cohérent.

Au terme de cette observation, nous pouvons mieux appréhender les usages du BIM et leurs enjeux concrets d'implémentation.

Nous complétons ces observations par la lecture des rapports sur l'analyse d'activité rédigés par les concepteurs en fin de processus. Ils y prennent du recul sur leur propre activité et y explicitent la coordination de leur équipe, les méthodes de travail et les outils employés, les

⁹ Voir section 2.5.2

¹⁰ Voir section 2.5.2

dysfonctionnements rencontrés, mais également l'évolution de la compréhension partagée du projet durant le processus (c'est-à-dire le niveau d'exactitude de leur conscience mutuelle du projet, comme théorisé en section 2.2.3, au chapitre 2).

En nous appuyant sur ces rapports, nous examinons la manière dont les informations des phases précédentes ont été transmises par les livrables de fin d'avant-projet. Comment les activités de la phase de conception impactent-elles l'activité de la (post-)transition ?

Deux-tiers des acteurs de la phase BIM révèlent dans leur rapport des dysfonctionnements liés à l'exactitude des informations reçues des phases antérieures. Ils attribuent principalement le manque de détails reçus comme la raison principale. Les documents sont imprécis et incomplets, en particulier en raison d'un problème et ou d'un manque de représentations graphiques, ce qui rend le projet difficile à comprendre. De plus, il y a des incohérences entre les informations reçues et les différentes représentations du projet.

Ces imprécisions et ces incohérences peuvent être déjà observées dans les livrables de l'Atelier architectural correspondant à la phase de l'avant-projet sommaire. Bien que les concepteurs respectent globalement les exigences attendues en terme de niveau de développement par les guides BIM, certains lots sont moins détaillés et d'autres dépassent largement les attentes (Baudoux & Leclercq, 2022a). Nous pouvons également questionner la pertinence des demandes des guides BIM en cette fin de phase puisque, bien que globalement respectées, elles ne semblent pas suffire au bon déroulement des phases ultérieures. Ces imprécisions et incohérences ont des répercussions sur les concepteurs de la phase BIM, car elles entraînent des retards dans la réalisation du modèle BIM, augmentant ainsi la charge de travail pour la modélisation, en raison du temps supplémentaire nécessaire pour comprendre le projet. En outre, les acteurs doivent poser des choix de conception et d'interprétation pour faire face aux lacunes.

Ces résultats soulignent l'importance de la qualité des informations fournies dans les phases antérieures pour garantir le succès des phases ultérieures du processus de conception. Ces résultats soulignent également le fait que les lots ne peuvent pas être considérés comme interdépendants, mais au contraire dépendants des uns et des autres. Leurs niveaux de concrétisation ne peut pas être validés s'ils sont en désaccord avec les lots complémentaires.

6.1.2 Caractérisation de la transition actuelle

Sur base de la littérature et des observations in-situ explicitées ci-dessus, nous synthétisons ici les caractéristiques et les limites de la transition de l'idéation au processus BIM. Nous aboutissons au modèle-type de la transition qui est schématisé à la figure 33 comme une progression, de gauche à droite, se développant à travers différents états.

Les boucles convergentes d'idéation et de conception sommaire (point 2 sur la figure 33) sont suivies par la première fracture (point 5 sur la figure 33), visant à produire la maquette BIM sommaire. Arrive alors la deuxième fracture (point 6 sur la figure 33) lorsque cette maquette BIM sommaire est reprise à la main pour pouvoir servir de point de base à l'initiation de l'étape de formalisation BIM. Lors de cette étape, plusieurs maquettes numériques sont modélisées puis modifiées. Elles coexistent donc (point 8 sur la figure 33). Elles sont en outre complétées par plusieurs documents complémentaires, de natures diverses, évoluant parallèlement.

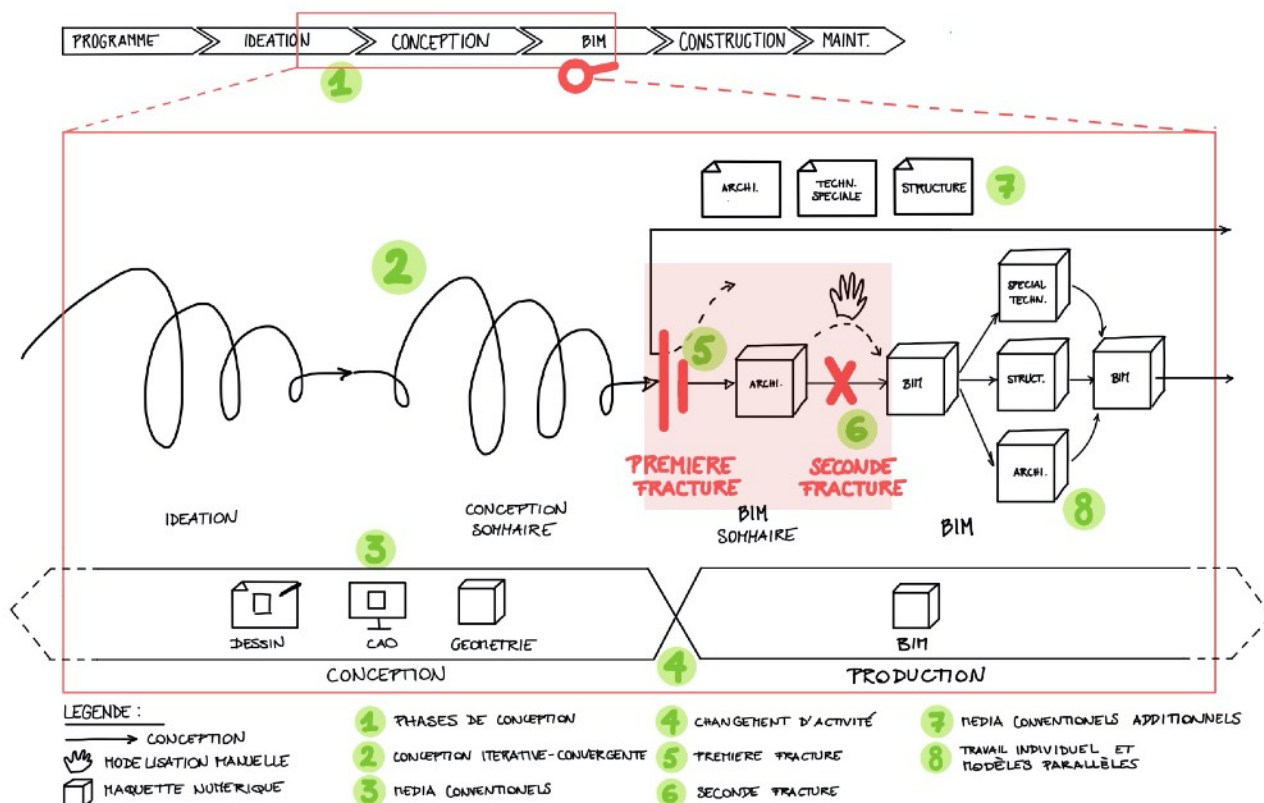


Figure 33. Modélisation de la transition actuelle (Baudoux et al., 2022).

Nous détaillons ici ces différents états dans l'ordre chronologique. Cette caractérisation provient de l'un de nos articles (Baudoux, et al., 2022).

6.1.2.1 Processus de conception

Une fois le programme architectural défini, la conception commence par une phase d'idéation¹¹ (creative design or pre-design, point 1 sur la figure 33). Les idées sont étudiées, adaptées et de nouvelles sont générées. S'en suit une phase d'esquisse (design concept) lors de laquelle le bâtiment prend forme finale. Le concepteur résout géométriquement les idées : elles sont transformées en plans normés et dimensionnés. (Safin, 2011; Dautremont et al., 2020).

Les étapes de conception sont itératives et convergentes (comme illustré dans le point 2 de la Figure 33), et permettent caractérisation de plus en plus précise d'une solution architecturale au moyens de constructions, de transformations et d'ajustements de représentations, tout type compris (Goel, 1995; Visser, 2006; Darses, 2009).

Ces activités de conception sont médiatisées, utilisant ainsi différents moyens de conception (dessin à la main, DAO 2D, prototypage, ...) et mobilisant différentes représentations externes (images de référence, croquis, plans, maquettes physiques, ...) (Joachim et al., 2012; Baudoux & Leclercq, 2021 - point 3 sur la figure 33). Rappelons pour la suite que les représentations sont codifiées (Leclercq, 1994; Joachim et al., 2012). Les caractéristiques du projet y sont en effet représentées selon des codes et symboles prédéterminés, compréhensibles par les initiés, ici les acteurs de la construction.

¹¹ Définie comme la phase où les idées sont générées et où les principales contraintes émergent (Leclercq, 2005; Safin, 2011; Dautremont et al., 2020).

6.1.2.2 Transition

A un certain moment du projet, défini par les équipes, les activités créatives de génération et de modification des idées sont interrompues. La phase de production des livrables doit commencer (point 4 sur la figure 33). Elle est différente de la conception (Safin, 2011): elle consiste, dans le cas des processus BIM, en la production d'une première maquette sommaire du projet. Cet arrêt d'activité constitue la première fracture observée dans la transition actuelle (point 5 sur la figure 33). Nous constatons que cette première fracture est triple.

Premièrement, la nature des activités change, passant de la conception à la production. La nature même du processus BIM, qui exige une définition précise et complète des informations du projet, pousse à expliciter des aspects quantitatifs et de faisabilité, tandis que l'esquisse ne les a pas déterminés explicitement. Nous observons alors une contradiction entre le niveau de précision donné de la conception, qui vise à accentuer les lignes directrices du projet et son identité, par rapport à celui des modèles BIM qui spécifient l'ouvrage en détails.

Deuxièmement, la méthode BIM impose un changement de média. Des outils spécifiques, tels que les maquettes et protocoles BIM, s'opposent aux outils conventionnels de type esquisses, DAO et modèles géométriques utilisés dans les phases de conception (Doutriaux, 2018; Hoscheid & Halin, 2018; Sergeevich *et al.*, 2019; Dautremont *et al.*, 2020).

Enfin troisièmement, une perte d'informations est constatée lors de cette première étape de transition (Baudoux & Leclercq, 2022a). Dans ses observations, Rahhal (*et al.*, 2020) recense 6 types d'informations véhiculées dans le processus BIM : compréhension du projet, modélisation du projet, exploitation de la maquette, détection des conflits géométriques, organisation du travail collaboratif, appropriation des outils. Elle montre que les informations de coordination prédominent sur les autres. D'autres informations architecturales, comme la réflexion sur les ambiances, la qualification des espaces et les informations concernant la motivation de certains choix n'apparaissent pas et sont donc perdues lors de cette transition.

Une fois que cette première fracture franchie, la maquette BIM sommaire est produite. Celle-ci s'avère malheureusement peu exploitable (Calixte, 2021). Certes, elle constitue un livrable en elle-même, satisfaisant par exemple les demandes des concours de marchés publics d'envergure et démontrant les compétences BIM requises par les agences d'architecture et d'ingénierie pour remporter le marché. Toutefois, cette maquette ne peut pas être exploitée en l'état dans la suite du processus BIM. Pour être exploitable, elle doit être manuellement remodelisée (Doutriaux, 2018; Calixte, 2021). Cette remodelisation manuelle constitue la deuxième fracture observée dans la transition Idéation-BIM (point 6 à la figure 33).

6.1.2.3 Démarche BIM

Comme abordé en section 2.5.4 du chapitre 2, le processus BIM, au delà de la transition, présente également plusieurs limites. Nos observations et analyses confirment certains usages des représentations BIM et soulignent de nouvelles limites, confirmées par Doutriaux (2018) Sergeevich *et al.* (2019), Calixte *et al.* (2019b) et Rahhal (*et al.*, 2020).

Bien que la maquette BIM soit déclarée comme le référentiel unique pour tous les acteurs et que toutes les données et informations soient théoriquement compilées dans une seule et même maquette numérique, les pratiques montrent que, en plus d'avoir des maquettes multiples, le processus BIM est tout de même complété par d'autres supports d'informations et d'échanges,

comme des perspectives annexes, schémas, textes, tableaux mais aussi de la communication indépendante ou encore des espaces collaboratifs alternatifs mobilisant les outils traditionnels (point 7 sur la figure 33 ; Rahhal *et al.*, 2020).

D'autre part, comme nous l'avons vu précédemment, alors que ce processus est présenté comme une méthode de travail collaborative, les acteurs travaillent souvent individuellement, sur des parties de projet distinctes, reliées ensuite dans la maquette lors de moments de synchronisation cognitive (point 8 sur la figure 33).

Si l'usage exclusif des maquettes BIM n'est pas souhaitable, comme vu à la section 6.1.1 de ce chapitre, les logiciels BIM constituent une plus-value sur certains points. En permettant de générer automatiquement les coupes à partir de l'objet 3D avec toute l'information encodée, ils évitent au concepteur de dessiner chacune de ces multiples coupes du bâtiment, surcharge de travail avec les outils traditionnels papier-crayon ou CAD. Cette valeur ajoutée est cependant modérée puisque la charge de travail est en partie déplacée vers la modélisation de cet objet 3D. Une autre plus-value apportée par ces outils BIM est la cohérence entre les documents puisque ceux-ci sont tous générés à partir du même objet 3D. Néanmoins, cette plus-value ergonomique n'est utile qu'à l'exécution et non à la conception. Mais ce sont des qualités du système actuel à garder en tête pour la suite de notre travail.

6.2 Proposition de transition alternative

Face au constat des limites de la transition actuelle, nous proposons, dans cette section, une méthode, numériquement instrumentée et hypothétique, permettant de passer des documents graphiques conventionnels en architecture aux modèles numériques 3D caractéristiques du BIM. Notre réflexion pour cette proposition alternative a fait l'objet d'un article (Baudoux *et al.*, 2022) présenté et discuté à l'occasion d'une conférence internationale. Cette proposition mobilise d'une part la reconnaissance d'esquisse, identifiée comme prometteuse dans l'état de l'art, et d'autre part la modélisation automatique de représentations du projet. Nous commençons par un état des lieux de plusieurs prototypes d'instrumentation existant déjà pour positionner notre proposition.

6.2.1 Originalité de la méthode proposée

Notre proposition d'interprétation d'esquisse et de modélisation se distingue des logiciels existants à notre connaissance en plusieurs points, que nous abordons ici.

D'après Sezgin et Davis (2007), beaucoup de travaux de reconnaissance d'esquisse utilisent une structure de reconnaissance par composant et ne considèrent pas les caractéristiques de temporalité des traits. Cette stratégie d'interprétation fonctionne dans certains domaines mais est trop limitante pour les esquisses d'architecture. Nous désirons donc travailler par reconnaissance de traits en fonction de l'expertise du domaine et du contexte, selon le paradigme du symbolisme (interprétation selon un série de règles), en opposition au connexionnisme (interprétation par ressemblance statistique avec une base de donnée).

Certains logiciels comme *ASSIST* (Davis, 2002), *SketchIt* (Stahovich, 1996) ou *UDSI* (Notowigigdo, 2004) proposent déjà d'interpréter en temps réel les traits d'une esquisse à la main, sans avoir besoin de spécifications préalables, pour produire une géométrie, mais ils se limitent à une production en 2D et sont surtout appliqués à la mécanique.

Du côté de l'architecture, nous désirons dépasser l'outil développé pour l'architecture par Valveny et Marti (2000) basé uniquement sur la reconnaissance des symboles architecturaux en plan. Nous désirons aller au-delà également de celui, toujours pour l'architecture, de Lee (*et al.*, 2008) qui nécessitait de calibrer préalablement le point de vue qui serait ensuite employé dans la génération du modèle 3D et de spécifier et figer les surfaces directionnelles principales.

Nous nous différencions de *Sketching Reality* (Chen *et al.*, 2008), qui interprète des esquisses à la main pour générer des rendus 3D réalistes, de *Isom* (Jamagne, 1991), qui produit un modèle sémantique à partir d'une géométrie 3D, et de *Topologic* (Aish *et al.*, 2018), qui génère des modèles 3D topologiques à partir de modèles 3D géométriques, en proposant une instrumentation qui interprète des esquisses CAD ou à la main pour générer un modèle sémantique et un modèle 3D géométrique.

Notons que les recherches récentes en termes de reconnaissance d'esquisse traitent presque exclusivement de l'architecture logiciel et des performances des systèmes neuronaux ou de deep learning et ne sont mises en pratique que sur des tâches d'interprétation de dessins d'objets du quotidien (comme *SketchPointNet* de Wang (*et al.*, 2018) ou *SketchGAN* de Liu (*et al.*, 2019)). Elles ne sont pas appliquées à la conception. Quand elles traitent de l'architecture, alors c'est au départ de plan CAD ou de modèle 3D que la reconnaissance est effectuée, et non d'esquisses à main levée (comme *GAN* de Huang et Zheng (2018) ou *Topologic* de Aish (*et al.*, 2018)).

Notre proposition s'inscrit en fait dans la continuité des travaux de recherche sur l'interprétation d'esquisses comme *Isom* (Jamagne, 1991), *EsQUIsE* et *NEMo*. En effet, l'interprétation d'esquisses nous apparait comme une solution prometteuse vis-à-vis des challenges de la transition de l'idéation au modèle BIM. Comme vu ci-dessus, il existe déjà plusieurs recherches et prototypes logiciels d'interprétation d'esquisses aux fonctionnalités diverses. Les trois présentés ci-après nous intéressent particulièrement dans ce contexte. Le modeleur *Isom*, développé par Jamagne, permet de générer un modèle 3D du bâtiment à partir d'un modèle sémantique du bâtiment (Jamagne, 1991). *EsQUIsE*, un autre logiciel modeleur, développé par Leclercq, Juchmes et Azar (2004), offre la possibilité de modéliser directement à partir des esquisses architecturales. Grâce à un système multi-agent, il est capable d'interpréter les plans et de générer un modèle 3D du bâtiment, visible ci-après (figure 34, 35), ainsi qu'un modèle sémantique du plan. Ce dernier est ensuite utilisé par le logiciel pour réaliser plusieurs simulations et évaluations d'application constructives (Leclercq & Juchmes, 2002; Juchmes, Leclercq & Azar, 2004). Pour aller au-delà des limites présentées par *EsQUIsE*, Demaret et Leclercq (2011, 2012) ont développé *NEMo*. Ce logiciel peut reconnaître les dessins à main levée sur base des différents symboles conventionnels utilisés en architecture. Ce logiciel génère ensuite un modèle 3D du bâtiment, dont un exemple est illustré ci-après.

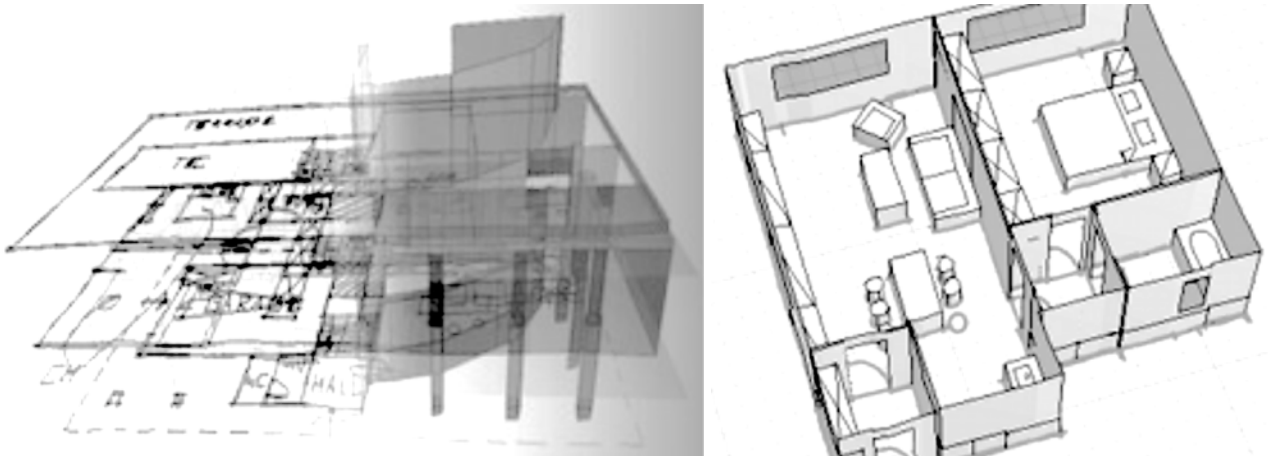


Figure 34. Illustration des modèles produits par EsQUISE, à gauche, et NEMO, à droite (site web du LUCID-ULiège).

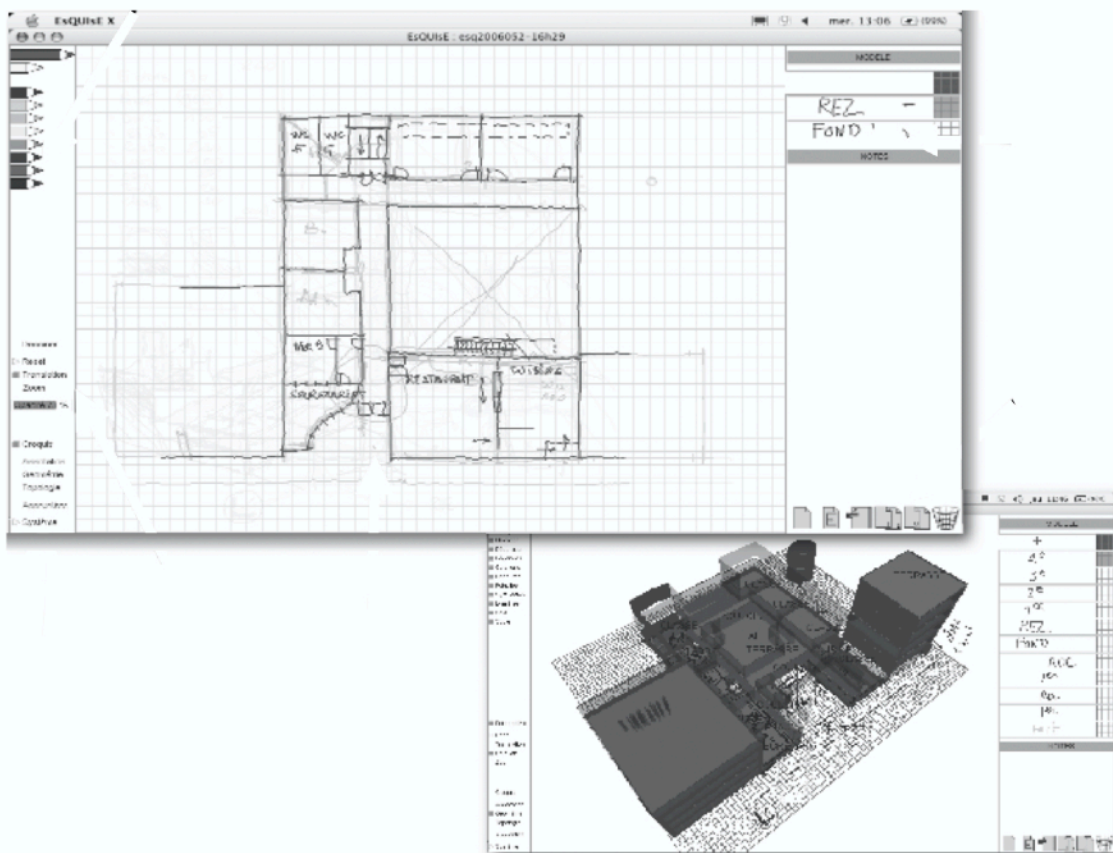


Figure 35. Illustration de l'interface d'EsQUISE (Safin, Leclercq & Decortis, 2007, p.11).

Nous nous inscrivons dans la continuité d'EsQUISE en termes de structuration de fonctionnement de l'instrumentation. Juchmes et Leclercq (2001) expliquent que ce prototype enregistre, via un module de saisie, chaque action de dessin du concepteur et synthétise les traits. Le mode de synthèse filtre ensuite ces traits pour extraire leurs caractéristiques. Les informations topologiques et géométriques sont analysées pour déduire les différents locaux du bâtiment et leurs fonctions. Le module d'interprétation traduit le plan dessiné en un modèle numérique fonctionnel du bâtiment. Travailler avec un modèle fonctionnel du bâtiment permet de supporter les hauts niveaux d'abstraction de l'activité de conception et d'alimenter les différents outputs alors même que le projet n'est pas finalisé.

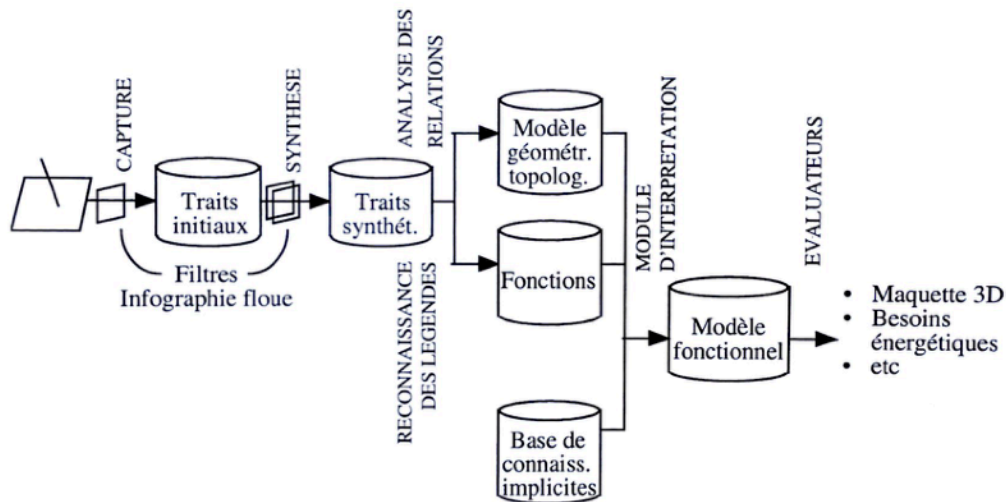


Figure 36. Structure procédurale du prototype EsQUISE (Juchmes & Leclercq, 2001, p. 130).

Les recherches ayant mené au développement de ces deux derniers prototypes logiciels sont réactivées à un niveau de détail similaire à celui de *NEMO* mais nous dépasserons son application principalement constructive : nous visons l'ajout d'informations à un niveau plus abstrait pour porter également le sens architectural des espaces et ainsi capturer l'information actuellement manquée par le BIM comme les intentions d'ambiances, les espaces, les choix de conception, etc (Baudoux *et al.*, 2022). Au-delà des aspects opérationnels de reconnaissance des traits composant un dessin, ayant déjà amené à des prototypes viables dans les années 2000, nous questionnons ici la documentation des modèles générables, quelles informations y ranger et comment, ainsi que leur place dans le processus existant de transition.

6.2.2 Principe proposé pour une transition alternative

Le principe que nous proposons (Baudoux *et al.*, 2022) pour lisser la transition est illustré ci-après et détaillée dans les points suivants.

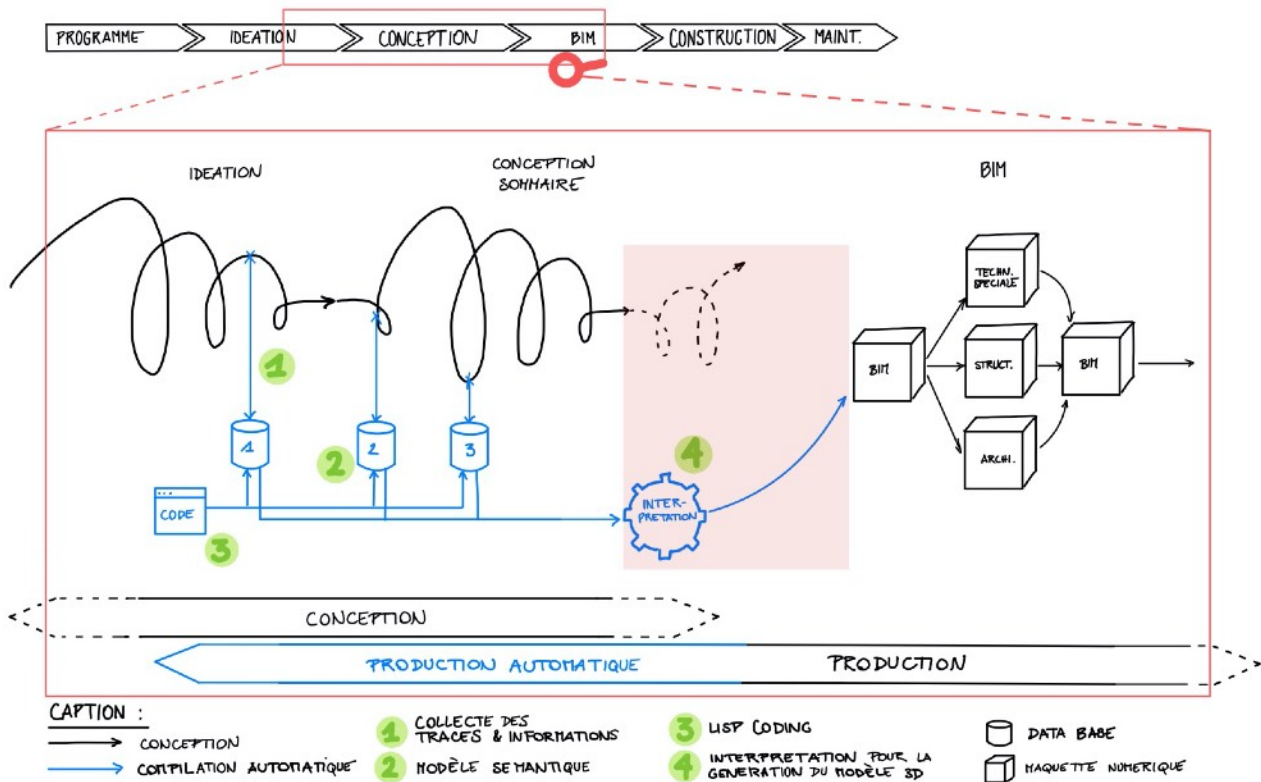


Figure 37. Modélisation du principe de transition alternative proposé (Baudoux *et al.*, 2022).

6.2.2.1 Captation des informations issues de la conception

Le principe (Baudoux *et al.*, 2022) commence par collecter les informations essentielles pour le concepteur tout au long du processus de conception, tout en préservant la nature itérative et convergente de son activité sans l’interrompre ni la modifier. La collecte sera effectuée en utilisant les traces graphiques réalisées telles que les croquis ou les plans de DAO (point 1 sur la figure 37). En effet, extraire les informations des traces contenues dans diverses représentations nous assure de ne pas contraindre la pratique de conception en imposant un nouveau formalisme de communication propre/spécifique à l’outil. En outre, comme nous l’avons vu dans une étude sur les artefacts mobilisés par les concepteurs (Baudoux *et al.*, 2020) ainsi qu’au point 3.2.2.3 du chapitre 3, les esquisses à main levée sont le moyen privilégié de conception. La collecte peut être réalisée sans nécessiter d’action des concepteurs, et cette notion d’intégration du concepteur sera abordée étudiée en section 8.2, au chapitre 8.

Ces informations collectées sont ensuite enregistrées dans un modèle sémantique, *i. e.* une représentation schématique structurée répertoriant les différentes caractéristiques du bâtiment et leurs relations entre elles dans un ensemble normé (point 2 sur la figure 3). Dans ces attributs du bâtiment, mettons en évidence :

- les différents espaces et leurs relations (adjacentes, connectées, empêchées, ...) ;
- leurs frontières (conditionnant la vue ou non, isolante thermiquement/acoustiquement ou non, leurs compositions, ...) ;
- leurs caractéristiques (surface, fonctions, chauffé ou non, humide ou non, ...) ;
- mais également les différents aménagements de ces espaces (mobilier, relations entre les éléments, matériaux, ...).

Un exemple de modèle sémantique du bâtiment est visible à la figure 41.

Traduire ces attributs en modèle sémantique du bâtiment en conception permet de représenter le projet à un haut niveau d'abstraction, essentiellement topologique (c'est-à-dire relatif aux notions de délimitation spatiales propres aux caractéristiques géométriques). Bien que capitalisé de manière abstraite, l'ensemble des *éléments* demandés complémente les données métriques attendues du BIM. Il est ainsi possible d'y faire figurer toutes les informations conceptuelles, comme les intentions, les ambiances, les logiques de décision, etc., qui trouveraient difficilement leur place dans d'autres modes de représentation.

Notons que ce modèle est généré automatiquement à l'aide un Système Multi-Agent (SMA), c'est-à-dire d'après Ferber (1995) un système composé d'un ensemble d'agents (par exemple, concepteurs, logiciels) partiellement autonomes interagissant les uns avec les autres selon des règles et opérations diverses, dans un environnement. Ainsi, cela n'ajoute pas de tâches supplémentaires à l'architecte et donc cela n'alourdi pas sa charge cognitive ni allonge l'activité de conception. Les systèmes multi-agents présentent une approche novatrice en matière de modélisation et de simulation, car ils permettent de représenter directement les individus, leurs comportements et leurs interactions, offrant ainsi une solution radicalement différente à la modélisation traditionnelle observée (Ferber, 1995).

6.2.2.2 Nouvelle transition vers le BIM

Une fois ce nouveau modèle sémantique généré et les *éléments* issus des traces graphiques du processus collectés, l'ensemble de ces informations caractérisant le bâtiment seraient exploitées pour créer un modèle 3D numérique, nommé Modèle Numérique Architectural. Cette modélisation associant ainsi tous les attributs à la géométrie du projet faciliterait son implémentation dans une maquette BIM (point 4 sur la figure 37).

L'avantage de cette approche consiste :

- en un gain de charge cognitive : les opérations sont automatisées et donc ne sont plus à la charge des concepteurs ;
- en un gain de temps puisqu'il ne faudra pas éplucher les documents du projet pour modéliser manuellement toutes ces informations dans le modèle 3D.

Le Modèle Numérique Architectural serait en outre plus complet puisque les informations conceptuelles issues du modèle sémantique apportent une dimension de lecture supplémentaire à la maquette BIM. Dans la suite du manuscrit, nous parlerons d'Interpréteur pour désigner ce logiciel de génération automatique à partir des esquisses.

6.2.2.3 Mise en pratique du principe de transition proposé

Afin d'illustrer plus concrètement ce principe, prenons un plan dessiné par un architecte lors d'un projet témoin et générons, théoriquement et manuellement pour l'instant, le modèle sémantique et la collecte des *attributs* du projet.

Pour ce projet témoin, nous travaillons avec un projet simple, qui consiste en la conception d'une habitation mitoyenne à deux niveaux pour un jeune couple. Le programme se veut classique et comprend un séjour avec cuisine équipée, deux chambres avec chacune une salle de bain et un garage accueillant une moto. Nous disposons des documents suivants, réalisés par l'architecte :

1. une implantation « vide » : représentant rapidement les indications de mesure du terrain et l'emprise des bâtiments mitoyens ;
2. un schéma de répartition et d'adjacence des fonctions attendues ;
3. le plan du rez-de-chaussée de l'habitation qui spécifie l'agencement spatial mais aussi l'aménagement des locaux.

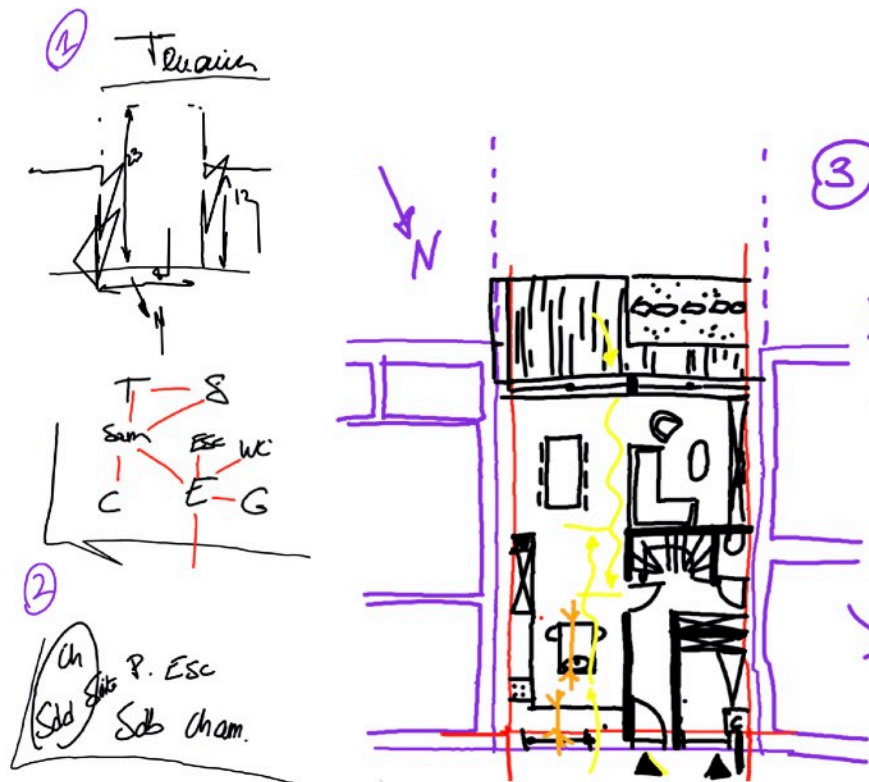


Figure 38. Traces graphiques du projet témoin, réalisées par le concepteur de l'expérience zéro discutée au chapitre 8.

Parmi les différents éléments composant les esquisses architecturales, nous détaillons, sur base des travaux de Leclercq (1994), une classification en 4 classes (figure 39):

- les éléments architecturaux, regroupant d'un côté les zones et de l'autre les axes ;
- les éléments d'équipement, avec la sous-classe de mobilier et celle de réseau ;
- les éléments constructifs, désignant d'une part les composants de fermeture (murs, cloisons, colonnades) et de l'autre les percements (baies et portes) ;
- les éléments d'environnement.

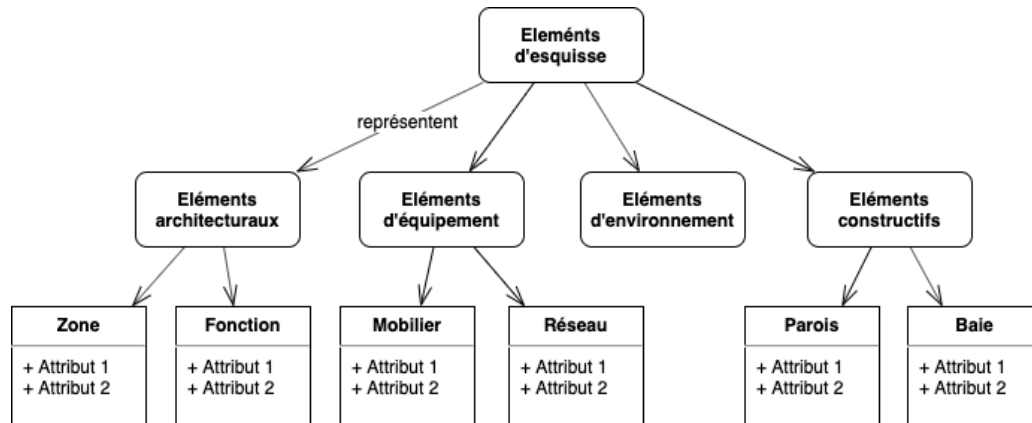


Figure 39. Classes-mères de composants d'esquisses architecturales (détaillées au départ de Leclercq, 1994).

Chaque élément peut en outre être décrit par des attributs qualitatifs : matériau, teinte, intention, etc. Des caractéristiques métriques peuvent également être spécifiées comme : la portée de la poutre prolongeant le mur de refend, la surface de chaque chambre et du séjour, la longueur cumulée de plan de travail, la distance entre les différents points d'eau et la gaine technique, etc. Ces attributs sont spécifiés par le concepteur (par annotation ou vocalement) ou sont déduits par le système. Concrètement, à titre d'exemple, des attributs qualitatifs précis comme les matériaux devront être spécifiés par des annotations textuelles. Des surfaces de locaux pourront être déduites par calcul au départ des cotes du plan, spécifiées, elles, par le concepteur. Pour d'autres caractéristiques métriques, elles pourront être approximativement déduites, en sachant que les concepteurs dessinent toujours à échelle proportionnelle les éléments d'un plan (Elsen & Leclercq, 2007), des éléments aux dimensions standard universelle comme une porte simple.

A partir de ces traces graphiques nous pouvons réaliser le modèle 3D géométrique, du bâtiment duquel peuvent être extraits les plans et des coupes, à gauche sur la figure 41, et le modèle sémantique du projet, à droite sur la figure 41.

Précisons que dans ses travaux, Leclercq (1994) avait déjà étudié les ontologies bâtiment et les modèles sémantiques au départ des tracés extraits d'esquisses. Le focus de ses recherches portait principalement sur ce qu'il a appelé « interface » dans le schéma ci-après (figure 40), c'est-à-dire les traits et traces composant l'esquisse. Nous nous concentrons, quant à nous, dans cette recherche, spécifiquement sur la partie « modèle », c'est-à-dire le contenu, les informations sémantiques, porté par les esquisses.

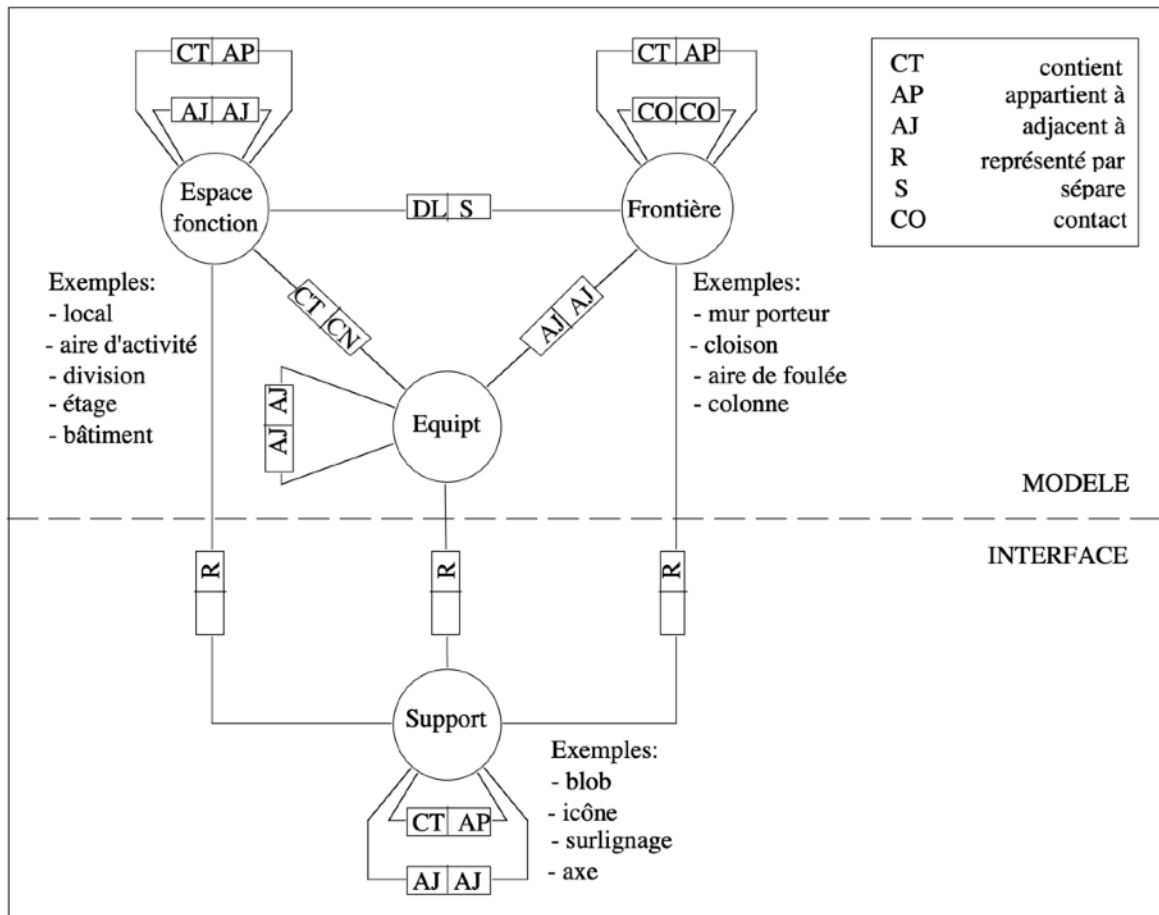


Figure 40. Diagramme NIAM représentant les différents éléments de l'esquisse architecturale (Leclercq, 1994, p. 201).

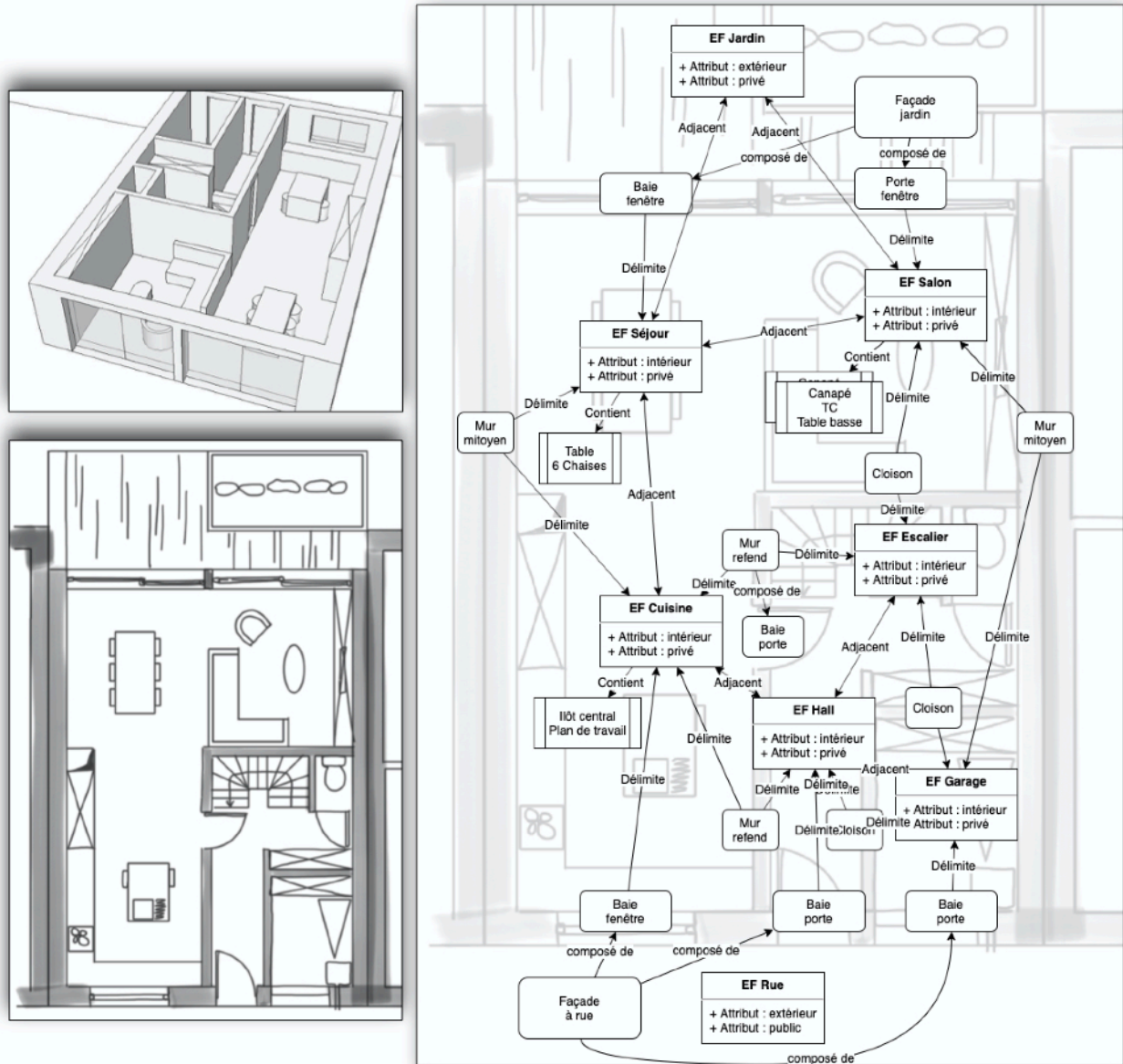


Figure 41. Représentations obtenues durant la transition pour le projet témoin, ici pour le rez-de-chaussée, reprenant le modèle 3D géométrique sommaire, le plan CAD et le modèle sémantique instancié (ici non-exhaustif dans les relations entre instances pour des raisons de compréhension visuelle) (Baudoux et al., 2022).

Ce modèle sémantique peut être élaboré comme suit. Les figures suivantes illustrent la progression d'apparition des composants de l'esquisse et d'élaboration du modèle sémantique.

1. Nous commençons par identifier les différents éléments architecturaux composant l'esquisse. D'une part, sont listées chacune des zones, c'est-à-dire chaque espace-fonction¹², composant le projet. Citons, dans cet exemple-ci, la « cuisine », le « hall » ou encore la « zone de circulation ». Ces fonctions sont identifiées par reconnaissance d'écriture et/ou par reconnaissance de mobilier témoin (canapé, cuisinière, baignoire, ...). Reconnaître ces fonctions amène des valeurs comme la température de consigne de la pièce, le niveau acoustique, le niveau d'intimité, etc. D'autre part, sont identifiés, par reconnaissance d'annotations (grand traits d'axe, surlignés ou de couleur), les différents axes structuraux du plan, c'est-à-dire les lignes de trame ou de force structurant le plan, ici les deux « axes mitoyens » et l'« axe de refend ».

2. Nous identifions également les éléments d'environnement comme, ici, le « jardin » et la « rue », par déduction des annotations du concepteur.

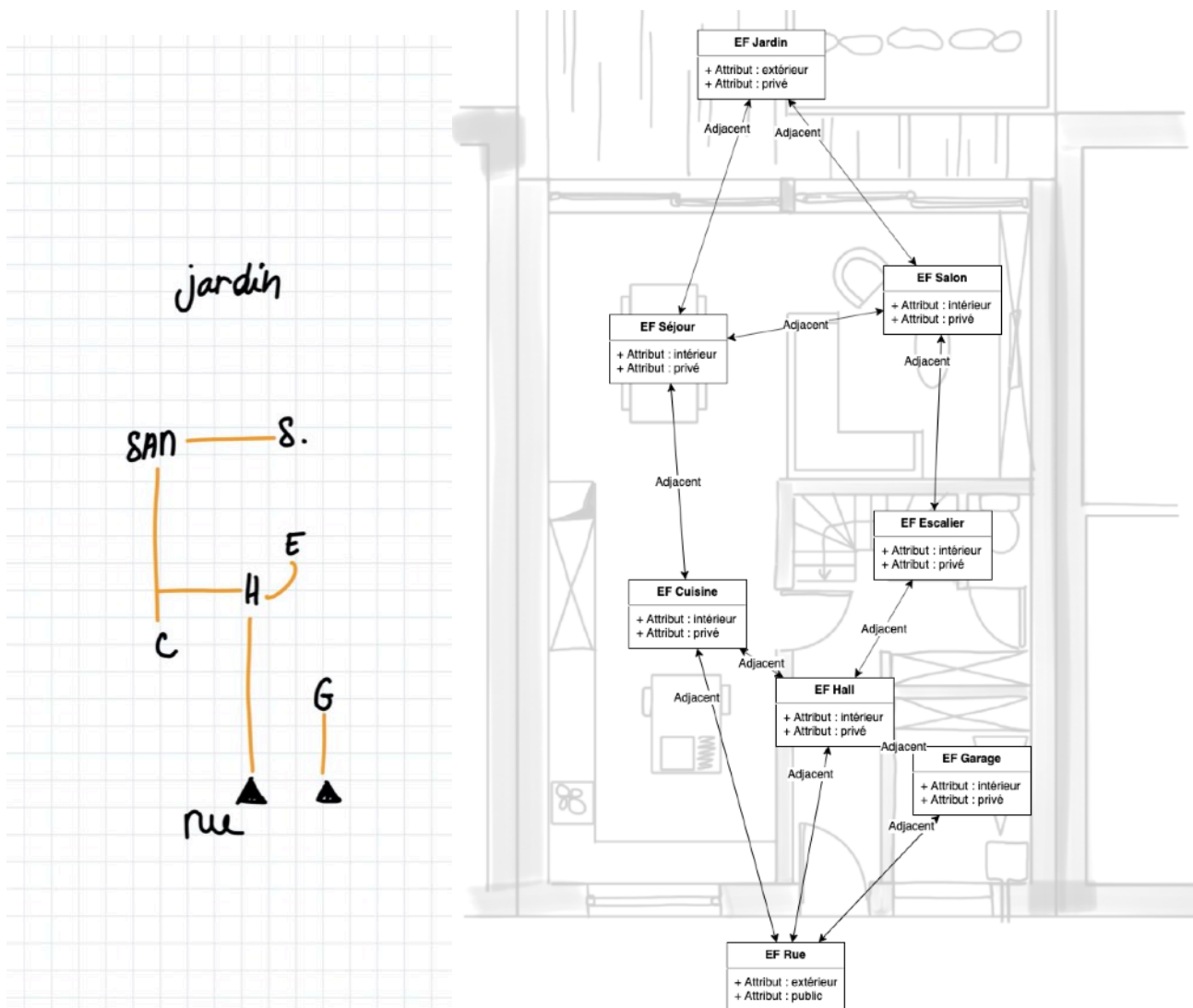


Figure 42. Modèle sémantique instancié, ici avec les éléments architecturaux et d'environnement.

¹² Un espace-fonction est une zone spatiale attribuée à une fonction.

3. Par après, nous identifions les éléments constructifs de fermeture (e.g. « façade jardin », ou « mur mitoyen ») et nous détaillons les sous-composants de percement de ces frontières (e.g. « porte » ou « fenêtre »), reconnaissables à leur codes de dessin.

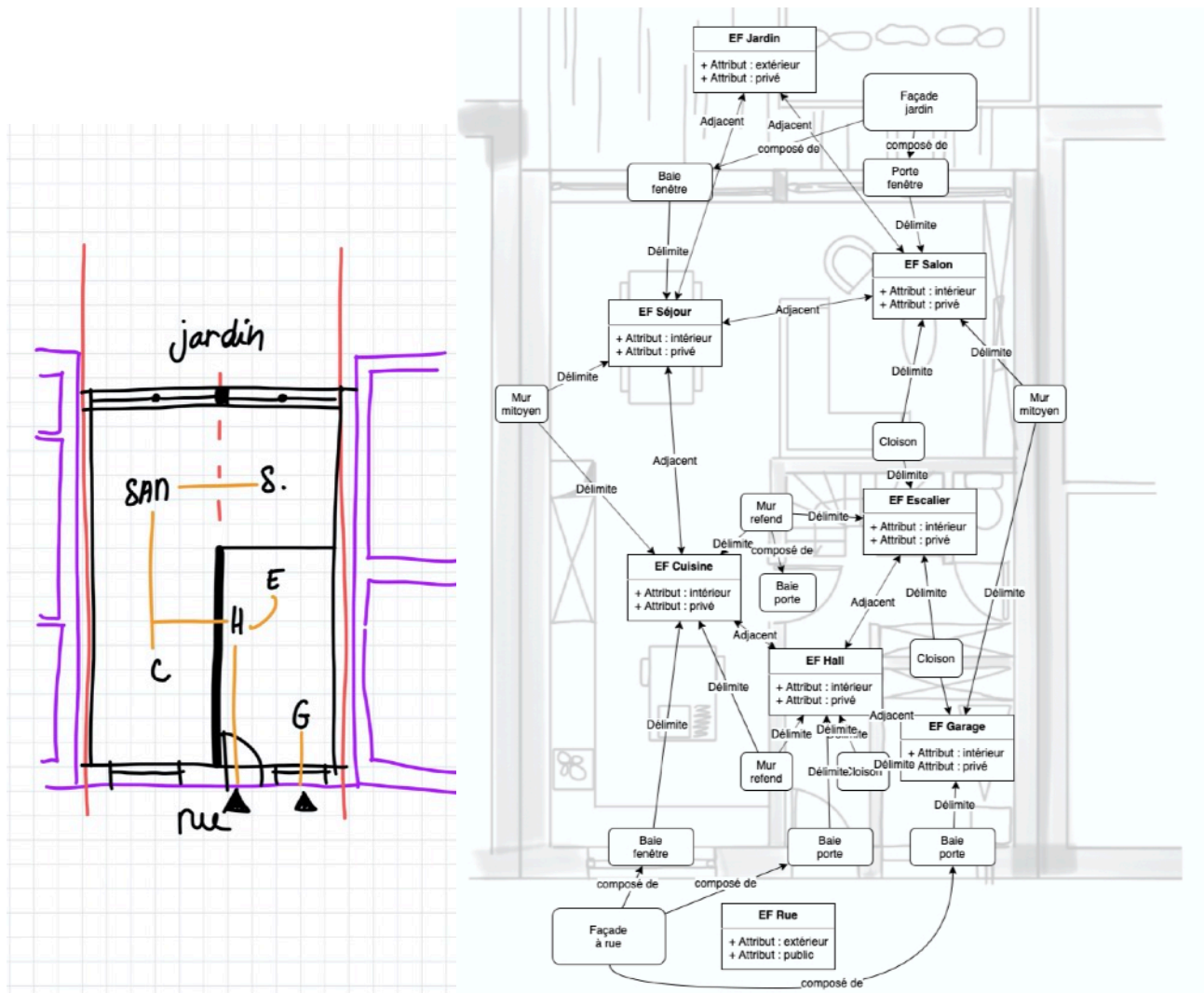


Figure 43. Modèle sémantique instancié, additionné des éléments constructifs.

4. Nous identifions ensuite, au sein des zones, les différentes pièces de mobilier ainsi que les composants des réseaux de plomberie, d'électricité ou de chauffage. Dans cet exemple-ci, nous ajoutons aux encarts déjà présents les « tables », « chaises », « îlot central », « plan de travail », etc. Ces éléments de mobilier sont reconnus par similarité avec une banque de donnée de mobiliers et leurs différentes représentations possibles en esquisse, comme NEMo (Leclercq & Demaret, 2011, 2012) le faisait.

5. Finalement, nous caractérisons les relations entre ces composants (e.g. ...adjacent..., ...délimite..., ... composé de...).

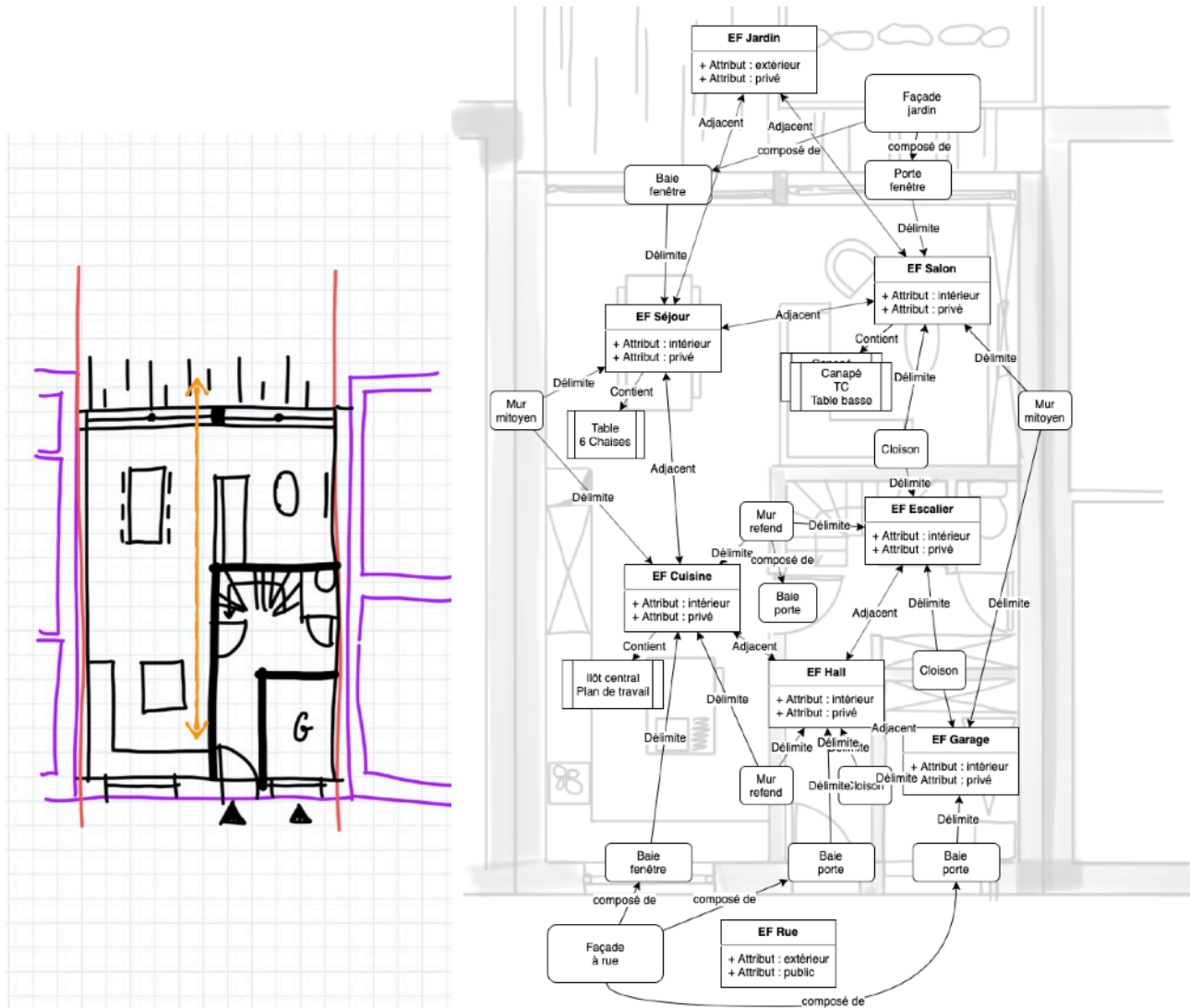


Figure 44. Modèle sémantique instancié, additionné des éléments d'équipement.

6.2.3 Bénéfices du principe proposée

Ce principe d'instrumentation présente plusieurs avantages, car il permet de résoudre le problème des deux fractures explicitées au point 6.1.2 qui surviennent lors de la transition de la phase d'idéation au modèle BIM. Il offre également une instrumentation méthodologique et numérique à la conception pour transférer plus efficacement les informations nécessaires d'une phase à l'autre, tout en respectant les processus complexes des concepteurs.

Ainsi, comme expliqué dans notre article (Baudoux *et al.*, 2022), avec notre proposition, la première fracture peut être évitée puisque la conception perdure tout en alimentant automatiquement la production. Les médias conventionnels, c'est-à-dire utilisés habituellement, ne sont plus arbitrairement et subitement remplacés, mais sont conservés tout au long de la conception.

La seconde fracture est également évitée puisque le modèle sémantique est automatiquement généré sur base des traces graphiques capturées tout au long de la conception. Ce modèle sera ensuite interprété automatiquement par un logiciel générant le Modèle Numérique Architectural qui alimentera la maquette BIM.

La transition se veut ainsi plus fluide, c'est-à-dire sans interruption d'activité, sans perte d'information et en allégeant cognitivement les concepteurs. Ceux-ci peuvent dès lors porter leur attention uniquement sur la conception proprement dite.

6.2.4 Perspectives pour la suite de cette thèse

Les précédents chapitres nous ont permis de cerner et de discuter des limites propres à la transition de l'idéation au modèle BIM. Nous avons élaboré un principe d'instrumentation théorique (l'Interpréteur) pour répondre à ces limites. Maintenant, nous devons examiner de manière plus approfondie la mise en œuvre de cette proposition.

Ainsi, il nous faut cerner précisément où et comment prélever les attributs caractérisant le projet pendant la conception : à partir de quelle(s) représentation(s) et au moyen de quel(s) média(s).

Premièrement, il nous faut, dans un **questionnement sémantique**, éclaircir comment évolue cette information, comment se transforme-t-elle au travers des activités de conception. Ainsi nous pourrions caractériser ce qui est au cœur même de la transition, l'actuelle comme l'alternative. Ce sera l'objet du chapitre 7.

Deuxièmement, en partant de l'hypothèse que cette instrumentation logicielle est développée et implémentée, il est important, dans un **questionnement d'IHM**, d'évaluer la manière de retourner les informations collectées et les modèles générés au concepteur. Il convient de se demander s'il est préférable de produire les modèles en arrière-plan sans que les concepteurs en soient conscients, ou s'il serait plus bénéfique pour l'activité de conception de leur donner accès à ces modèles. Dans ce dernier cas, il faut également déterminer s'il est préférable de permettre un accès sur demande ou en temps réel. Nous mènerons ces analyses en première partie du chapitre 8.

Finalement, il nous faudra établir, dans un **questionnement technique**, comment précisément extraire le sens des traces graphiques et les informations qu'elles contiennent : quels sont les codes naturels d'architecture que nous pouvons utiliser, par quoi les compléter ; quelles sont les traces facilement utilisables. Nous traiterons cet aspect en seconde partie du chapitre 8.

Pour synthétiser, nous proposons d'extraire l'information des traces graphiques pour générer automatiquement un Modèle Numérique Architectural destinée à favoriser la création de la maquette BIM. A cette fin, il nous faut savoir **quoi** extraire, **d'où**, **comment** et avec **quel impact**, positif ou négatif engendré sur l'activité de conception.

Dans ce chapitre, nous avons mis en avant les différentes limites de la transition actuelle. Elle présente tout d'abord une triple fracture. Celle-ci est premièrement constituée par un changement imposé de la nature des activités passant de la conception à la production. Deuxièmement un changement de médias de conception est imposé. Et troisièmement, une perte d'informations apparaît, compensée en partie seulement par l'ajout de supports d'informations et d'échanges complémentaires parallèlement aux maquettes BIM. Une fois une maquette BIM sommaire réalisée, une deuxième fracture surgit puisque celle-ci est peu exploitable et doit être manuellement remodelisée pour servir à la suite du processus BIM.

Nous proposons un principe de formalisation sémantique du bâtiment pour palier à ces deux fractures et alimenter plus aisément la maquette d'exploitation du BIM. Notre réflexion s'inscrit dans la continuité de plusieurs travaux de recherche menés au sein du laboratoire LUCID-ULiège sur la problématique de l'interprétation d'esquisses. Le logiciel EsQUIsE interprétait les croquis d'architectes à l'aide d'un système multi-agents pour fournir un modèle sémantique du plan esquissé destiné à l'évaluation du projet. Par la suite, le logiciel NEMo interprétait des croquis dessinés à la main pour générer un modèle 3D en reconnaissant les différents symboles architecturaux, même en cas d'incompatibilité.

Dans ce travail, nous proposons de collecter automatiquement, tout au long du processus, les informations utiles à partir des traces graphiques, déjà codifiées, des concepteurs. Ces informations seront ensuite modélisées automatiquement dans un modèle sémantique, riche en sens. Sur base d'une ontologie spécifique, un Interpréteur pourra dès lors interpréter les attributs du projet pour générer automatiquement un Modèle Architectural Numérique qui facilitera l'implémentation des informations du projet à la maquette numérique BIM.

Avec notre proposition, la première fracture pourra être évitée puisque la conception pourra perdurer tout en alimentant automatiquement la production. Les médias conventionnels utilisés habituellement ne seront plus arbitrairement et subitement remplacés, mais pourront être conservés pour la suite de la conception. L'information nécessaire sera ancrée dans le modèle sémantique qui alimente la maquette BIM. La seconde fracture sera également évitée puisque le modèle sémantique sera automatiquement généré à partir des traces graphiques capturées tout au long de la conception. Ce modèle sera ensuite interprété automatiquement par un logiciel générant le modèle sémantique 3D, alimentant directement la maquette BIM.

La transition sera ainsi plus fluide, sans interruption d'activité et sans perte d'information. En outre, la charge cognitive du concepteur ne sera pas altérée, lui permettant de porter principalement son attention uniquement sur la conception proprement dite. (Baudoux *et al.*, 2022, p. 7)

In this chapter, we have highlighted the various limitations of the current transition. First of all, it presents a first split. Firstly, there is an imposed change in the nature of activities from design to production. Secondly, a change of design media is imposed. And thirdly, there is a loss of information, which is only partly offset by the addition of complementary information and exchange media in parallel with BIM models. Once a rough BIM model has been produced, a second split arises as it is hardly usable and has to be manually remodeled to serve the rest of the BIM process.

We propose an alternative to this transition through a method of semantic formalisation of the building feeding the BIM. Our reflection is the continuation of several research works carried out in the LUCID-ULiège lab addressing the issues of sketch interpretation. EsQUIsE software interpreted architects' sketches using a multi-agent system to provide a semantic model of the sketched plan intended for the building evaluation. Subsequently, NEMO software interpreted hand-drawn sketches to generate a 3D model by recognizing the different architectural symbols even with incompatibilities. In our thesis, we propose to automatically collect, throughout the process, useful information from the already codified graphical traces of the designers. This information will be automatically modeled in a semantic model, rich in meaning. Based on a specific ontology, a software can therefore interpret these project's attributes to automatically generate a 3D model of the building under design that can be more directly implemented in the BIM digital model.

With our proposal, « the first split can be avoided since the design can continue while automatically feeding the production. The conventional media normally used will no longer be arbitrarily and suddenly replaced but can be retained for the remainder of the design. And the necessary information will be anchored in the semantic model that feeds the BIM model. The second split will also be avoided as the semantic model will be automatically generated from the graphical traces captured throughout the design process. This model will then be automatically interpreted by software generating the 3D semantic model, feeding directly the BIM model. This will make the transition smoother, without activity interruptions and without information loss. In addition, the cognitive load of the designer will not be altered, allowing him to focus his attention mainly on the design itself. » (Baudoux et al., 2022, p.7)

*A detailed content, in English, of this chapter has been published in :
« Baudoux G., Leclercq, P. (2022). Usability of BIM in preliminary design: a study of the relevance of the different representations allowed by BIM, 19th CDVE conference, Poland » and « Baudoux G., Calixte, X., Leclercq, P. (2022). From architectural ideation to BIM: Method of Semantic Formalisation of the Building, 40th eCAADe conference, Belgium »*

Chapitre 7

L'information en conception

Notre proposition de transition implique la récolte et l'articulation de l'information issue du travail d'idéation. Ainsi, ce chapitre se concentre sur l'analyse de ces données à capturer et articuler. Pour l'étudier, nous changeons de paradigme, en considérant les concepteurs comme des passeurs d'information, et cette dernière comme le coeur de notre questionnement.

Nous observons in-situ un processus de conception intégrée à différentes granulométries temporelles (de la dizaine de secondes à la semaine) pour comprendre comment évolue cette information au travers des transformations de représentations tout au long du processus. Nous caractérisons son niveau d'abstraction, les médias via lesquels elle est générée et véhiculée et le rôle de la trace graphique dans son évolution.

***A**s our transition proposal aims at collecting and articulating the information of the ideation work. This chapter therefore focuses on the analysis of the data to be captured and articulated. To do so, we change the paradigm, considering the designers as transmitters of the information, and this information as the core of our questioning.*

We will observe in-situ an integrated design process at different temporal scales (from dozens of seconds to week) in order to understand how this information evolves. We will characterize its level of abstraction, the media through which it is generated and conveyed and the role of the graphical trace in this evolution.

7.1 Cadre d'étude de l'évolution de l'information

Les activités de conception transformant le projet architectural et les activités des concepteurs ont déjà été largement étudiées et ont fait l'objet de nombreuses recherches, dont les principales ont été résumées dans l'article soumis à la conférence ModACT'23 (Baudoux *et al.*, 2023a).

De nombreux chercheurs se sont penchés sur la conception et la synthétisent en divers modèles d'activité générale, comme le modèle de Simon (1969) décrivant la conception comme une activité de résolution en trois étapes structuration-génération-évaluation, l'activité opportuniste de transformations successives *see-transform-see* de Schön (1983), ou encore le modèle *Function-Behaviour-Structure* proposé par Gero (1990).

Les activités de conception transformant l'objet architectural et les activités des concepteurs ont, elles aussi, fait l'objet de plusieurs études. Elles ont été étudiées par le prisme des outils dont notamment la théorie de l'activité de Engeström (1987) introduisant le triangle sujet-objet d'action-objet médiateur, ou l'approche instrumentale de Rabardel et Beguin (2000) apportant la notion d'instrument comme objet auquel un schème d'usage est appliqué, ou encore les travaux de Latour (2006, 2008) considérant les objets médiateurs comme acteurs dans la conception au même titre que le concepteur. Retenons également les études prenant le prisme des activités cognitives comme les travaux d'ergonomie de Falzon (2004, 2005), ou ceux de Darses (2009) portant sur la résolution de problème, ou encore les études de Détienne consacrées aux activités cognitives collaboratives (2007, 2021). Finalement, le design thinking a également fait l'objet d'études, notamment par Gero et Milovanovic (2020), dans la définition d'un cadre d'analyse de l'activité de conception incluant également la cognition, la physiologie et la neuro-cognition propres à cette conception.

Dans le cadre de notre recherche, nous analyserons l'activité de conception spécifiquement pour recueillir des connaissances sur la gestion des informations tout au long du processus. Pour étudier l'évolution de ces informations, nous changeons de paradigme par rapport aux travaux précédemment cités. Nous considérons les concepteurs et les objets médiateurs, assimilés à des acteurs selon la théorie de l'acteur-réseau de Latour (2006), comme les passeurs de l'information.

Dans ce chapitre de notre étude, nous positionnons cette information au cœur de nos travaux.

7.1.1 Définition du sujet d'étude : l'information

Au delà de ce que nous considérons, en tant que profane, comme définition de l'information, les spécialistes de l'information préfèrent circonscrire celle-ci au moyen de concepts (Madden, 2000). McCreadie et Rice (*in* Madden, 2000) résument, au travers de leur revue, les concepts de 50 ans de recherche dans les quatre points suivants :

- L'information est une représentation stockée de la connaissance.
- L'information est une donnée, parmi toutes celles de notre environnement, qui est informative lorsqu'elle est interprétée.
- L'information est un composant du processus de communication.
- L'information est une ressource transmise pouvant constituer une valeur ajoutée.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous inscrivons dans le concept de l'information comme une représentation stockée, une donnée, dont la transmission constitue une valeur ajoutée. Dans notre domaine, nous visons donc par le terme *information*, tout attribut du bâtiment, c'est-à-dire toute caractéristique décrivant le bâtiment à venir, le projet de conception ou encore toute raison de

choix de conception. A titre d'exemple, une volonté d'ambiance lumineuse, la forme d'une pièce, la hauteur d'une baie, le matériau d'un mur, la typologie de structure porteuse, etc. sont toutes des *informations* caractérisant le bâtiment. Notons que nous utiliserons sans distinction de sens les termes *information(s)*, *information(s)-projet*, *attribut(s)*, ou *attribut(s) du projet/du bâtiment*.

7.1.2 Processus de conception intégrée : l'Atelier IV

Pour caractériser l'évolution de l'information, nous menons des observations in-situ au sein de l'Atelier d'architecture présenté au chapitre 6. Pour rappel, cet atelier prend place dans le Master 1 de la formation Ingénieur Civil Architecte de l'Université de Liège. En l'année 2020, il consiste à concevoir durant 14 semaines un avant-projet de complexe musical de 7.500m². Ce bâtiment public d'envergure inclut deux salles de concert, des espaces pour les artistes, des loges, des salles de répétition, un restaurant indépendant de production et sa cafétéria associée. Ce processus de conception long est ponctué de revues informelles bi-hebdomadaires avec les encadrants ainsi que de revues formelles avec deux architectes et trois ingénieurs professionnels ayant une longue expérience de ce type de bâtiment (cf. figure 45).

L'une des particularités de ce processus est son caractère collectif. En effet, les 20 sujets observés forment 6 équipes de 3 à 4 concepteurs, réalisant chacune une proposition unique de bâtiment. Il est également important de spécifier que les concepteurs observés sont des concepteurs experts, même s'ils sont étudiants. En effet, les acteurs étudiés se différencient des concepteurs novices en adoptant une approche globale du projet, mettant davantage l'accent sur la recherche de solutions que sur la résolution de problèmes (Milovanovic, 2019 ; Perisic et al., 2019 ; Nespoli et al., 2021). Le programme d'architecture est conçu pour être développé par des équipes de 3 à 4 concepteurs, ce qui nous permet également d'encourager et d'assurer les interactions collectives et collaboratives. Nous avons en outre choisi cet atelier pour deux spécificités qui lui sont propres :

- L'atelier vise à reconstruire le cadre réel d'un projet de concours dans un but pédagogique : ainsi l'information récoltée se veut similaire à celles trouvées dans un cadre en agence ;
- L'atelier est lié à deux autres cours qui se déroulent successivement : le projet de construction mené à l'École IMT Alès et le SDC BIM de l'ULiège. À partir de la documentation de l'atelier, les étudiants en génie civil de l'IMT Alès travaillent sur les aspects de faisabilité des ces projets. Dans un troisième temps, de nouvelles équipes d'étudiants développent dans le cours de SDC les aspects (de formalisme et d'exploitation) BIM de ces mêmes projets.

La particularité de cette collaboration entre les différentes phases du projet réside dans la transmission d'informations d'une étape à l'autre. En d'autres termes, les documents produits par les concepteurs de l'ULiège sont utilisés comme documents de référence pour le travail technique réalisé à l'IMT Mines Alès, et cette documentation sera également utilisée pour développer le projet en BIM dans le cadre du cours de SDC. Les livrables et la documentation transmis par l'équipe de l'étape précédente servent de données d'entrée pour les acteurs suivants afin qu'ils poursuivent la conception technique de l'ouvrage en respectant le concept architectural, les liens fonctionnels et d'autres solutions techniques et environnementales. Pour cela, les équipes des différents cours doivent documenter leur projet et transmettre une trace complète du raisonnement derrière les choix qui ont été faits formalisant par là le pourquoi et le comment (Calixte, Cuffi & Leclercq, 2022). (Voir également l'articulation des cours d'Atelier IV - Projet Bâtiment - SDC BIM en section 6.1.1.2 du chapitre 6).

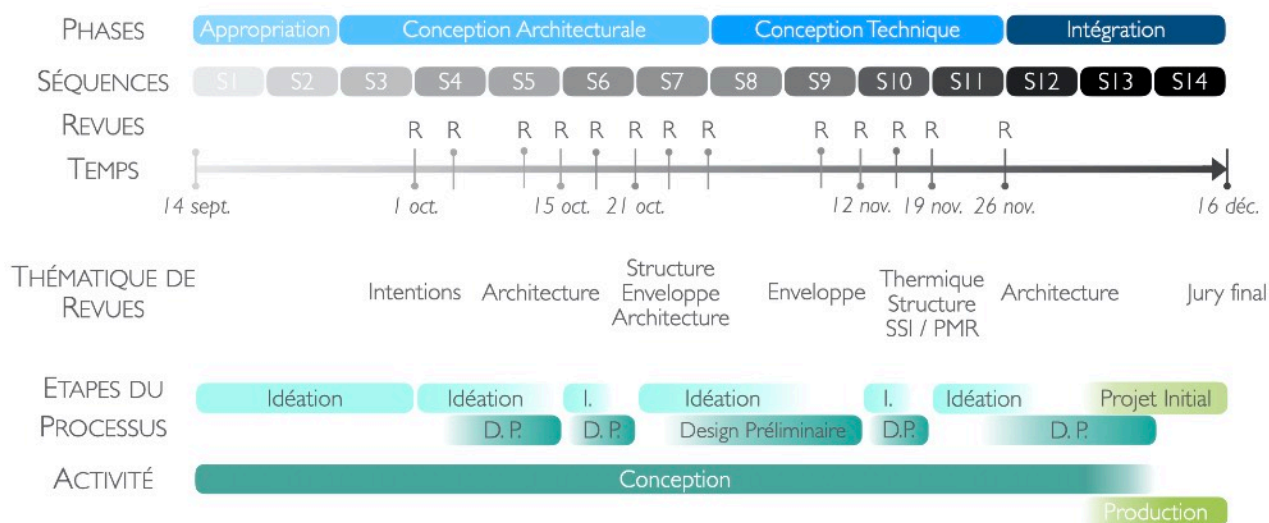


Figure 45. Calendrier du processus de conception intégrée de l'Atelier IV de Master Ir. arch. ULiège.

En nous concentrant sur cet Atelier de master, nous analysons la première étape du processus, à savoir la conception de la proposition formelle, fonctionnelle et technique. Cette partie du processus inclut les activités d'idéation et de design préliminaire. L'ensemble de ces notions renvoie aux concepts décrits en section 2.3 du chapitre 2.

Notre observation nous amène à diviser l'activité en quatre grandes phases (illustrées ci-dessus) : une première phase d'appropriation (compréhension du programme, analyse de bâtiments similaires, recherche de références, ...), une seconde phase de conception orientée vers l'architecture (élaboration du concept, définition de la forme, répartition des fonctions, ...) une troisième phase de conception orientée vers les aspects techniques (matériaux, structure, résolution de problèmes techniques, ...) et finalement un phase d'intégration de tous ces éléments et de production finale. Notons que la thématique d'une revue planifiée (figure 45) influence le travail de conception en amont de celle-ci. En effet, les concepteurs solutionnent en priorité les problèmes de conception relevant de l'expertise du professionnel auquel ils vont exposer leur projet tout en continuant la conception de fond du bâtiment.

7.1.3 Typologies de conception : longue et épisodique

Nos premières observations générales de ce processus (Baudoux & Leclercq, 2022b) nous permettent de différencier deux natures de conception (voir figure ci-après).

La première, que nous appelons **conception de longue durée**, est une activité étalée sur plusieurs jours et dans plusieurs environnements différents. Elle alterne des moments de conception collaborative, sur la même tâche, et de co-conception, sur des tâches différentes mais avec le même objectif. Les médias employés sont variés et choisis par chaque acteur.

A l'inverse, ce que nous qualifions de **conception épisodique** sont des courts moments de quelques minutes de conception collaborative synchrone. L'ensemble des acteurs se penche sur un problème spécifique jusqu'à ce qu'une solution satisfaisante soit trouvée. Le média utilisé pour concevoir est alors commun et unique.

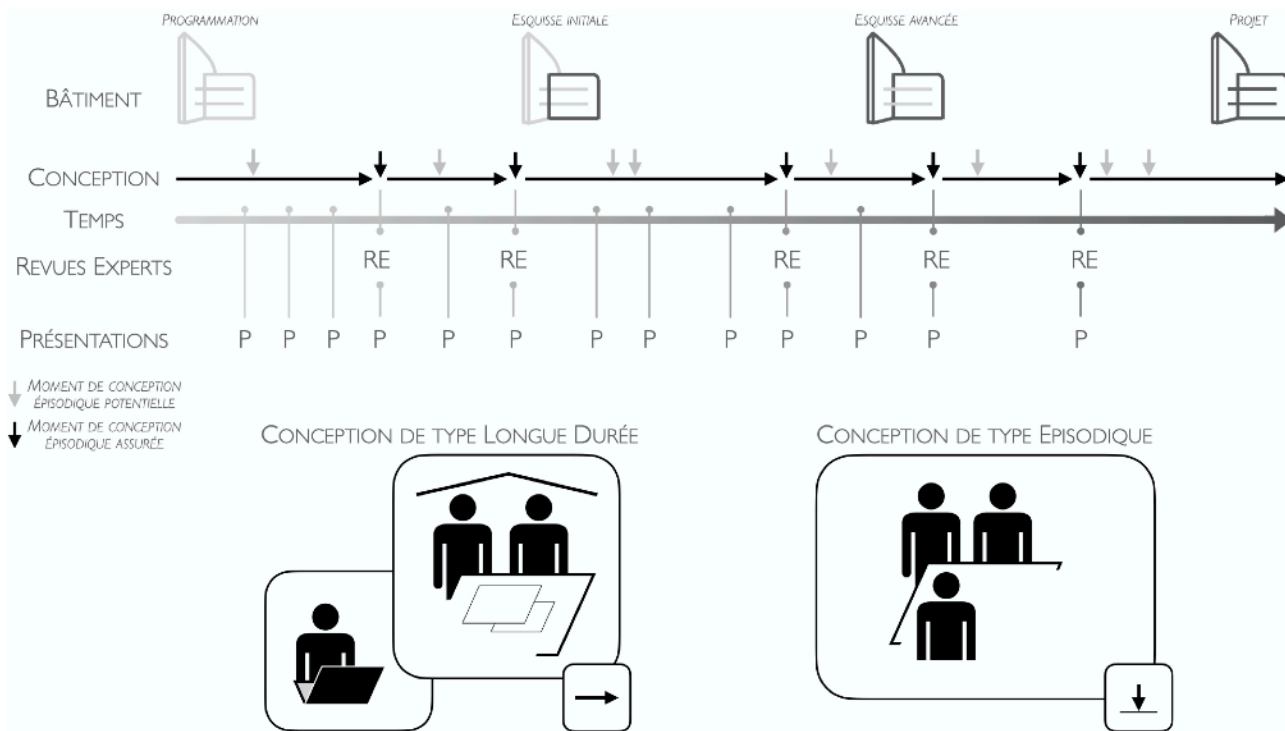


Figure 46. Illustration des deux types de conception et de leur répartition dans le temps (Baudoux & Leclercq, 2023a).

Compte tenu de ce que nous avons expliqué précédemment, nous pouvons considérer que toutes les revues expert, durant lesquelles les concepteurs présentent leurs projets à leur encadrant ou à des professionnels, accueillent des moments de conception épisodique structurés et planifiés par le corps enseignant. Cependant, les concepteurs peuvent également se réunir en groupe pour discuter entre eux en dehors des revues lorsqu'un problème nécessite une résolution collaborative ou si l'équipe décide de faire le point.

La conception longue, quand à elle, a lieu entre tous ces moments de conception épisodique, quand l'équipe de concepteurs élabore le projet.

Il est important de souligner que ces deux types de conceptions, à savoir la conception épisodique et la conception de longue durée, ainsi que leur répartition dans le temps, ont été identifiés à partir de nos observations en milieu pédagogique. Cependant, selon les descriptions des processus d'agence de Stals (2019) et Calixte (2019b, 2021), nous pouvons retrouver ces deux séquences pour tout processus de conception en équipe ponctué de moments de réunion.

7.2 Caractérisation de l'évolution des informations en conception longue

Commençons par étudier l'évolution des informations-projet dans les activités de conception longue. Cette étude, dans son protocole et ses résultats, a fait l'objet de publications en conférences internationales, néanmoins moins détaillées que cette section de thèse (Baudoux & Leclercq, 2021; Baudoux & Leclercq, 2023a).

Ainsi, dans cette section, pour caractériser la conception longue, nous observerons l'évolution des informations tout au long du projet au moyen de synthèses régulières incluant différents critères

de caractérisation. Ces critères nous permettront d'étudier l'évolution du niveau d'abstraction et des types d'information ainsi que les objets médiateurs et représentations ayant respectivement servi à produire et communiquer cette information.

7.2.1 Protocole d'observation de la conception longue

Détaillons ici le protocole mis en place pour mener ces observations in-situ pour la conception longue. Ce protocole détaillé ci-après a été publié par ailleurs (Baudoux & Leclercq, 2023a).

La conception longue a lieu dans des espaces physiques et temporels très variés, du plus facile à capturer, en studio d'architecture, au plus difficile, dans les réflexions fugaces en des lieux et moments quelconques (Safin, 2011; Le Coguiéc, 2012). Nous décidons de traquer l'évolution des informations en récoltant ces dernières de manière régulière. Nous investissons donc les revues informelles avec les encadrants qui ont lieu deux fois par semaine. Ce principe de revues offre un avantage considérable car il synthétise naturellement l'état d'avancement du projet, ce qui permet de collecter toutes les informations pertinentes sur le projet sans imposer aux concepteurs une charge de travail supplémentaire en encodant, par exemple, leurs actions quotidiennes. De plus, la fréquence régulière et nombreuse des revues est idéale et offre une évolution suffisante entre chaque session de collecte.

Nous observons donc un total de 13 revues, pour chacun des six processus des six équipes. Nous recueillons ainsi environ 110 heures d'échanges. La répartition de ces revues dans les phases de conception architecturale et de conception technique est illustrée à la figure 45, section 7.1.2 de ce chapitre.

7.2.1.1 Méthode de récolte des données implémentée dans le processus de conception intégrée

Notre observation respecte la méthodologie générale des observations in-situ non-participantes, détaillées en section 5.2.1.4 du chapitre 5. En effet, nous ne prenons pas part au processus de conception et n'intervenons pas non plus dans la validation ou l'invalidation des propositions architecturales. Nous nous positionnons également en retrait par rapport aux acteurs de manière à les perturber le moins possible.

Les revues ont lieu dans une salle de réunion où les acteurs occupent l'espace comme montré ci-après. Notons qu'en conséquence des mesures sanitaires liées à la pandémie de 2019-2020, certaines revues ont eu lieu en visioconférence, sans que cette particularité n'impacte notre récolte de données. Nous enregistrons, avec son et image, l'ensemble de ces échanges de manière à pouvoir collecter l'ensemble des actions, paroles et documents partagés et ainsi pouvoir y revenir par la suite, si d'autres analyses complémentaires s'avéraient nécessaires.

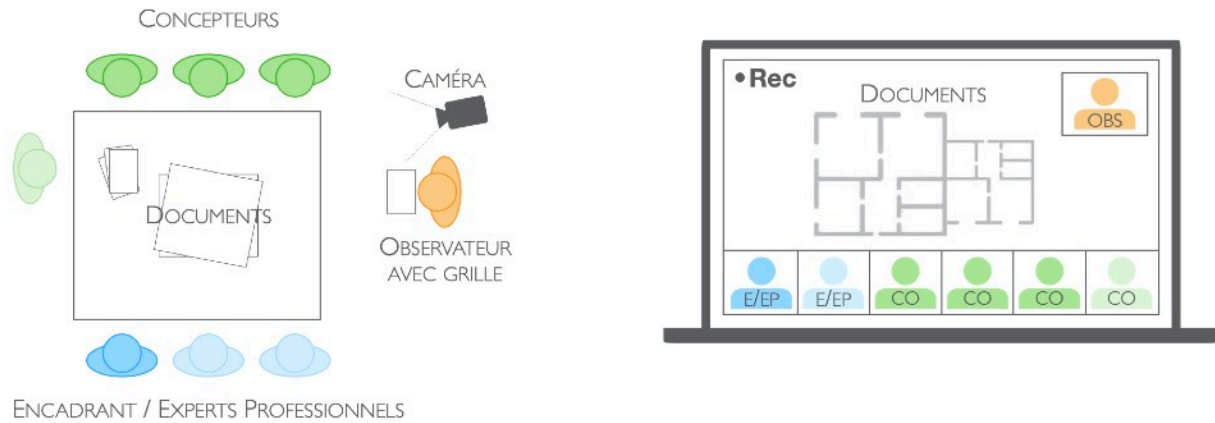


Figure 47. Configuration spatiale de l'observation in-situ : à gauche en présentiel, à droite en distanciel.

Notre objectif est de récolter l'ensemble des informations qui caractérisent le projet. Pour ce faire, nous avons établi une grille d'observation qui est remplie en temps réel, dont un exemple est visible ci-après.

L'ensemble des variables de caractérisation incluses dans la grille est détaillé dans les sous-sections suivantes. Concrètement, pour chaque information discutée lors des revues, nous spécifions : la *typologie de l'information*, le *moyen de conception* (génèse de l'information), la *représentation externe* (figuration et communication de l'information) et la *transformation du projet* (influence de l'information).

Groupe : ACTEURS 2 N° semaine : 11

INFORMATION	TYPE D'INFO	MOYEN DE CONCEPTION							REPR SUPPORT						TYPE TRANSFO PROJET					NUM DOC		
		ref	dess	dess num	DAO 2D	DAO 3D	maqu	para	prot	ref	mot	ann	croq	plan	pers	3D	dup	ajou	dét		conc	mod
1. SCHEMA STRUCTUREL	STRUCTURE				X					X										X		5
2. FACADE VITRÉE + HALL OPAQUE	FACADE				X								X						NOUVEAU			5
3. DETAIL TECHN. DES PARCS DU HALL	SOLUTION TECHNIQUE				X								X					X				6
4. PANNEAUX EN FIBRO-CIMENT	MATERIAUX	X							X										X			7
5. FACADE HALL FACETTÉE AVEC DES TIRANTS	FACADE	X							X										NOUVEAU			8
6. TOLE PERFORÉE SUR PEAU HALL POUR PROTECTION SOLAIRE	SOLUTION TECHNIQUE	X							X									X				9
7. TERRASSE VÉGÉTALE SUR TOIT PETITE SALLE	REPARTITION FONCTIONNELLE				X								X					X				10
8. POUTRES DU TOIT SUR 2 PURS PORTEURS (PLANCHER DALLE)	STRUCTURE				X								X					X				10
9. ENPLACEMENTS PIR	REGLEMENTATION				X								X					X				11
10. DETAIL DE PARCS TOITURE TERRASSE	SOLUTION TECHNIQUE				X								X						X			12
11. ALTERNANCE VERRE ET POLYCARBONATE POUR FACADES	FACADE					X								X					X			13

Figure 48. Extrait de grille d'observation d'une réunion de revue de projet (Acteurs 2, revue n°11) d'après (Baudoux & Leclercq, 2021, p.5).

Notons que, dans notre récolte de données, nous ne considérons que les informations qui sont explicitement énoncées par les concepteurs. Nous ne déduisons pas de nous-mêmes des informations à partir des plans et autres documents. Ainsi, nous évitons un biais d'interprétation et nous sommes sûr de l'exactitude des informations recueillies. L'inconvénient de ce choix est que nous ne pouvons établir que la liste des attributs explicites caractérisant le bâtiment. Cependant, il nous faut nuancer cet inconvénient car obtenir une liste exhaustive ne nous semble pas possible, même en interprétant les artefacts. En effet, de nombreux attributs pensés (donc existants en représentation interne dans l'esprit du concepteur) ne font pas l'objet d'une externalisation dans les documents de conception pour autant.

7.2.1.2 *Caractérisation au travers de la typologie d'information*

Pour caractériser les typologies d'information explicitée, nous nous inspirons de la méthode d'analyse par théorisation ancrée (Glaser & Strauss, 1967; Strauss & Corbin, 1994; Paillé, 1994), apprise auprès de Lejeune (2019). Cette « méthode permet de théoriser un phénomène empirique à travers la codification, la catégorisation, la mise en relation, l'intégration, la modélisation et la théorisation » (Paillé, 1994, p. 1). C'est une « approche de théorisation empirique et inductive mise de l'avant en 1967 par Glaser et Strauss, puis reprise et enrichie par les deux auteurs, séparément ou en collaboration » (Paillé, 1994, p. 3).

Afin de réaliser une analyse par théorisation ancrée, il est nécessaire de recueillir des données empiriques sur le terrain, à partir desquelles une classification et une théorisation peuvent être élaborées selon une démarche inductive. Nous obtenons dès lors une classification des variables observées qui est ancrée dans le terrain. « Il s'agit d'une posture d'ouverture à l'émergence » (Guillemette, 2006, p. 38). C'est particulièrement précieux dans le cas de cette étude puisque la littérature ne recelait pas de classification(s) existante(s) satisfaisante(s) pour décrire les typologies d'information au sens où nous les observons ici.

Concrètement, dans notre grille, nous inscrivons seulement, dans un premier temps, le descriptif de l'information énoncée. Ensuite, à la fin de la journée de revue, en ayant une vue globale de tous les échanges, nous procédons à un *étiquetage*, au sens de Lejeune (2019), des informations énoncées. C'est-à-dire que nous cherchons à extraire l'essence de l'objet de l'information et le synthétisons en un mot. Au cours des revues suivantes, nous questionnons la pertinence des premières étiquettes et les ajustons au besoin. Nous en créons également de nouvelles si nécessaire. Ces étiquettes provisoires sont inscrites dans la seconde colonne de notre grille d'observation, intitulée *type d'information*.

7.2.1.3 *Caractérisation au travers des Moyens de conception utilisés*

La deuxième variable de caractérisation des informations est le *Moyen de conception* employé pour générer cette information.

Pour étudier cette variable, nous mobilisons une classification élaborée préalablement (Baudoux *et al.*, 2019) et qui fait appel à la notion de *Moyen* que nous avons également théorisée précédemment (Calixte, Baudoux *et al.*, 2019a). Ces points ont été détaillés dans la section 3.1.1.4 du chapitre 3, page 55, nous les rappellerons donc ici succinctement.

Le *Moyen* de conception est l'ensemble des ressources, qu'elles soient matérielles, méthodologiques ou relatives aux compétences, mobilisées au travers d'un schème d'usage par l'acteur pour réaliser sa tâche de conception (Calixte, Baudoux *et al.*, 2019a). Le *Moyen* dépasse

donc l'outil et l'instrument pour englober toute action permettant la conception. Il est médiateur dans son rôle mais pas objet dans sa nature.

Nous différencions 8 typologies de Moyen de conception (Baudoux *et al.*, 2019; Baudoux & Leclercq, 2023a) :

- L'*image de référence* (abrégée par la suite en *ref*), pour toute conception par analogie avec des représentations préexistantes ;
- Le *dessin papier à la main* (*dess*), c'est-à-dire la conception via une production graphique à la main sur papier ;
- Le *dessin numérique à la main* (*dess num*), lorsque le dessin à la main est sur un support numérique ;
- La *DAO 2D*, pour tout dessin en 2D assisté par ordinateur ;
- La *DAO 3D*, lorsque l'acteur dessine en 3D assisté par ordinateur ;
- La *maquette* (*maqu*), pour toute réalisation d'un modèle tridimensionnel physique ;
- La *CAO paramétrique 2D* (*para*), pour toute conception paramétrique assistée par ordinateur ;
- Le *prototype* (*prot*), lorsque la conception se fait par simulations statiques ou dynamiques.

Dans notre grille d'observation, nous cochons simplement, en regard de l'information énoncée, le Moyen utilisé, parmi ces 8 typologies pour la générer.

7.2.1.4 Caractérisation au travers des représentations externes utilisées

La troisième variable de caractérisation des informations est ensuite la *représentation externe* utilisée pour figurer cette information et la communiquer.

Développée précédemment à cette thèse (Baudoux *et al.*, 2019) et déjà détaillée en section 3.1.2.5 au chapitre 3, la classification de cette variable reprend 7 typologies de représentation de l'information :

- L'*image de référence* (abrégée dans les grilles en *réf*), pour toute image, croquis ou photo non produit(e) par les concepteurs;
- Le *texte* ou *mot-clef écrit* (*mot*), c'est-à-dire des mots servant de représentation indépendante;
- L'*annotation* (*ann*), pour tout croquis ou note apposé sur une autre représentation;
- Le *schéma* ou *croquis* (*croq*), lorsque c'est une production symbolique;
- Le *plan* ou la *coupe* (*plan*), pour tous les plans des niveaux ou coupes du bâtiment;
- La *perspective 2D* (*perd*), lorsque l'objet 3D est représenté en perspective sur support 2D;
- L'*immersion 3D* (*3D*), si la représentation est un modèle 3D numérique ou physique.

Il est important d'insister sur le fait que nous séparons, dans notre méthodologie de caractérisation des informations, l'action ayant mené à la génération de l'information (le *Moyen*) et le support sur lequel est véhiculée cette information (la *représentation externe*). Néanmoins, les actions de conception et les artefacts de représentation sont liés : la conception par maquette produit une représentation de l'information en maquette. Ce lien peut conduire à une forme de confusion. Cependant, la séparation de ces deux aspects permet d'apporter plus de nuance dans la description de l'activité de conception : la conception en DAO 3D peut amener à des représentations sous forme de plan, de perspective ou encore à de l'immersion en navigant dans le modèle, et à l'inverse, une représentation sous forme de schéma peut être réalisée en dessinant à la main sur papier, sur support numérique ou grâce à la DAO 2D ou encore à la DAO 3D.

7.2.1.5 Caractérisation au travers du niveau d'abstraction

Ces trois premières variables, *type d'information*, *moyen de conception*, et *représentation externe*, sont classées selon leur niveau d'abstraction.

Rasmussen (1990a, 1990b) voit le processus de conception comme une évolution de l'artefact. Il caractérise cette évolution de l'artefact en développant sa théorie de la hiérarchie d'abstraction. Dans cette théorie, l'artefact évolue en voyageant entre cinq niveaux d'abstraction, c'est-à-dire cinq niveaux divisant le continuum abstrait-concret. (Rasmussen, 1985; Rasmussen *et al.*, 1994). Ces cinq niveaux sont les suivants, du plus abstrait au plus concret (Rasmussen, 1983) :

- *Intentions fonctionnelles* : pour les intentions et valeurs structurantes, les objectifs globaux ;
- *Fonctions abstraites* : lorsque c'est un traitement d'informations ou des éléments de niveau topologique comme la hiérarchisation des fonctions, l'organisation des espaces ou des flux ;
- *Fonctions généralisées* : pour tout élément standard, réglementaire ;
- *Fonctions physiques* : lorsque c'est un composant concret de l'artefact, la géométrisation d'un élément topologique ;
- *Formes* : pour toute caractéristique de forme ou de matériau, de texture, de couleur, ...

Nous représenterons ces niveaux d'abstraction dans nos variables non pas en les regroupant en cinq classes d'abstraction mais en les organisant de la plus abstraite à la plus concrète, dans un dégradé de teinte. Plus la couleur de la typologie est claire, plus le niveau d'abstraction est général ; plus la couleur de la typologie est foncée, plus cette classe correspond à un niveau d'abstraction détaillé. La synthèse de toutes ces classifications est schématisée à la figure 50.

7.2.1.6 Caractérisation au travers des transformations de l'objet architectural

Pour caractériser les transformations de l'objet architectural réalisé au travers de la conception de chaque nouvel attribut du bâtiment, nous faisons appel aux travaux de Visser (2006) et, avant elle, de Goel (1995).

Parmi les différents modèles théoriques qui décrivent l'activité de conception, celui de Goel (1995), détaillé en section 2.2.2.3 du chapitre 2, schématise l'activité de conception comme un affinement progressif de la solution au travers de transformations successives de l'artefact conçu. Ces transformations sont *verticales* si elles approfondissent un élément existant, et *horizontales* si elles amènent un élément nouveau ou différent. Visser (2006), dans cette même logique, décrit l'activité de conception comme une suite de construction et de modification de l'artefact, et plus spécifiquement, des représentations (internes, *i. e.* mentales, comme externes, *i. e.* graphiques) de cet artefact. L'auteure affine également les transformations verticales et horizontales de Goel en créant 6 classes de transformation du projet (Visser, 2006), listées ci-après et illustrées à la figure 49 :

- *dupliquer* (abrégée dans les grilles en *dup*), répliquer un dessin sans en modifier le contenu ;
- *ajouter* (*ajou*), ajouter des informations en modifiant peu la représentation ;
- *détailler* (*dét*), retravailler différents éléments de la représentation avec plus de détails ;
- *concrétiser* (*conc*), rendre une représentation plus concrète ;
- *modifier* (*mod*), modifier la représentation sans la détailler ni la rendre plus concrète ;
- *substituer* (*sub*), remplacer par une représentation alternative sans détailler ni concrétiser.

Cette classification met en évidence deux axes possibles d'évolution du projet, visibles ci-après : le degré d'ajout d'information caractérisant l'artefact, c'est-à-dire l'augmentation du niveau de détail, et le degré de modification de la représentation graphique de l'artefact, c'est-à-dire le changement de type de représentation.

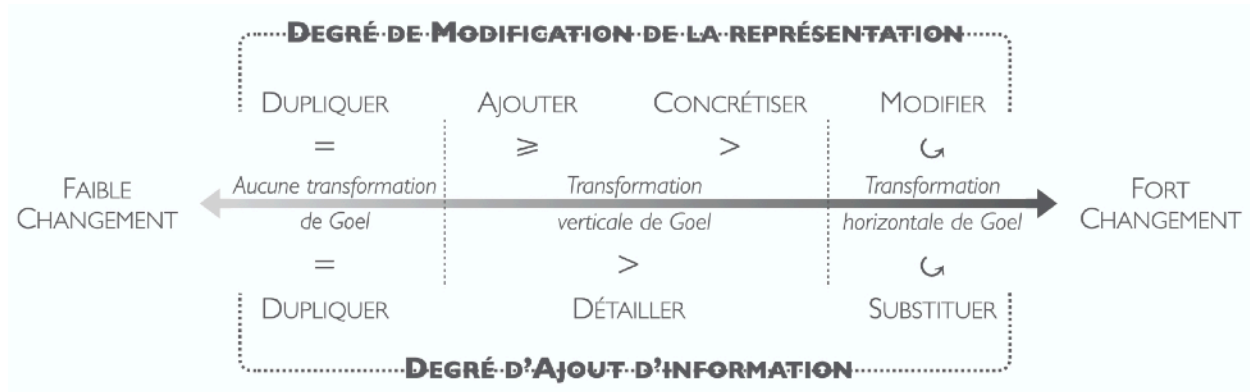


Figure 49. Schématisation des classes de transformation de Visser.

Aux différentes classes de Visser, nous ajoutons une 7ème classe *nouveau*, lorsqu'une information apparaît pour la première fois. Une synthèse des classifications des variables observées est disponible à la figure 50, avec la progression du niveau de modification de l'artefact.

7.2.2 Classification des typologies d'information

Le premier résultat de nos observations est l'émergence d'un étiquetage de typologies d'information caractérisant un projet architectural. Au fur et à mesure de nos observations, nous avons pu affiner cet étiquetage pour obtenir 11 classes de typologies d'information (Baudoux & Leclercq, 2023a) :

- Le *concept* regroupe toutes les informations relatives au parti architectural ou à des intentions générales ;
- L'*implantation* comprend le positionnement du bâtiment sur la parcelle, l'aménagement extérieur et les informations à l'échelle urbaine ou du quartier ;
- La *volumétrie* désigne tous les attributs de gabarit ou de volumétrie du bâtiment ;
- La *répartition fonctionnelle* désigne le positionnement des espaces et fonctions et leurs articulations ;
- La classe *façade* reprend l'ensemble des caractéristiques des façades du bâtiment ;
- La catégorie *usage* englobe les flux de circulations dans le bâtiment, les intentions d'expérience usagers et les vues ;
- La classe *matériaux* comprend toutes les spécifications de matériaux, de couleur, de texture ;
- L'*aménagement* désigne toutes les informations liées à l'aménagement des espaces, au cloisonnement interne, au positionnement du mobilier ;
- La *structure* reprend les attributs des systèmes porteurs et des éléments dimensionnés ;
- Sous *réglementation* sont regroupées les caractéristiques du projet découlant directement de l'application des différentes normes et réglementations (sécurité incendie, PMR, ..) ;
- Finalement, la classe *solution technique* englobe l'ensemble des attributs du bâtiment conçus en réponse à des challenges techniques (surchauffe, détail technique, ...).

Cette classification est schématisée ci-après et adjointe de la synthèse des classifications des précédentes variables observées dans cette étude.

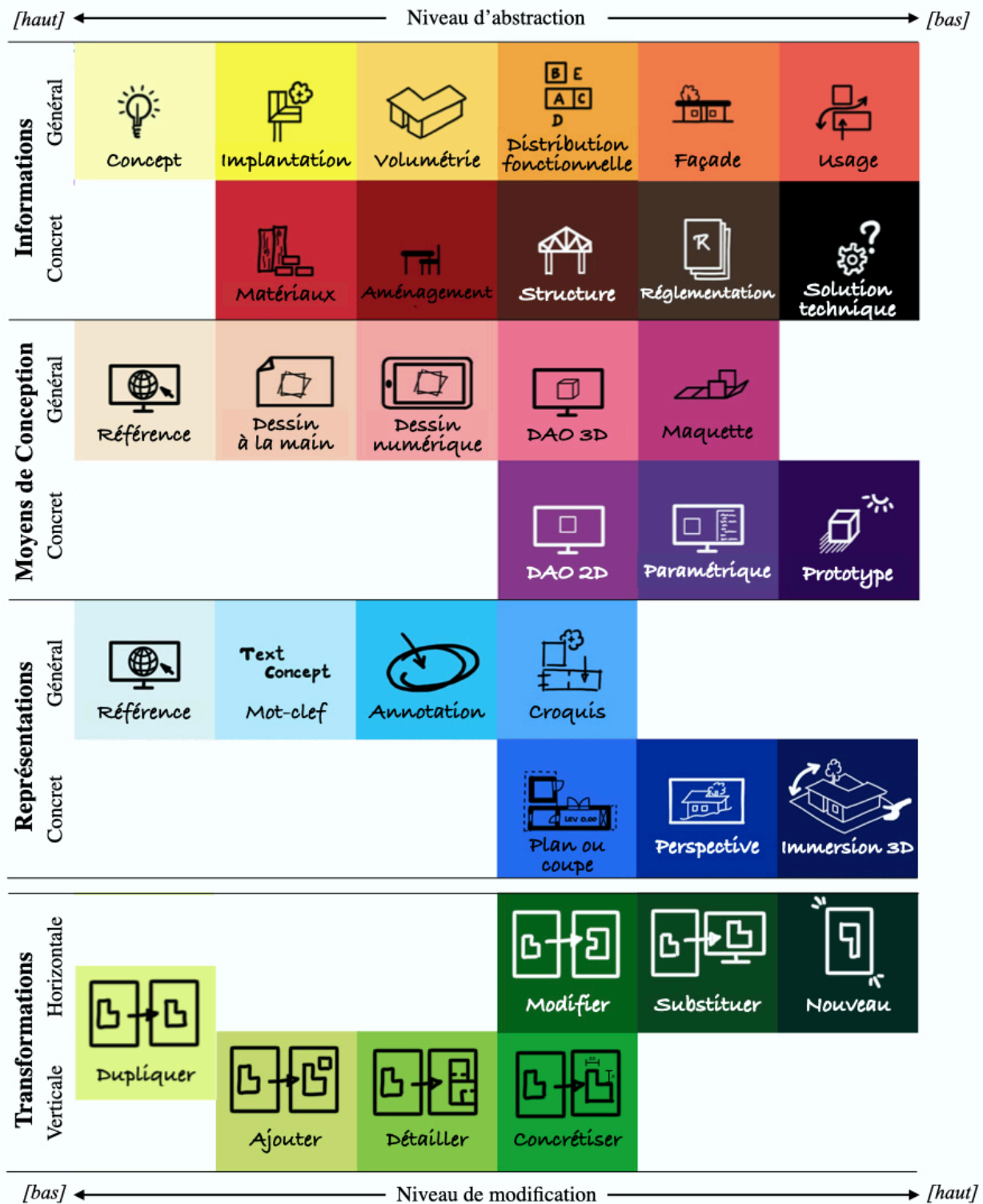


Figure 50. Classification des typologies d'information, de Moyen, de représentation et de transformation avec la progression du niveau d'abstraction et du niveau de modification (Baudoux & Leclercq, 2021, 2022b, 2023)

7.2.3 Modélisation du processus de conception intégrée

Tout d'abord, nous avons reconstitué, sur base des grilles d'observation, l'enchaînement d'informations et d'usage des objets médiateurs sur l'entièreté du processus de 13 séquences, soit lors des 13 revues de conception architecturale et technique (Baudoux & Leclercq, 2023a).

Afin de modéliser ce processus et de visualiser nos données, nous représentons la ligne du temps des 13 séquences (point 1 à la figure 51). Puis nous modélisons par une barrette colorée chaque information caractérisant le projet successivement énoncée par un concepteur (point 2 à la figure 51). Pour chaque information, nous associons trois autres barrettes colorées symbolisant le moyen de conception, la représentation externe et la transformation du projet lié à cette information projet (point 3 à la figure 51).

Ce procédé nous donne un quadruplet de données pour chaque information énoncée ainsi qu'une lecture temporelle du processus de conception sur 4 paramètres différents. En outre, le dégradé de couleur des barrettes indique le niveau d'abstraction des types d'éléments.

Cette modélisation est faite indépendamment pour chacune des 6 équipes de conception.

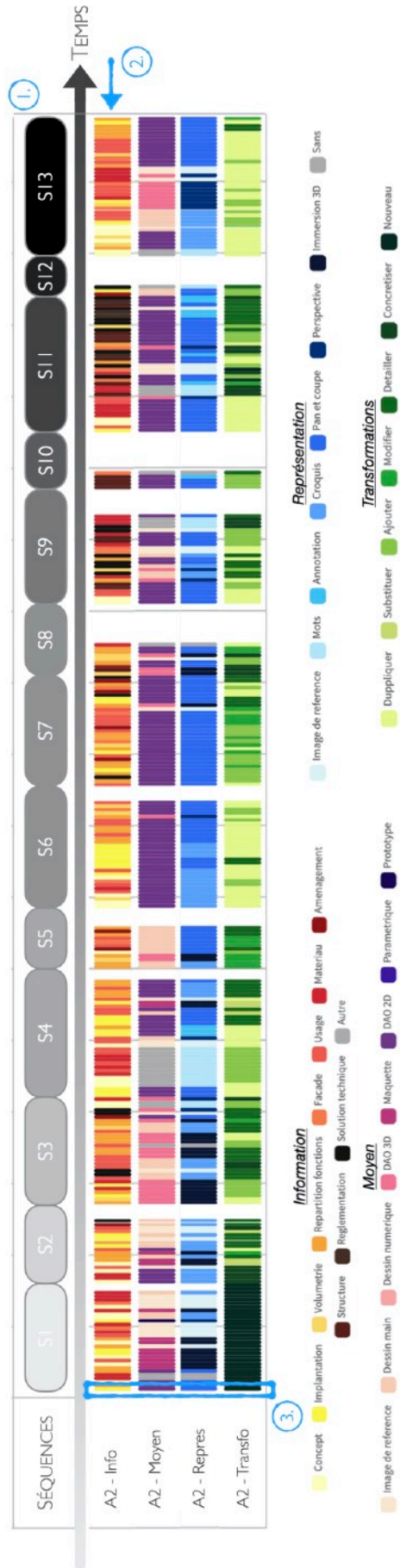


Figure 51. Caractérisation du processus de conception intégrée (équipe A2) d'après (Baudoux & Leclercq, 2021, p.6).

7.2.4 Résultats de l'observation de l'évolution en conception longue

Maintenant que nous avons explicité tout le protocole et modélisé le processus observé avec toutes les données collectées, nous pouvons les analyser.

7.2.4.1 Variation des niveaux d'abstraction

Le premier élément ressortant de notre analyse de données (Baudoux & Leclercq, 2021) est l'observation de décalages entre les niveaux d'abstraction des informations et ceux des moyens et représentations employés pour soutenir ces informations, prenant ainsi un rôle d'objet médiateur. Ces décalages sont mis en évidence dans la figure ci-après. Nous pouvons y voir, pour plusieurs triplets de barrettes (lecture verticale) des différences significatives d'intensité de teinte entre les différentes lignes, et donc des différences de niveau d'abstraction.

Par exemple, au milieu de la séquence 11, nous pouvons voir que des images de référence d'autres bâtiments existants, soit un média de conception de l'ordre du concept général et caractérisant peu le bâtiment lui-même, sont utilisées par les concepteurs pour transmettre des informations détaillées et précises de matériaux, façade et solution technique, celles-ci correspondant, dans notre grille d'observation, au choix de revêtement de façade, à la concrétisation technique du facettage de la façade, et à la solution au problème de surchauffe (Baudoux & Leclercq, 2021).

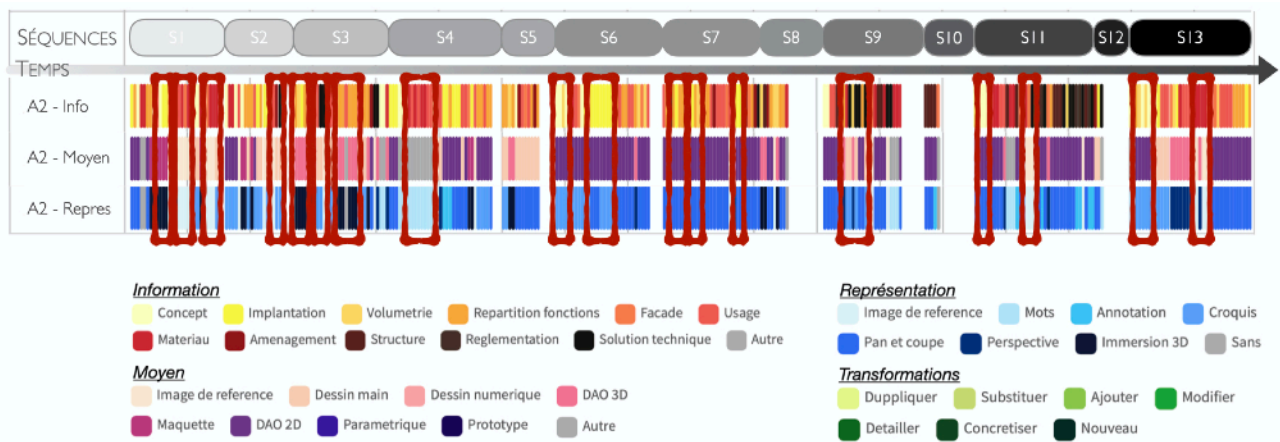


Figure 52. Mise en évidence des décalages d'abstraction entre information et objet médiateur (équipe A2).

Groupe : ACTEURS 2 N° semaine : 11

INFORMATION	TYPE D'INFO	MOYEN DE CONCEPTION									REPR SUPPORT						TYPE TRANSFO PROJET					NUM DOC	
		ref	dess	dess num	DAO 2D	DAO 3D	maqu	para	prot	ref	mot	ann	croq	plan	pers	3D	dup	ajou	dét	conc	mod		sub
4. TANNEAUX EN FIBRO-CIMENT	MATERIAUX	X									X									X			7
5. FACADE HALL FACETTÉE AVEC DES TIRANTS	FACADE	X									X									NOUVEAU			8
6. TOLE PERFOREE SUR PEAU HALL POUR PROTECTION SOLAIRE	SOLUTION TECHNIQUE	X									X							X					9

Figure 53. Extrait de grille d'observation d'une réunion de revue de projet (Acteurs 2, revue n°11, lignes 4 à 6) d'après (Baudoux & Leclercq, 2021, p.5).

Dans le sens contraire, au début de la même séquence, des plans et coupes produits au moyen de DAO 2D, outil de bas niveau d'abstraction, sont utilisés pour véhiculer des informations relatives aux ambiances sensorielles des salles à l'intérieur du bâtiment, informations de haut niveau d'abstraction.

Le graphique ci-après montre que pour 46% des informations, qu'elles soient de toute équipe ou de toute séquence confondue, il y a un écart entre le niveau d'abstraction de l'information et celui qui est supposé être compréhensible pour le moyen. En outre, ces décalages sont présents sur l'entièreté du processus avec un usage plus marqué encore sur les séquences 8 à 12 (Baudoux & Leclercq, 2021). Pendant ces séquences de conception orientées technique, les éléments tels que la structure ou les solutions techniques, qui sont traités par les concepteurs, sont développés avec plus de détails que dans les étapes précédentes de conception architecturale. Étant donné que ces concepteurs continuent d'utiliser les mêmes moyens de conception ou de représentation d'informations, telles que les croquis à la main, il est compréhensible qu'il y ait davantage de divergences dans les niveaux d'abstraction au cours de ces séquences.

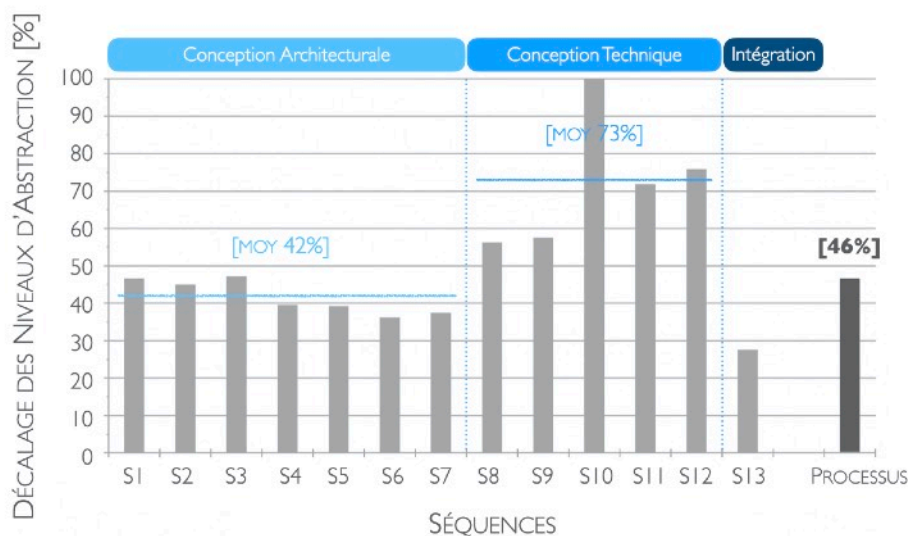


Figure 54. Caractérisation des activités de conception longue dans un processus de conception intégrée (équipe A2). Pourcentage d'occurrence des décalages de niveau d'abstraction sur chaque séquence et en moyenne sur l'ensemble du processus d'après (Baudoux & Leclercq, 2021, p.7)

Par ailleurs, des fluctuations de niveaux d'abstraction sont également observables entre les informations successivement abordées. Lorsque nous regardons la ligne « Info » à la figure suivante, nous pouvons remarquer que les pastilles se succédant ne sont que peu de fois d'intensité de couleur similaire, c'est à dire de niveaux d'abstraction similaires. Et ce, quelle que soit la séquence étudiée. En début de séquence 1, par exemple, l'équipe 2 commence par aborder l'implantation, avant d'évoquer la répartition fonctionnelle, pour revenir à une information conceptuelle, pour ensuite directement plonger dans la spécification des matériaux, retourner à la répartition des fonctions, revenir jusqu'à un concept, et reprendre à nouveau la spécification d'un flux d'utilisateurs, ... De manière plus explicite, si nous numérotions les niveaux d'abstraction, nous obtenons la séquence 2-4-1-7-4-4-1-6-1-2-2-4-1-4-6-7-5-7-2-1-1-7-1. La fluctuation est ainsi bien visible. Après dénombrement, toute équipe et toute séquence confondue, seulement 30,73% des informations successives sont de même type. D'autre part, 33,38% présentent un décalage de plus

de 3 niveaux d'abstraction. Le processus de conception tend donc à être opportuniste, comme avaient déjà affirmé plusieurs auteurs dans les années 2000 (Darses et al., 2004; Falzon, 2005; Bonnardel, 2009), c'est-à-dire à être une suite d'activités alternant entre structuration et exploration plus ou moins aléatoirement, en fonction des contraintes architecturales évolutives, dans lesquelles le concepteur re-visite sans cesse ses décisions antérieures pour améliorer la solution proposée (Elsen, 2011). Les nouveaux moyens et médias n'ont pas changé cet aspect de la nature de l'activité de conception.

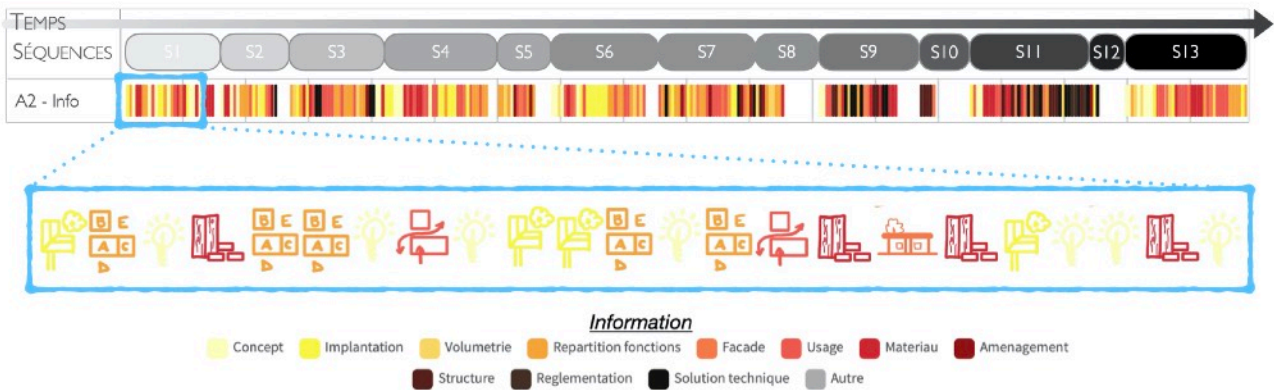


Figure 55. Fluctuation du niveau d'abstraction des informations successives (équipe A2).

7.2.4.2 Usage des médias

Nous avons également besoin de mieux comprendre l'usage des objets médiateurs, dans leur fonction de moyen de conception et dans celle de représentation externe des informations caractérisant le projet.

Il ressort de nos observations (Baudoux & Leclercq, 2021) que les concepteurs, dans les moments de synthèse du projet en cours, changent vite d'objet médiateur. Comme nous le montrons à la figure suivante, l'alternance des moyens de conception ou des représentations externes mobilisés est rapide.

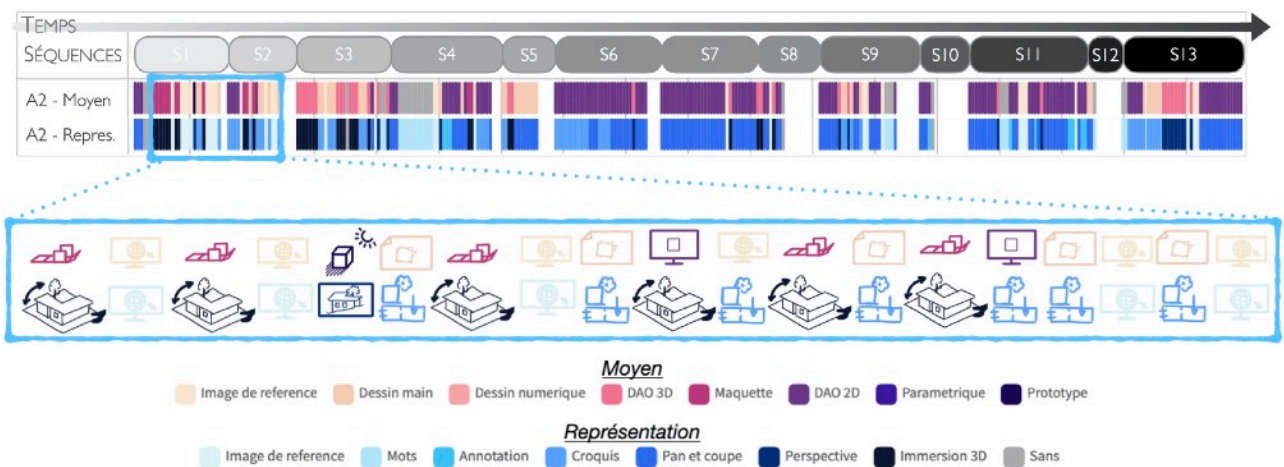


Figure 56. Fluctuation des moyens et représentations successivement mobilisées (équipe A2).

Ainsi, à titre d'exemple, le groupe 2 réalise des aller-retours entre maquette et images de référence, puis fait successivement appel à un prototype (simulation solaire), du dessin de croquis, revient sur la maquette et les images de référence, pour reprendre les croquis. A la séquence suivante, il mobilise un modèle 3D numérique dans lequel il navigue avant de revenir aux croquis, en alternance avec la maquette. Le groupe concrétise le croquis en DAO 2D puis revient à de l'esquisse en alternance avec l'utilisation d'images de référence. Ces fluctuations rapides apparaissent régulièrement, et à des moments variables du processus selon les équipes observées.

Afin de mieux appréhender l'utilisation de ces objets médiateurs, nous examinons également les types d'informations associées aux moyens de conception qui les ont générés, ainsi que les représentations externes sur lesquelles sont représentées ces informations. Les graphiques montrent l'occurrence des croisements entre ces deux paramètres.

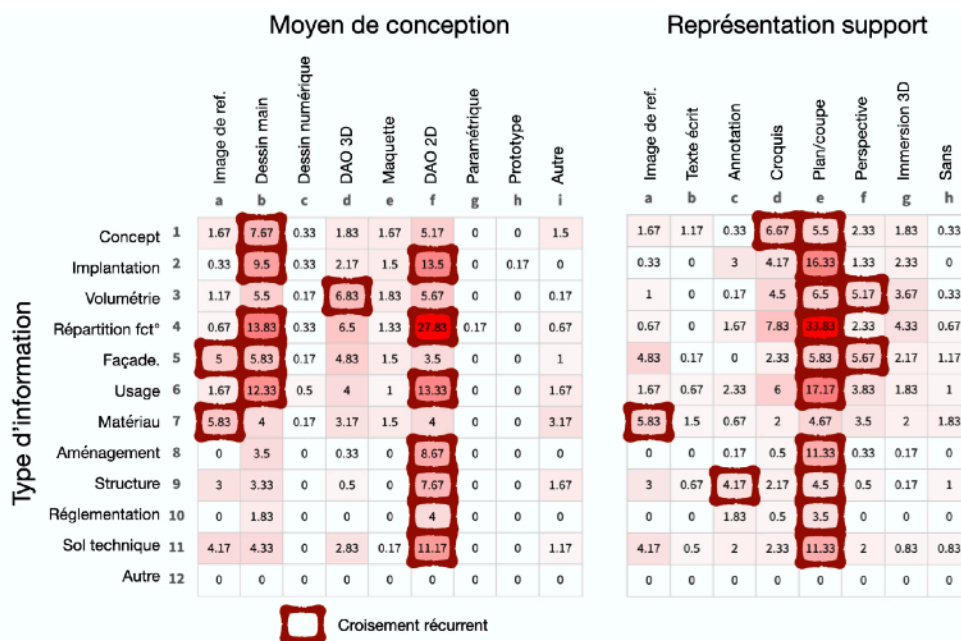


Figure 57. Croisement d'usage des médias et occurrence sur l'entièreté du processus (Baudoux & Leclercq, 2021) - usages récurrents.

Dans les croisements à forte occurrence (encarts rouges), nous relevons les usages largement partagés des croquis à la main pour générer et transmettre les concepts ; les perspectives extraites de modèles numériques 3D pour communiquer les informations de volumétrie ; les images de référence et les plans et perspectives à la main pour concevoir les façades ; et finalement les plans de DAO 2D pour détailler l'aménagement ou les solutions relatives aux règlements et points techniques (Baudoux & Leclercq, 2021). Ces usages sont similaires à ceux énoncés ponctuellement par plusieurs auteurs dans leur théorisation de l'usage des objets médiateurs (Borillo & Goulette, 2002; Bilda & Demirkan, 2003; Zacklad et al., 2006; Self, 2009; Elsen, 2011; Safin, 2011). Nous pouvons ainsi voir qu'en plus des traditionnels plans et élévations, qu'ils soient à la main ou en DAO, les concepteurs mobilisent des activités de recherche d'image de référence, de dessin de croquis ou de représentation en perspective pour générer et exprimer les caractéristiques du projet architectural. Cette part d'usage des images de référence sera notamment importante pour la suite de notre recherche.

En plus de ces usages récurrents, cette analyse par croisement met en évidence des usages inattendus de certains moyen ou représentation, encadrés en tons de bleu à la figure ci-dessus. Ils sont qualifiés d'inattendus car ils n'ont pas été documentés par la recherche dans le domaine des objets médiateurs en conception architecturale et parce qu'ils sont peu courants dans les pratiques observées et décrites dans la littérature. A titre d'exemple, nous avons pu observer, lors de notre récolte de données, des concepts architecturaux générés au moyen de perspectives esquissées, ainsi que des implantations caractérisées dans des modèles 3D.

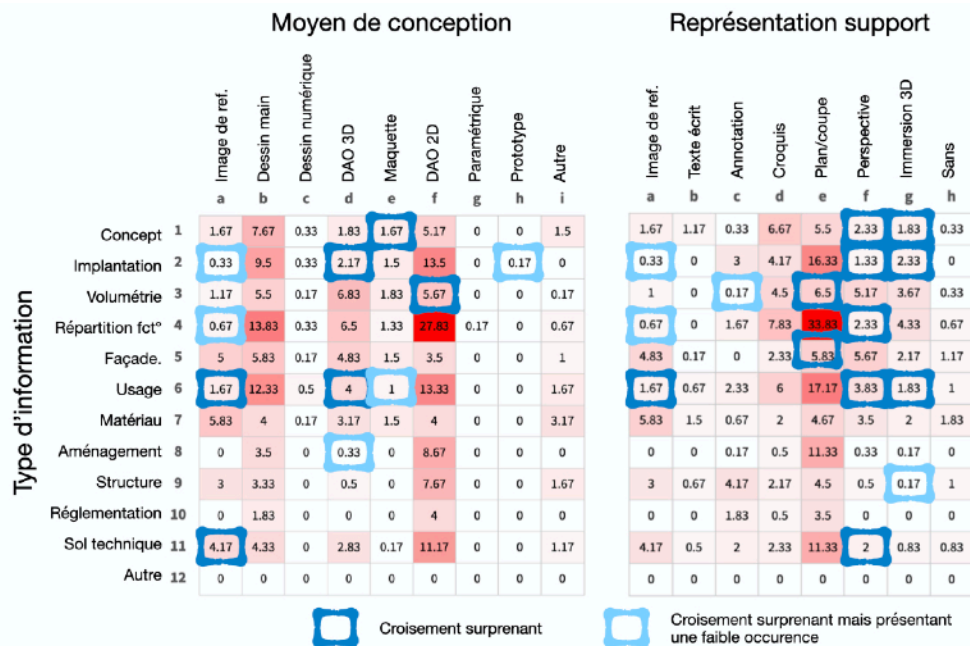


Figure 58. Croisements d'usage des médias et occurrence sur l'entièreté du processus (Baudoux & Leclercq, 2021) - usages inattendus.

Sur la figure 58, sont encadrés en bleu clair les usages surprenants ayant une très faible occurrence, tandis que ceux qui sont plus fréquents sont encadrés en bleu foncé. Pour analyser ces usages inattendus, nous regardons leur distribution d'occurrence au fil des différentes séquences dans la figure 59.

Nos observations nous ont également permis d'identifier trois types de comportements dans le temps, que nous avons mis en évidence en encadrant les 3 couleurs sur le schéma des usages surprenants ci-après.

Le premier, mis en évidence en orange, consiste à utiliser le média à un moment donné du processus et ensuite l'abandonner. Par exemple, l'expression de concepts en utilisant des perspectives ou des maquettes ne se produit que lors des deux premières séquences. Ces médias sont peut-être appropriés exclusivement pour certaines phases du processus et n'apparaissent donc pas en dehors, ou ils peuvent se révéler non pertinents et être abandonnés après essai.

Une seconde forme d'usage dit temporel, encadrée en mauve, consiste à employer le média à un moment donné du processus, puis à l'abandonner avant de le mobiliser à nouveau en fin de processus. C'est le cas de l'usage de plans pour caractériser la composition de façade, qui apparaît en milieu de processus avant de disparaître, puis est réutilisée lors de la dernière séquence de conception.

Finalement, dans le troisième type de comportement, en vert, l'usage inattendu est réitéré régulièrement tout au long du processus. Nous avons, à titre d'exemple observé, en de nombreux

moments du processus, l'emploi de plans de DAO 2D afin de caractériser la volumétrie du bâtiment.

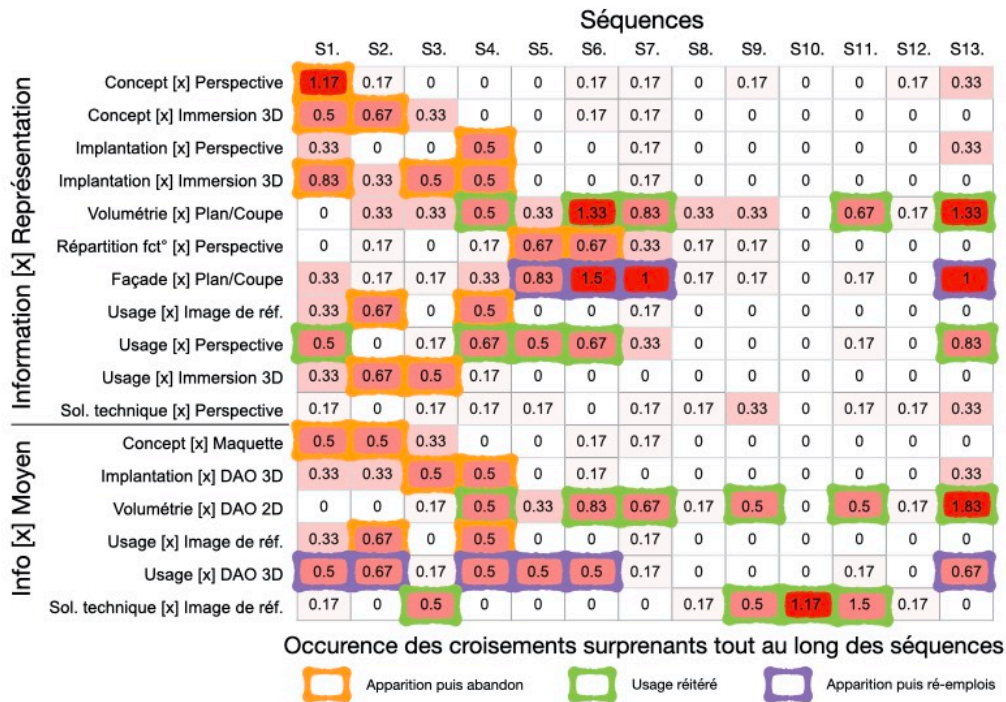


Figure 59. Occurrences d'usages surprenants des médias sur chaque séquence.

7.2.5 Discussion de l'évolution des informations en conception longue

7.2.5.1 Détournement des médias

Les résultats illustrés aux sections précédentes, ont mis en évidence de nombreux décalages entre les niveaux d'abstraction des informations générées ou véhiculées et ceux des moyens de conception et des représentations externes employés respectivement dans les processus observés. Or, si le niveau d'abstraction d'un média, c'est-à-dire le niveau d'abstraction des informations supposées être supportées par ce média, diffère du niveau d'abstraction de l'information réellement véhiculée par ce média, alors le type d'information attendu pour ce média sera différent de celui qui est effectivement transmis. En d'autres termes, les usages initialement attendus ne sont donc pas ceux réellement mis en place (Baudoux & Leclercq, 2021). Nous appelons cela le détournement des médias. Les usages inattendus révélés par notre analyse de données confirment cette interprétation.

Certains de ces usages inattendus sont d'ailleurs réitérés tout au long du processus et de ce fait, nous en déduisons qu'ils sont pertinents puisque les concepteurs ont la liberté de choisir les médias qu'ils utilisent et qu'ils continuent à utiliser ces types d'emplois spécifiques. Trois usages tombent sous ces critères :

- l'usage de perspectives issues de modèles 3D pour supporter des informations relatives aux flux dans le bâtiment ;
- l'usage de plans de DAO 2D pour transmettre des caractéristiques liées à la volumétrie du bâtiment ;
- et l'usage d'images de référence pour concevoir les solutions techniques nécessaires.

Ainsi, lorsque nous considérerons les activités de conception médiatisée dans la suite de cette recherche, il nous faudra dès lors considérer ces usages inattendus au même titre que ceux identifiés précédemment par leur forte occurrence.

Au contraire, certains de ces usages sont abandonnés en cours de processus. Cette décision peut être traduite par le constat que l'usage n'est approprié que dans certains cas de figure ou que l'usage employé se révèle peu pertinent et est donc abandonné après avoir été testés. Deux usages tombent dans cette catégorie : l'usage de maquettes ou de perspectives esquissées pour illustrer des concepts et l'usage de modèles 3D numériques pour décrire l'implantation du bâtiment. D'autres hypothèses pourraient nous laisser penser que les concepts et les implantations sont figés après un unique usage de ces médias. Cependant, cette hypothèse ne peut être validée seule, même si nous pouvons appuyer le fait que ces usages interviennent dans les séquences propres à la recherche formelle du bâtiment. En effet, nous retrouvons ces thématiques en milieu et fin de processus, mais avec des médiatisations différentes.

7.2.5.2 Choix intentionnel des médias

Comme illustré précédemment, nos résultats ont mis en évidence des fluctuations rapides dans les objets médiateurs mobilisés. Elsen (*et al.*, 2010) avait déjà constaté de nombreux allers-retours entre objets médiateurs. Elle appuyait par là une vision non-dichotomique des objets médiateurs, souvent scindés entre outils analogiques et numériques, ainsi qu'une différence entre les outils comme les modèles numériques esquissés et ceux plus détaillés ainsi qu'entre les croquis d'esquisse à visée exploratoire et les croquis techniques de spécification.

Ces fluctuations et allers-retours témoignent ainsi des spécificités d'usage de chaque objet médiateur, qu'il soit moyen de conception ou représentation externe. Cela signifie qu'aucun média n'est employé de manière constante et universelle tout au long du processus. En d'autres termes, les nombreux médias sont utilisés à des moments différents et pour divers types d'informations selon les besoins du processus en question.

Ainsi, il existe bien une réelle différence de pertinence et d'efficacité de média selon le contexte de conception. Ceux-ci semblent dicter le choix de leur emploi par les concepteurs.

De cette observation émerge le questionnement de l'importance de la variété des objets médiateurs dans l'activité de conception. En effet, le fait de passer d'une représentation externe à une autre crée des phénomènes de redécouverte du projet, ce qui offre des opportunités d'évaluation de l'existant et de génération de nouvelles idées (Safin, 2011). De même, la représentation du projet au moyen d'un autre outil amène à choisir parmi les différentes solutions co-existantes (Elsen & Leclercq, 2007 ; Safin *et al.*, 2008).

7.2.5.3 Limites de l'étude en conception longue

L'observation menée dans cette section présente une première limite, celle de constituer un ensemble d'instantanés du processus au travers les revues de projet. L'observation se concentre donc sur le contenu du projet et les objets médiateurs, sans donner accès aux détails des activités collaboratives de conception.

Consécutivement, les thématiques générales de ces revues experts étant dirigées selon leurs domaines d'expertise respectifs, elles orientent le processus de conception qui oscille entre architecture et technique du bâtiment.

7.2.6 Conclusions pour l'instrumentation de la transition

L'objectif de cette observation spécifique, axée sur les informations qui caractérisent le projet, est d'étudier les éléments fondamentaux de la transition et d'identifier les endroits opportuns pour collecter ces informations pendant la phase de conception, en vue d'instrumenter le processus comme proposé au chapitre 6.

Nous avons ainsi pu déterminer que les différents types d'information vont des plus généraux, comme le concept architectural, aux plus détaillés comme des solutions répondant aux normes ou aux challenges techniques. En fonction de cette nature, l'information s'exprime au travers d'objets médiateurs qui lui sont propres. Nous avons ainsi remarqué que les plans et coupes réalisés à l'ordinateur ou à la main sont de loin les plus présents mais qu'il reste des natures d'informations qui nécessitent l'usage d'autres objets médiateurs, comme les croquis et annotations ou les images de référence. Parmi les différents types d'information, les concepts et les usages nous intéressent particulièrement puisqu'ils font partie des informations souvent perdues lors de la transition. Ils apparaissent partiellement dans les plans, mais principalement via des maquettes physiques ou numériques et des images de référence.

D'autre part, nous considérons suite à notre observation l'image de référence comme un réel moyen de conception et de communication du projet dont nous avons initialement sous-estimé l'usage. Nous garderons cela à l'esprit pour le chapitre suivant.

En outre, les concepteurs voyagent beaucoup et très rapidement d'un type d'information à un autre et d'un média à un autre. Nous avons vu qu'ils choisissent également spécifiquement leur moyen de conception et la forme de représentation de leur projet et qu'ils vont jusqu'à détourner les médias existants en leur appliquant des usages inattendus. Les concepteurs s'approprient ainsi les outils à leur disposition. Second point important que nous exploiterons dans la suite de ce travail.

Cette observation souligne l'importance du moyen de changement et les enjeux de la transition d'un média à l'autre, à la fois pour aider le concepteur à redécouvrir de nouvelles sources d'inspiration pour son travail et pour l'aider à prendre des décisions de sélection parmi les solutions alternatives disponibles afin de parvenir à un résultat final satisfaisant. Il est donc primordial de laisser au concepteur la liberté de choisir ses outils. Notre proposition d'automatisation de la transition ne doit pas contraindre le concepteur mais demeure une opportunité d'accéder à une conception plus libre tout en supportant les activités de mise au net et de sélection des variantes. Cette collecte et modélisation automatique des informations peut également s'enrichir d'un partage de retour au concepteur, permettant les activités de redécouverte inspirante du projet sous une autre forme de représentation.

Nous avons observé l'information générée par le travail de conception collaborative au sein d'un processus de 13 semaines.

Deux natures de conception se différencient : la *conception de longue durée*, étalée sur plusieurs lieux, moments et outils, caractérisée par une alternance d'activités individuelles et collectives ; et la *conception épisodique*, caractérisée par une activité collaborative synchrone de courte durée (Baudoux & Leclercq, 2022b).

En **conception de longue durée**, l'analyse des transformations d'informations et des usages de média les supportant révèlent (Baudoux & Leclercq, 2021) :

- de nombreux décalages du niveau d'abstraction entre information et média, et, de ce fait, des usages inattendus de média, témoignant ainsi d'un détournement d'usage de ces derniers par les concepteurs. Nous mettons, en évidence la capacité des concepteurs à s'approprier des outils mis à disposition ;
- des fluctuations rapides entre les informations successivement abordées ainsi que des usages récurrents de média, notamment l'importance du rôle joué par les images de référence ;
- Et des changements rapides et répétés de média, traduisant la variété d'usages spécifiques de ces médias et rappelant les enjeux de redécouverte inspirante et de sélection des variantes lors des changements de média.

We observed the information generated by collaborative design work within a 14-week process.

Two natures of design can be distinguished: long-term design, spread over several places, times and tools, characterised by alternation of individual and collective activities; and episodic design, characterised by brief synchronous collaborative activity (Baudoux & Leclercq, 2022b).

In **long-term design**, the analysis of information transformations and of the media used to support them reveals (Baudoux & Leclercq, 2021) :

- numerous shifts in the abstraction level between information and media, and unexpected uses of media, thus showing a change of media use by designers, and highlighting their capacity to appropriate the tools available;
- rapid fluctuations between the information successively discussed as well as recurrent usages of media, notably the important role played by reference images;
- and rapid and repeated media changes, reflecting the variety of specific media usages and recalling the issues of inspiring rediscovery and variant selection when changing media.

7.3 Caractérisation de l'évolution des informations en conception épisodique

La conception de longue durée ayant été étudiée, nous analysons maintenant l'évolution des informations et les usages des médias les générant et véhiculant dans les activités de conception épisodique. Ce chapitre contient des informations sur le protocole utilisé, la mise en place de celui-ci et les résultats obtenus. Bien que ces sujets aient déjà été publiés, cette section de la thèse les explore plus en détails que la publication antérieure de Baudoux & Leclercq (2022b).

Ces moments de conception épisodique sont très intéressants à observer puisqu'ils constituent des moments de conception en direct. L'ensemble des acteurs sont impliqués collectivement sur la transformation du projet et des informations le caractérisant, dès lors observable en temps réel.

Le but de notre analyse est d'identifier quel(s) média(s) génère(nt) et véhicule(nt) l'information du projet et de constater d'éventuelles différences avec les usages de conception de longue durée. Nous chercherons à déterminer si des patterns émergent dans l'évolution des informations et dans l'usage des médias et questionnerons l'importance de la trace graphique dans ces évolutions d'information.

7.3.1 Protocole d'observation de la conception épisodique

Comme illustré à la figure 46 au point 7.1.3 de ce chapitre, ces activités de conception épisodique peuvent avoir lieu à n'importe quel moment du processus. Néanmoins, nous savons que les revues formelles avec les architectes et ingénieurs sont des moments propices à voir surgir ces activités de conception épisodique. Les revues présentent en outre les avantages (i) d'avoir une caractérisation explicite du projet dans le but de le décrire au professionnel, (ii) d'être facilement observables puisqu'elles prennent place en journée, dans une salle de réunion, et (iii) d'être balisées dans le temps, nous permettant ainsi de prévoir les moments de conception à observer avec une garantie de recueillir des épisodes de conception en direct ciblée sur une thématique.

Nous observons un total de 6 journées de revues avec 6 équipes de conception, soit environ 36 heures de revues, lors desquelles émergeront 64 épisodes de conception en direct. Nous étudions ces moments au sein d'une édition de l'Atelier, celle de 2020.

7.3.1.1 Espace expérimental

Ces revues prennent place dans une salle de réunion équipée d'un bureau virtuel, visible ci-après. Ce bureau virtuel, équipé du logiciel *SketSha* (pour Sketch Sharing) destiné à supporter la communication graphique collaborative, permet le partage de divers documents graphiques comme des plans, des images, des textes, etc (Elsen & Leclercq, 2008). Ces éléments peuvent être annotés en temps réel avec un stylet numérique (Ben Rajeb & Leclercq, 2013). Le partage et l'annotation de ces documents, grâce à cet outil collaboratif, peut se faire en co-présence, entre les intervenants autour du bureau ou à distance, entre deux bureaux virtuels (Safin, 2011).

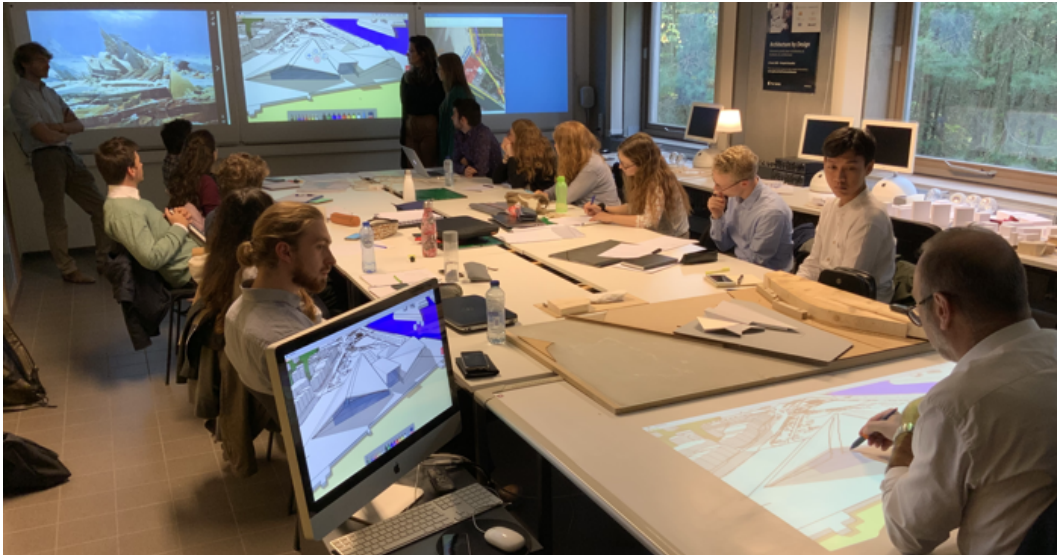


Figure 60. Environnement de revue collective et bureau virtuel avec le logiciel SketSha (Baudoux & Leclercq, 2022b, p. 4).

Notons que lors de notre recueil de données, les revues ont eu lieu en présentiel puis dans un second temps à distance, en conséquence de la crise sanitaire de 2020. Le bureau virtuel équipé de SketSha a donc été utilisé dans ses deux configurations possibles : comme bureau supportant graphiquement la conception collaborative et comme environnement de conception à distance (Baudoux & Leclercq, 2022b).

7.3.1.2 Méthode de récolte des données implémentée lors des épisodes de conception

Pour recueillir les données nécessaires à l'étude des activités de conception épisodique, nous procédons à des observations non-participantes au moyen de caméras. Ces caméras discrètes sont positionnées au plafond et dans un coin de la salle afin de perturber le moins possible les sujets observés et de ne pas interférer avec leurs activités de conception. Les angles de vues de ces caméras sont visibles à la figure suivante. Elles nous permettent de recueillir l'information des documents partagés ainsi que les interactions graphiques et verbales de conception.

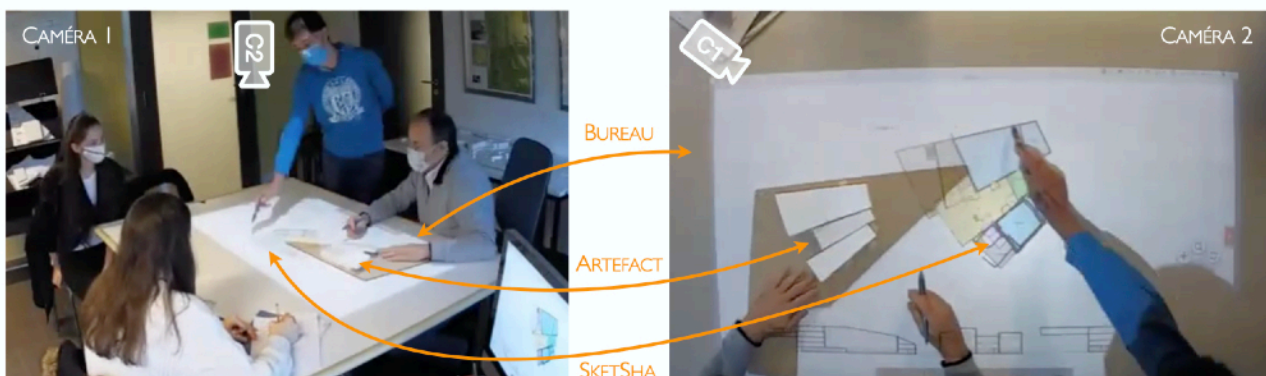


Figure 61. Espace expérimental et point de vue des caméras (Baudoux & Leclercq, 2022b, p. 5).

7.3.1.3 Critères de caractérisation de l'information

Nous analysons les revues enregistrées en décrivant l'activité observée par pas de 10 secondes, plus grand intervalle de temps au sein duquel il n'y ait qu'une seule action. Cette description est réalisée au moyen de 4 critères :

- le *type d'information* partagée décrivant le projet, c'est-à-dire la nature de l'élément d'information;
- le *moyen de conception* employé pour générer cette nouvelle information, c'est-à-dire l'action de conception et le média associé qui a outillé la génération de cette information;
- la forme de *représentation externe* par laquelle l'information est communiquée;
- et finalement la présence ou non d'une *trace graphique* associée à cette information.

Les trois premiers critères de description sont communs avec l'analyse de la conception de longue durée réalisée précédemment et ont dès lors été détaillés ci-avant (aux sections 7.2.1 et 7.2.2 de ce chapitre).

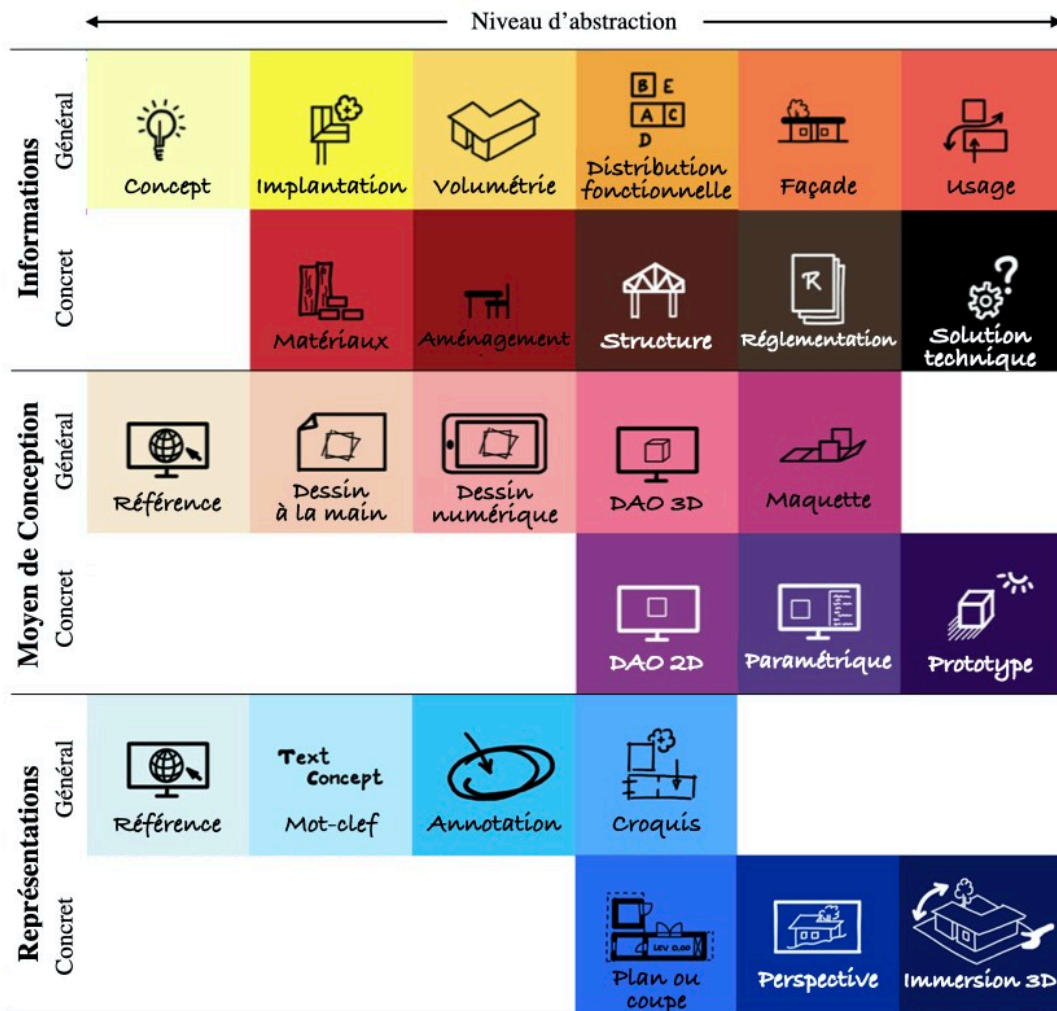


Figure 62. Classification des typologies d'information, de Moyen, et de représentation avec la progression du niveau d'abstraction (Baudoux & Leclercq, 2022b, p. 6)¹³

¹³ Dans le cas de l'observation des moments de conception épisodique, nous enlevons le codage des transformations de projet (classe en tons de vert).

Pour rappel, la classification des types d'information (figure 50, reprise à la figure 62 - tons de jaune-rouge) a émergé au fur et à mesure des observations et va du concept à la solution technique en passant par la volumétrie ou les usages du bâtiment. Dans les moyens utilisés pour élaborer le projet (figure 62 - tons de rose-mauve) nous retrouvons l'image de référence, le dessin papier à main levée, le dessin numérique à main levée, la DAO 3D, les maquettes, la DAO 2D, la conception paramétrique ou encore les prototypes. Finalement dans les représentations externes du projet (figure 62 - tons de bleu), c'est-à-dire l'ensemble des figurations des informations du projet utilisées pour communiquer avec les autres concepteurs, nous retrouvons l'image de référence, les mots-clef écrits, l'annotation, les croquis, les plans et coupes, la perspective sur support 2D et finalement les objets 3D manipulables. L'ensemble de ces classes est organisé dans la figure ci-après de la plus abstraite (teintes claires - sur la gauche) à la moins abstraite (teintes foncées - sur la droite), divisées en deux sous-classes, général ou concret.

A titre d'exemple, lorsqu'un concepteur, dans l'épisode de conception observé, ajoute un bassin d'eau dans l'espace urbain en le dessinant sur le plan d'aménagement, il fait évoluer une information de type *implantation* à travers une activité instrumentée de *dessin à la main numériquement* sur une représentation externe classée *plan ou coupe* comme illustré ci-après.

Temps	Description	Information											Moyen de Conception						Représentation								
		Con	Imp	Vol	Fct.	Fac	Usa	Mat	Plan	Stru	Reg	Tech	Ref	DM	DN	3D	Mod	2D	Para	Prot	Ref	Text	Ann	Ske	P.C.	Pers	I 3D
02:55	Hall au centre pour créer un appel		x																								x
03:26	Bâtiment d'appel au centre		x											x													x
03:43	Déplacement du bâtiment d'appel		x										x													x	
04:17	Bassin d'eau dans l'espace public		x											x													x
04:53	Déplacement de la petite salle à la pointe		x															x								x	
05:12	Besoin d'un beau centre		x																								x
05:45	Déplacement du centre		x																								
07:14	Appel conditionné par la hauteur, la façade		x																								
08:14																											
56:37	Hall et stockage dans le même volume			x																							
56:56	Augmentation de la hauteur du hall			x																							
58:28	Suppression du second porte-à-faux			x																							
58:39	Découpe de façade pour voir la salle			x																							

Figure 63. Illustration de la description d'une nouvelle information en conception épisodique.

Le dernier critère descriptif est la présence de trace graphique accompagnant l'énonciation de l'information. Par trace graphique, nous faisons référence aux diverses annotations et esquisses possibles, définies, pour plus de précision, comme « tout trait intentionnel réalisé par un sujet. Sont donc exclus les traits liés à une trop grande sensibilité de SketSha lorsque que le stylo est utilisé comme outil de pointage. Précisons qu'une succession de traces est considérée comme une seule et même interaction si elle est réalisée par un même sujet et sur un même focus » (Calixte *et al.*, 2021, p. 6)

7.3.2 Modélisation des moments de conception épisodique

Une fois les moments de conception épisodique identifiés au sein de la revue et les informations échangées collectées et décrites dans une grille, nous importons ces données dans le logiciel CommonTools. Celui-ci offre la possibilité de calculer plusieurs statistiques et de générer plusieurs natures de graphiques comme des lignes du temps du processus de conception observé (Ben Rajeb & Leclercq, 2015a; Baudoux & Leclercq, 2022b).

Parmi les différentes statistiques et visuels issus de CommonTools, la ligne du temps ci-après nous permet de reconstituer l'enchaînement des informations du projet au cours des 64 épisodes de conception identifiés et donc leur évolution. Ainsi, dans une lecture longitudinale, pour chaque équipe et pour les trois sessions de revue de projet observées, nous pouvons analyser les fluctuations des informations, des moyens et des représentations utilisés.

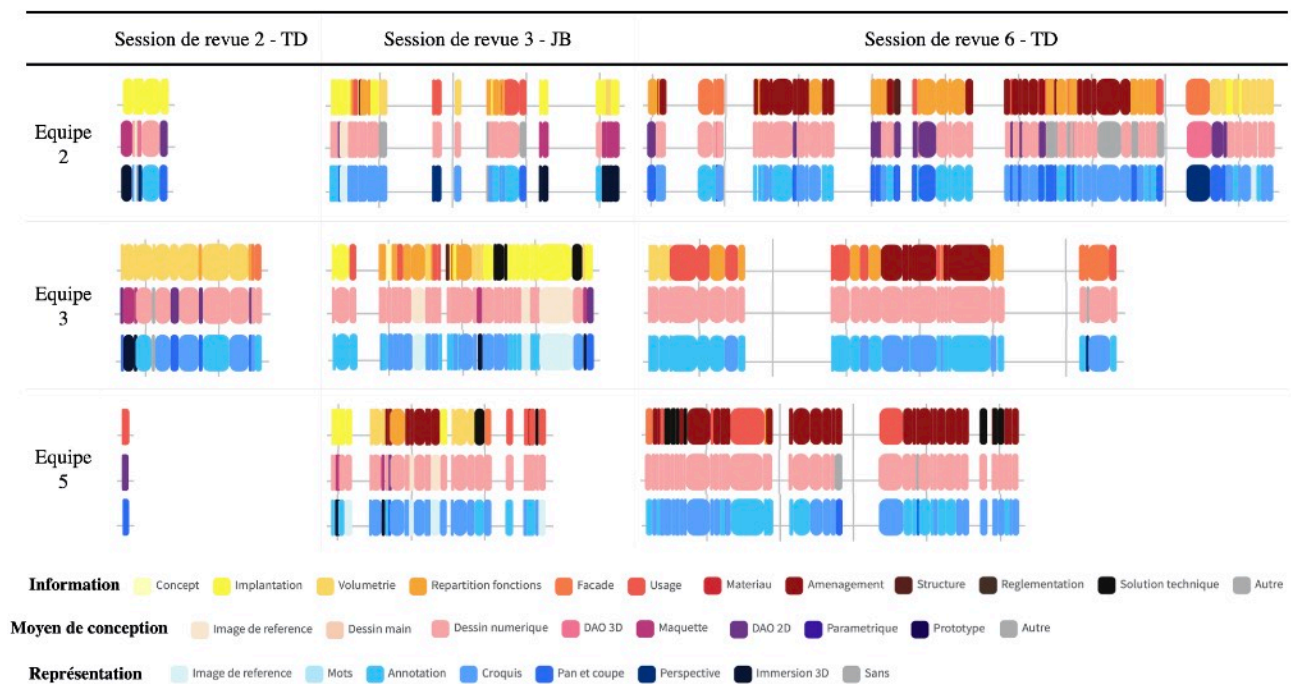


Figure 64. Caractérisation des séquences de conception épisodique observées pour les équipes 2, 3 et 5 (Baudoux & Leclercq, 2022b, p. 8).

7.3.3 Résultats de l'observation de l'évolution en conception épisodique

Maintenant que nous avons explicité tout le protocole et modélisé le processus observé avec les différentes données collectées, nous allons les analyser.

7.3.3.1 Activités typiques de conception

Le premier élément que nous analysons (analyse publiée dans Baudoux & Leclercq, 2022b) est l'occurrence d'utilisation de chaque objet médiateur (moyen ou représentation) pour déterminer si le processus est composé de certaines activités de conception typiques. C'est-à-dire que nous calculons la fréquence à laquelle chaque moyen de conception et chaque représentation externe sont

utilisés pour chaque épisode de conception épisodique ainsi que pour l'ensemble de ces moments, indépendamment de l'équipe concernée. Les résultats de ces calculs sont représentés sous forme de pourcentage cumulé (100%) dans la figure suivante.

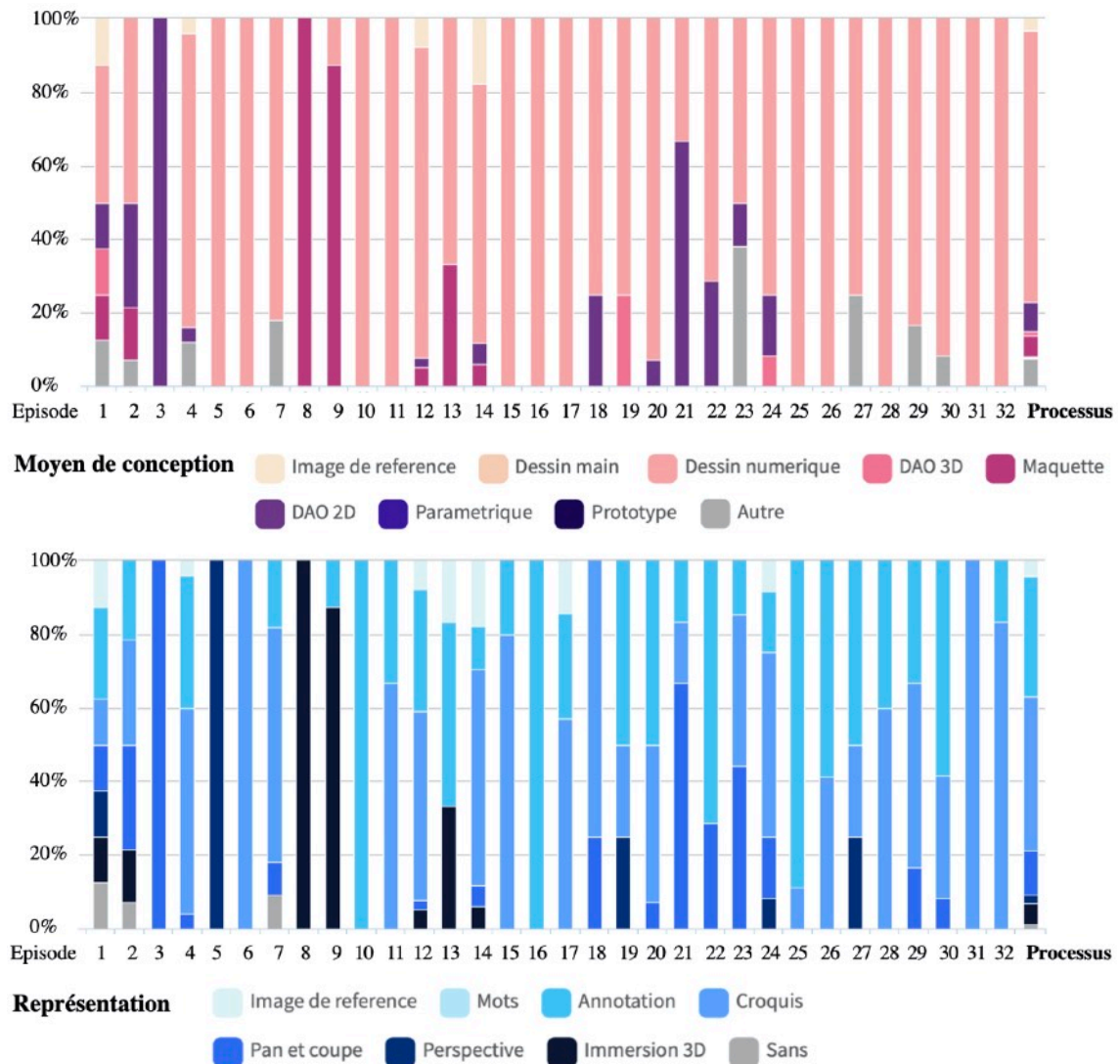


Figure 65. Illustration des proportions d'usage des différents moyens et représentations pour les 32 premiers épisodes de conception, toute équipe confondue (Baudoux & Leclercq, 2022b, p. 9).

En première lecture (Baudoux & Leclercq, 2022b), nous pouvons déjà observer une utilisation généralisée, tout au long du processus et pour chaque équipe, du moyen *Dessin numérique* et des représentations externes de type *Annotation* et *Croquis*. Dans certains épisodes, la *maquette* ou les *plans* de *DAO* sont utilisés en complément.

Pour affiner notre lecture, nous croisons ci-après l'usage de ces médias (moyen et représentation) avec les types d'information qu'ils génèrent et véhiculent. La figure 66 illustre ces occurrences de croisement. Nous y mettons en évidence par des encarts bleus les colonnes d'occurrences d'informations générées et véhiculées par les médias précédemment observés comme prépondérant dans les usages.

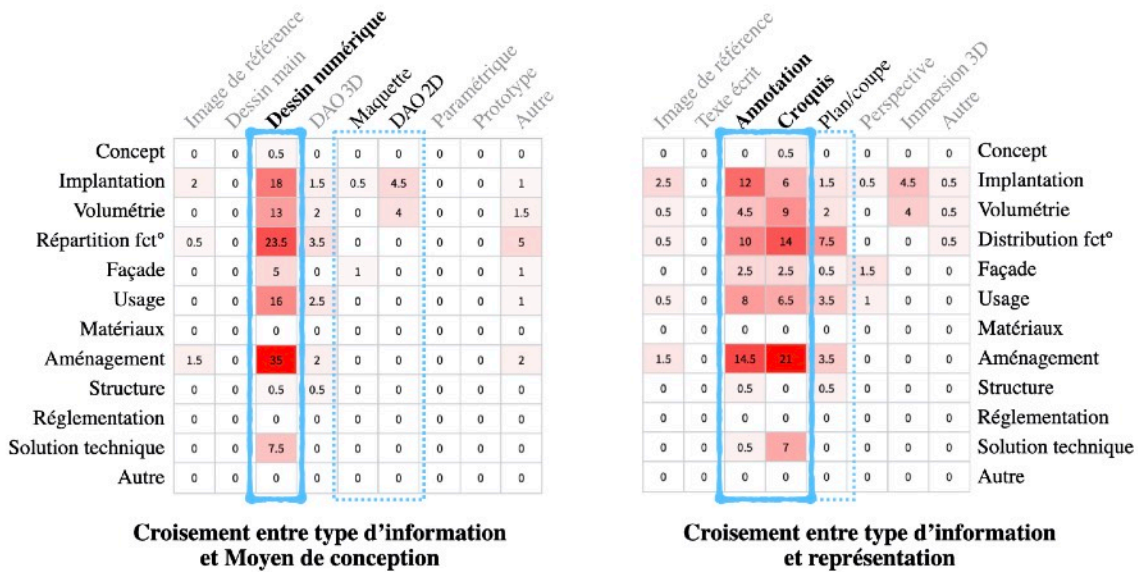


Figure 66. Proportion d'usage des différents croisements Information-Moyen et Information-Représentation, tout au long du processus, toute équipe confondue, en conception épisodique (Baudoux & Leclercq, 2022b, p. 10).

Ainsi, si nous nous concentrons sur les objets médiateurs prépondérants de la conception (identifiés à la figure ci-dessus), c'est-à-dire le dessin numérique, les annotations et les croquis, nous constatons qu'ils sont employés pour supporter la plupart des informations conçues, comme le montrent les encarts bleus (figure 66). Notons que, ponctuellement, les informations de répartition des fonctions sont en outre exprimées grâce à des modèles numériques 3D ou à l'oral exclusivement (c'est-à-dire la classe *autre*). Les informations d'implantation ou de volumétrie sollicitent également, en plus des médias prépondérants, quelques fois l'usage de l'immersion 3D.

Nous remarquons que ces résultats divergent de ceux obtenus lors de la caractérisation des usages de médias pour générer et véhiculer les informations en conception de longue durée. Pour faciliter la comparaison, nous exprimons à la figure ci-après les croisements d'usages de médias et informations vus en conception de longue durée selon le même formalisme que pour la conception épisodique.

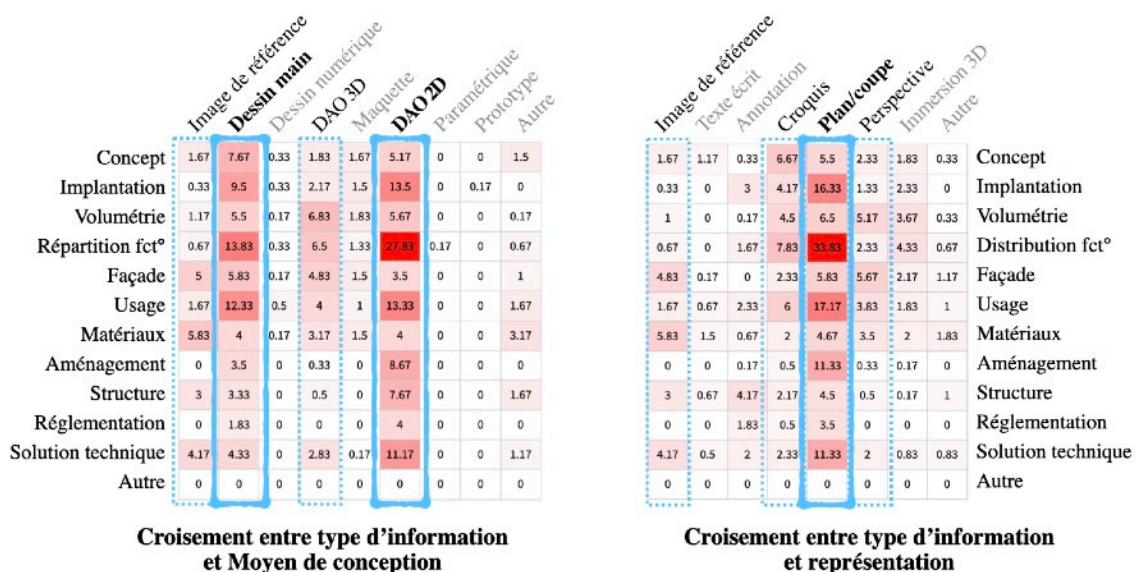


Figure 67. Proportion d'usage des différents croisements Information-Moyen et Information-Représentation, tout au long du processus, toutes équipes confondues, en conception de longue durée.

Notre hypothèse d'explication de cette divergence se base sur le constat que la conception épisodique, à la différence de la conception longue durée, n'est pas une activité libre partiellement individuelle, mais constitue plutôt un moment de résolution collaborative de points spécifiques de l'artefact en cours de conception. Nous observons que les concepteurs travaillent à leur activité de conception dans un *We-Space*, au sens de Ben Rajeb (2012), c'est-à-dire dans un seul espace partagé de réflexion, mental comme physique. Le principe d'économie cognitive est alors appliqué et nous voyons les concepteurs employer l'outil déjà à disposition au moment où la conception épisodique s'enclenche. Ils ne changeront d'outil que si celui-ci est trop limitant. Ce phénomène est confirmé par Safin (2011), et plus récemment par Calixte (2021), dans leurs observations et travaux de recherche. Dans le cadre de cette expérience, c'est SketSha qui est à disposition des concepteurs. Les médias favorisés sont donc de l'ordre des annotations et esquisses numériques.

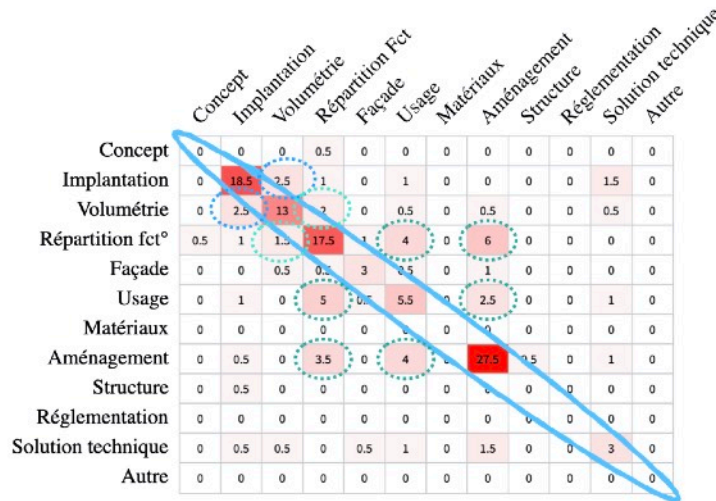
Notons tout de même que les concepteurs sont libres de mobiliser tout autre média selon leur besoin, à l'exception d'anciens plans papier (choix des encadrants). Nous en déduisons donc que l'usage du dessin numérique pour réaliser des croquis ou annoter des plans, majoritairement observé, est satisfaisant pour la réalisation des tâches de conception. Les concepteurs n'ont besoin de le compléter que par la maquette physique lors de certains épisodes.

Il est intéressant de voir que ces usages d'esquisse à la main et d'annotation, qui présentent des caractéristiques de haut niveau d'abstraction et de flou, perdurent même lors de la production des documents au net (figure 65).

7.3.3.2 Associations récurrentes d'informations

Le second résultat mis en évidence par ces observations de moments de conception épisodique est l'association récurrente d'informations (Baudoux & Leclercq, 2022b). Il est très intéressant d'analyser quelles informations sont associées et traitées ensemble par les concepteurs ainsi qu'étudier l'usage des représentations externes et constater si elles sont identiques pour les différentes informations associées ou non.

Nos données montrent que pour la grande majorité des épisodes, les informations abordées successivement par les concepteurs sont de même typologie et portent par conséquent sur le même sujet. Pour preuve, le graphique ci-après montre le calcul d'occurrence de croisement entre les différentes typologies des informations énoncées et leur suivante. Nous y voyons apparaître des occurrences plus fortes sur la diagonale, c'est-à-dire quand les typologies d'informations successives sont identiques.



Croisement entre les typologies d'une information et de sa suivante

Figure 68. Occurrence de croisement entre les typologies de chaque information énoncée et de sa suivante, toute équipe confondue et sur la totalité des moments de conception épisodique observée (Baudoux & Leclercq, 2022b).

Ces associations observées entre des informations du même type traduisent le traitement d'un focus de conception unique et précis par les concepteurs, ce jusqu'à l'obtention d'un consensus. Ce constat est logique puisque ces sessions de conception épisodique visent à évaluer les propositions en cours et à en proposer de nouvelles, plus appropriées.

En visionnant les enregistrements capturés de ces moments de conception, sur base des discussions entre les acteurs, nous confirmons ce résultat : les concepteurs traitent en effet un focus unique jusqu'à ce qu'une proposition soit validée car jugée satisfaisante sur le moment et en regard des contraintes énoncées; ils passent alors au point de présentation suivant ou à la problématique suivante. Pour illustrer nos propos, prenons l'exemple de l'équipe 5 lors de la huitième séquence de conception épisodique relevée (Baudoux & Leclercq, 2022b). Cette équipe est confrontée, dans l'atrium du bâtiment central, au problème posé par la batterie d'ascenseur bloquant la circulation sur le palier ainsi qu'au problème de la répartition irrégulière des colonnes entourant l'atrium et supportant les paliers supérieurs. L'expert suggère de placer les ascenseurs un peu plus loin et de redistribuer la position des colonnes. Cette suggestion conduit à modifier la forme des paliers afin d'éliminer certaines colonnes du passage. Ces modifications sont ensuite répercutées sur les étages supérieurs et inférieurs. Enfin, le nouvel aménagement est validé et la section des colonnes est déterminée comme circulaire.

Les concepteurs passent au point suivant une fois que la problématique nécessitant un épisode de conception est jugée suffisamment solutionnée. Nous analysons, lors de ces changements de focus, quelles typologies d'information y sont associées. La figure 68 montre que, lorsqu'un changement de focus a lieu, trois associations préférentielles sont observées (respectivement en bleu, turquoise et vert dans la figure ci-dessus) :

- Volumétrie et Implantation;
- Volumétrie et Répartition fonctionnelle;
- Usages, Répartition fonctionnelle et Aménagement.

Ces associations récurrentes de second ordre nous amènent à déduire qu'il existe, dans les schémas de pensée des concepteurs, des parcours cognitifs préférentiels entre les différents focus possibles et que les concepteurs mobilisent des logiques de raisonnement fondées sur des associations d'idées (Baudoux & Leclercq, 2022b).

7.3.3.3 Importance des traces graphiques

Nous constatons un large usage de la trace graphique dans nos résultats. Elle accompagne en effet, en moyenne selon les équipes, 78% des informations générées et communiquées. Ce haut pourcentage et la faible variation entre les équipes montre bien l'importance de son usage (Baudoux & Leclercq, 2022b). Les traces graphiques semblent être le moyen privilégié pour soutenir ces épisodes de conception. Cet usage peut s'expliquer par son potentiel à assister la communication entre les concepteurs, à renforcer les commentaires oraux, à illustrer concrètement les solutions proposées ou à cristalliser l'évolution de l'artefact.

Table 6. Pourcentage des informations supportées par la trace graphique (Baudoux & Leclercq, 2022b, p. 13).

Equipe	1	2	3	4	5	6	Total
Nb d'informations	102	334	91	113	83	110	833
Occurrence de trace graphique	78	225	75	93	68	86	625
Pourcentage	76.5 %	67.4 %	82.4 %	82.3 %	81.9 %	78.2 %	78.1 %

Dans un complément d'analyse, réalisé auprès de la Dr. Calixte sur le même terrain de conception et dans les mêmes conditions de recueil de données de moments de conception épisodique, nous avons pu décrire plus précisément le rôle de la trace graphique, que nous synthétisons ci-après (Calixte, Baudoux & Leclercq, 2021).

Les traces sont en fait « les ressources produites par les acteurs pour regrouper les actions cognitives et gestuelles ainsi que les enjeux négociés autour du projet » (Calixte *et al.*, 2021, p. 3). Elles sont donc les objets médiateurs de ce processus de conception collaborative (Gregori *et al.*, 2011) et elles sont porteuses de signification (Lecourtois, 2010).

Elles ont trois grands rôles relatifs à la communication, à l'évaluation du projet et à la traçabilité de ce dernier. Leur premier rôle est évidemment de formaliser les idées et de soutenir la communication (Elsen, 2011; Calixte *et al.*, 2021). Ce rôle est détaillé dans notre analyse complémentaire réalisée avec la chercheuse Calixte : « Certains traits sont ajoutés aux documents pour faciliter leur lecture. Les documents (...) présentés lors de la revue sont considérés comme des documents de travail. Il est donc tout à fait compréhensible que ceux-ci soient complétés en direct pour s'assurer que l'ensemble de l'information qu'ils contiennent soit perçu par les interlocuteurs. Dans la même logique, les documents peuvent être complétés par différentes formes de traits (flèche, cercle, droite, etc.) dans le but de s'assurer que les plans ou une zone des plans soient compris de la même façon par l'ensemble des acteurs » (Calixte, Baudoux & Leclercq, 2021, p. 9).

Le second rôle est d'assister l'évaluation du projet (Gregori & Fixmer, 2013), mais aussi les propositions d'alternatives. En permettant l'externalisation des pensées des concepteurs et en matérialisant les propositions, elles deviennent plus faciles à évaluer (Safin, 2011). En outre, en déchargeant mentalement le concepteur, il est plus facile pour lui de générer des idées.

Finalement, Gregori (2011, 2013) montre qu'elles assurent la traçabilité du projet en cristallisant les invalidations du projet et ses évolutions.

Notons que l'environnement numérique, dans notre cas le bureau virtuel, peut influencer l'usage de la trace graphique. En effet, en ne prenant pas le risque de rendre le document illisible avec une trace numérique, toujours effaçable, ou un document numérique, toujours duplicable, les concepteurs peuvent allègrement exploiter les possibilités de soutien qu'offrent les traces graphiques. (Calixte, Baudoux & Leclercq, 2021).

7.3.3.4 Limites de l'étude en conception épisodique

La première limite est que les épisodes de conception observés sont en partie conditionnés par la thématique de la revue. Ce sont également des moments de réunion et de discussion imposés par les experts invités de l'atelier. Si l'apparition de ces moments de conception épisodique n'est donc c'est pas spontanée, cela permet par contre de cibler les focus pour l'observation.

En outre, même si les architectes et ingénieurs sont dans une dynamique de collaboration entre experts concepteurs, leur posture reste principalement celle d'un étudiant en revue : il sera plus enclin à s'aligner sur l'avis de l'expert lors de l'évaluation et de la (in)validation des propositions architecturales.

Finalement, le logiciel d'esquisse numérique SketSha n'est pas commun. En son absence, nous aurions probablement plutôt observé les pendants « papier » de ces mêmes activités d'esquisse et d'annotation.

7.3.4 Conclusions pour l'instrumentation de la transition

L'objectif de cette observation était de se concentrer sur les informations caractéristiques du projet afin d'étudier la transition de médias/information et d'identifier précisément les endroits opportuns pour collecter les données pendant des épisodes de conception en direct.

Nous avons ainsi vu que les concepteurs mobilisent principalement des activités de dessin de croquis à la main sur support numérique, des annotations. Ces activités sont mobilisées pour générer et partager l'ensemble des typologies d'information. Pour faciliter l'instrumentation de la conception, il est donc crucial de ne pas entraver ces activités prépondérantes et essentielles. De plus, afin de respecter le processus agile des concepteurs, il est nécessaire de permettre l'usage des maquettes 3D, des plans et des coupes, car ces outils peuvent parfois être utilisés en complément par les différents acteurs impliqués dans le processus de conception.

Il est également important de veiller à ne pas contraindre les pratiques organisationnelles et de coordination des concepteurs puisque nous avons observé des usages différents entre les activités de conception longue et celles de conception épisodique ainsi que des processus de conception focus par focus selon un certain cheminement cognitif récurrent par associations typiques de typologies d'informations entre elles.

Finalement, nous avons observé l'importance de la trace graphique dans les activités de conception, tant pour l'action que pour les traits, à la fois en génération mais également en évaluation de solutions. Nous garderons en mémoire qu'avec une esquisse numérique les concepteurs exploitent d'avantage les apports de la trace graphique (Calixte, Baudoux & Leclercq, 2021).

Pour la **conception épisodique**, l'analyse des transformations d'informations et des usages de médias les supportant révèlent (Baudoux & Leclercq, 2022b) :

- des activités largement effectuées au moyen de croquis à la main et d'annotations, et dans un second temps complétées de maquettes et de plans de DAO, qu'il faudra donc soutenir par l'instrumentation ;
- une conception centrée sur un focus unique et précis, présentant des cheminements cognitifs préférentiels pour passer d'un focus au suivant, qu'il nous faudra respecter ;
- l'importance de la trace graphique en génération comme en évaluation de solutions, favorisée en outre par les outils d'esquisse numérique.

In *episodic design*, the analysis of information transformations and of the media used to support them reveals (Baudoux & Leclercq, 2022b) :

- *activities largely carried out through hand sketches and annotations, and secondly supplemented by models and CAD plans, which will therefore have to be supported by instrumentation;*
- *a design oriented on a unique and precise focus, and presenting preferential cognitive paths to move from a focus to the next one, which we will have to follow;*
- *the importance of the graphical trace in solution generation as well as in evaluation, which is furthermore enhanced by the digital sketching tools.*

A detailed content, in English, of this section has been published in « Baudoux G., & Leclercq, P. (2022b). Collaborative design: Evolution of project's information and role of the graphic interactions, DCC Conference, UK. »

Chapitre 8

Assistance par conversation réflexive multi-instrumentée

Pour proposer une méthode d'identification et d'articulation des informations dans un modèle du bâtiment en conception, il nous faut maintenant déterminer comment collecter et formaliser ces informations.

Le présent chapitre présente l'expérience majeure de cette thèse : une capsule de conception en laboratoire outillée par notre principe d'instrumentation. Nous y observons tout d'abord comment le concepteur converse avec ce dispositif, ensuite nous déterminons si l'accès à ces modèles présente une plus-value effective pour l'activité du concepteur et finalement nous y étudions comment extraire et modéliser les informations générées par les concepteurs.

In order to propose a method of identifying and articulating information into a model of the building being designed, we now need to determine how to collect and formalise this information.

This chapter presents the major experiment of this thesis : a laboratory design capsule equipped with our proposed instrumentation. We first study how to extract and model the information generated by the designers, then we observe how the designer converses with this device and finally we determine if the access to these representations presents an added value for the designer's activity.

8.1 Cadre expérimental pour l'instrumentation de la conception

Pour rappel (voir section 6.2), nous avons proposé une alternative à la transition actuelle entre idéation et spécification numérique exhaustive au moyen d'une modélisation automatisée des esquisses. Ce principe d'instrumentation vise à collecter automatiquement, tout au long du processus, les informations provenant des traces graphiques des concepteurs. Un Interpréteur générera ensuite automatiquement, à partir de ces informations et traces, un modèle 3D du bâtiment en cours de conception, le Modèle Architectural Numérique. Celui-ci, plus riche en sens, pourra être implémenté dans les phases de production, notamment pour enrichir la maquette numérique BIM. Nous désirons, à cette fin, exploiter les nombreuses possibilités de l'interprétation d'esquisse.

8.1.1 Promesses du système d'aide à la conception

Notre proposition de système d'aide à la conception vise trois fonctionnalités principales, détaillées ci-après.

8.1.1.1 Collecter les informations

L'Interpréteur collectera les informations utiles à la conception. Elles seront collectées au départ des moyens de conception et représentations externes identifiés au chapitre précédent comme spontanément utilisés par les concepteurs. Pour rappel, nous avons observé dans ce chapitre l'importance du rôle joué par les images de référence et nous y avons constaté que les activités de conception étaient largement effectuées au moyen de croquis à la main et d'annotations, et dans un second temps complétées de maquettes 3D et de plans de DAO.

Il est en outre primordial de laisser au concepteur la liberté de choisir ses outils : notre proposition d'instrumentation se doit donc de le restreindre le moins possible. Il est également important de veiller à ne pas contraindre les pratiques organisationnelles et de coordination des concepteurs. Nous avons en effet observé, d'une part, des usages différents entre les activités de conception longue et celles de conception épisodique et, d'autre part, des processus de conception focus par focus selon un certain cheminement cognitif récurrent (par associations typiques de typologies d'informations entre elles).

L'Interpréteur permettra en second lieu, par cette collecte, la traçabilité des informations complétant, au fur et à mesure de l'avancement et des informations recueillies, la description globale du projet en cours de conception.

8.1.1.2 Automatiser la production

L'Interpréteur automatisera la production architecturale. Il générera des plans mis au net, respectant les codes de représentation et ayant diminué le taux d'ambiguïté, ainsi adaptés pour la communication. Cette production automatique déchargera le concepteur, lui permettant de continuer la phase de conception du projet.

Par ailleurs, nous avons observé au chapitre précédent l'importance de la trace graphique dans les activités de conception, tant pour l'action que pour les traits, à la fois en génération mais

également en évaluation de solutions. Nous garderons en mémoire qu'avec une esquisse numérique les concepteurs exploitent d'avantage les apports de la trace graphique (Calixte *et al.*, 2021).

8.1.1.3 Stimuler l'idéation

L'Interpréteur constituera en plus un support à l'idéation. Trois axes de stimulation de l'idéation sont choisis ici, en regard des discussions menées dans les chapitres de cadre théorique :

- Favoriser le raisonnement analogique, en fournissant des images d'inspiration, pour stimuler la créativité et la génération de solutions.
- Présenter différents points de vue et représentations de l'artefact conçu pour favoriser la redécouverte sous un autre angle et par là la détection d'erreurs, l'évaluation des solutions et la génération de solutions plus satisfaisantes.
- Favoriser la dimension interactive de la conception dans ses itérations perceptives des solutions proposées et des contraintes structurées.

A cette fin, l'Interpréteur renverra donc au concepteur des représentations externes automatiquement générées constituées d'images d'inspiration ainsi que des représentations externes de la proposition.

8.1.1.4 Structure générale de l'Interpréteur

L'Interpréteur sera donc un « logiciel » d'interprétation d'esquisse reconnaissant les croquis à main levée comme les plans de DAO, numérisés ou dessinés sur support numérique, ou des numérisations de maquettes. En fonction principale, il alimentera le modèle sémantique de caractérisation globale du projet et produira les livrables attendus pour nourrir les phases ultérieures. En fonction secondaire, et dont la pertinence sera étudiée par la suite, il renverra au concepteur quatre typologies de représentation externe : des images d'analogie, des rendus du projet, des plans nets et un modèle 3D.

8.1.2 Développement de l'Interpréteur

Cette thèse a pour but de dessiner une voie d'appréhension des esquisses architecturales pour enrichir le processus de conception et non de proposer une solution instrumentale effective au cahier des charges exhaustif caractérisant les fonctionnalités à développer. Il est en outre nécessaire, avant de s'atteler à un quelconque développement, d'étudier les potentiels et impacts d'une instrumentation de ce type sur les activités de conception. Nous procéderons donc à une étude en laboratoire, selon la technique du Magicien d'Oz. Une étude en laboratoire ne permet évidemment pas d'observer des situations réelles dans toute la complexité de leurs caractéristiques, contrairement aux études sur terrain mais, comme l'affirme Falzon (1997, p. 2), « la controverse laboratoire-vs-terrain ne relève pas du débat méthodologique, mais d'une décision quant à l'objet d'étude ». Hors ici, l'objet d'étude est la réaction des concepteurs face à un principe d'instrumentation encore non développé, c'est pourquoi nous mobilisons la technique du Magicien d'Oz.

8.1.2.1 Méthode générale d'un Magicien d'Oz

La technique du Magicien d'Oz consiste à simuler les fonctionnalités d'une technologie innovante en les remplaçant par un travail humain équivalent, dissimulé et en temps réel. Ainsi, le sujet observé croit utiliser la dite technologie sauf qu'elle n'est pas encore opérationnelle. Cette méthode permet d'évaluer en amont l'impact sur les utilisateurs et leur interaction avec la machine (Dahlbäck et al., 1993; Browne, 2019; Rietz et al., 2021).

Alevêque (2019, p. 15), dans son analyse historique, technique et sociologique des méthode de test d'outils mobilisant l'Intelligence Artificielle conclu que « le Magicien d'Oz tient sa pertinence heuristique, implicitement mais essentiellement, de la projection du progrès technique et scientifique. Non seulement celle au fondement de l'IA, c'est-à-dire la visée, toujours renouvelée, de se rapprocher de l'intelligence humaine, mais également l'anticipation de l'innovation technique de l'outil informatique. Il s'agit de simuler ce que l'on pense pouvoir bientôt programmer. Le Magicien d'Oz n'est pas une aberration ou un sous-produit de la recherche en IA. Il est l'aboutissement, en termes d'expérimentation, de sa logique. Ainsi, en s'affranchissant des contraintes matérielles de l'innovation technique, les chercheurs-magiciens situent leur pratique dans une liminalité entre science et ritualisation, où la machine n'étant pas en mesure d'imiter son modèle, c'est au modèle de simuler ce que pourra être sa copie ».

Du côté pratique, cette technique est éprouvée depuis les années 70 dans de nombreux développements d'outils, et surtout depuis l'avènement des logiciels d'IA (Alevêque, 2019). Elle est largement employée dans les recherches portant sur les Human-Robot interactions (Riek, 2012 ; Clabaugh & Matarić, 2019) et sur la conduite automatisée (Frison *et al.*, 2020). Elle a également été mise en oeuvre dans le domaine de la *clinical psychology* avec les agents conversationnels (Gaffney, Mansell & Tai, 2019), dans le développement de la réalité virtuelle ou augmentée (Cordeiro *et al.*, 2019 ; Freitas *et al.*, 2020), mais aussi pour la conception d'éditeurs de textes (Yang *et al.*, 2019), la conception de jeux vidéos (Yesilbek & Sezgin, 2021) ou encore de conception d'objets ornementaux sur base de descriptions vocales (Cuadra *et al.*, 2021). Mais elle n'a pas, à notre connaissance, été déployée dans le cadre de la conception d'un projet architectural. Elle présente pourtant l'intérêt, s'agissant de dispositifs d'interprétation de données ambiguës comme des esquisses, de pouvoir informer les chercheurs à la fois sur les interactions humain-machine, mais aussi sur les processus d'interprétation en cours. Elle fournit un instrument de simulation d'interprétations complexes relativement facile à mettre en oeuvre. Cette évaluation par prototype en Magicien d'Oz est efficace pour mettre en évidence les besoins et attentes des utilisateurs ainsi que les points qui pourraient s'avérer problématiques au développement (Anastassova, Megard & Burkhardt, 2007).

En outre, par rapport à nos objectifs d'instrumentation de la conception, elle est la seule méthode qui permette de proposer au concepteur des représentations externes adaptées à son propre projet architectural en tout temps de sa conception. D'autres dispositifs de banque de données construites en amont en ligne comme imprimées n'auraient pu rencontrer cet objectif.

Notre objectif, au travers de cette mise en place est de plonger les sujets concepteurs en immersion dans cette technologie, remplacée donc par une équipe de lutins modélisateurs, le temps d'une session de conception architecturale préliminaire.

8.1.2.2 Faisabilité technique

D'un point de vue faisabilité, nous pensons que les technologies actuelles sont suffisamment matures. Déjà dans les années 2000 (Stahovich, 1996 ; Davis, 2002 ; Notowigigdo, 2004) il était possible d'interpréter les pixels de lignes et d'y combiner les informations de direction et de vitesse afin de générer n'importe quelle forme abstraite. Les logiciels pouvaient reconnaître texte, formes et symboles prévisibles, le tout en 2D, à partir de traces papier numérisées ou de tablettes. Plus récemment, Ding et Liu (2016) montrent dans leur revue de littérature que les inputs ont évolué, acceptant du dessin 2D, du dessin tridimensionnel réalisé par croisement de plans 2D, du dessin en immersion dans un modèle 3D ou encore des perspectives. Il reste par contre encore nécessaire d'avoir une expertise et de connaître les règles de conception du domaine. En termes d'output, des représentations 2D, des modèles 3D ou des diagrammes sémantiques sont tout à fait générables.

Nous nous inscrivons ici dans la continuité du logiciel *NEMo* (Demaret & Leclercq, 2011), développé à la suite d'*EsQUIsE* (Leclercq & Juchmes, 2002; Juchmes, Leclercq & Azar, 2004). Celui-ci est capable de reconnaître les dessins à la main d'architectes sur base des différents symboles conventionnels utilisés spontanément en architecture, sans l'obligation d'employer une représentation spécifique comprise de la machine et ce, même s'ils présentent des incompatibilités, et sait ensuite générer un modèle 3D du bâtiment.

8.1.3 But de l'expérience du Magicien d'Oz

Bien souvent, face aux technologies émergentes, les considérations sont de l'ordre du développement technologique et portent très peu sur l'évaluation des besoins des utilisateurs de la technologie (Anastassova, Megard & Burkhardt, 2007). Les prototypes constituent justement des moyens amenant les utilisateurs à cristalliser l'expression de leur besoin. Notre objectif ici est de déterminer comment récolter et formaliser les informations issues des premières phases de conception de manière à nourrir ainsi le processus de conception et à générer les modèles 3D attendus. La mise en place de cette instrumentation nous amène également à nous questionner sur l'intérêt potentiel du partage de ces modélisations automatiques avec l'architecte pendant son activité de conception. Lui renvoyer des représentations de son propre projet pourrait en effet constituer une plus-value pour la conception en favorisant les phénomènes d'analogie et de redécouverte. Nous désirons donc ici étudier le développement de ce système d'instrumentation et son impact sur les activités des concepteurs.

Concrètement, nous **élaborons un protocole de test** permettant de **comprendre comment extraire le sens** des traces graphiques des architectes et sous quelle forme renvoyer les modèles générés **pour constituer une plus-value** au processus de conception, au-delà de la production des livrables. Ce protocole et les données récoltées nous permettront ainsi de documenter les mécanismes d'interprétation d'esquisse nécessaires pour rendre cette technologie efficiente. Nous pourrons également analyser comment les conversations réflexives de ces concepteurs sont enrichies ou modifiées par le rôle actant de l'instrument déployé.

Rappelons que notre but n'est pas de dresser le cahier des charges exhaustif des fonctionnalités et caractéristiques d'un logiciel à développer mais que nous nous plaçons dans la visée de définir une voie d'appréhension des esquisses architecturales pour enrichir le processus de conception.

8.1.4 Protocole expérimental du Magicien d'Oz

Il est à noter que ce protocole a fait l'objet d'une publication préalable en conférence (Baudoux & Leclercq, 2023c).

8.1.4.1 Contexte expérimental

Pour mener nos expériences, nous bénéficions d'un accès au Usability Lab du LUCID-ULiège. Ce Studio Digital Collaboratif est un espace "augmenté" de 120m², offrant une variété de dispositifs technologiques de collaboration graphique (tablettes graphiques, pupitres connectés, bureaux et murs interactifs), ainsi qu'une suite de logiciels d'esquisse digitale (modeleurs), de communication graphique (SketSha; Elsen & Leclercq, 2008) et de logiciels d'analyse de processus de conception multi-acteurs (CommonTools; Ben Rajeb & Leclercq, 2015a).



Figure 69. Usability Lab du LUCID-Ulège (Baudoux & Leclercq, 2023c)

Les sujets observés sont répartis en deux catégories de rôle: les lutins modélisateurs, cachés derrière l'Interpréteur et les architectes experts, utilisateurs d'un jour de la technologie. Les lutins modélisateurs sont tous ingénieurs-architectes de formation, dans leur troisième ou quatrième année, la formation complète étant de cinq ans. Ils travaillent à la modélisation en temps réel du projet conçu. Pour des raisons logistiques de disponibilité des participants, deux équipes de lutins ont été composées, comportant chacune trois modélisateurs aux tâches spécifiques et un coordinateur. Les sujets concepteurs, quant à eux, sont de profils variés. Nous avons intentionnellement diversifié les profils de manière à éliminer des biais d'expérience, de sensibilité au numérique ou de genre. La population étudiée comporte 9 sujets, 6 hommes et 3 femmes, de formations différentes et ayant en moyenne 10 ± 8 ans d'expérience professionnelle.

Table 7. Caractéristiques de la population de sujets concepteurs étudiée (Baudoux & Leclercq, 2023c).

Sujet	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Date -jj.mm	18.03	21.03	30.03	01.04	15.04	20.04	25.04	27.04	09.05
Genre	Homme	Femme	Homme	Femme	Femme	Homme	Homme	Homme	Homme
Age -années	52 ans	24 ans	25 ans	34 ans	30 ans	30 ans	48 ans	30 ans	28 ans
Formation	Ir. archi	Ir. archi	Ir. Archi	Archi	Ir. Archi	Ir. Archi	Ir. Archi	Archi	Ir. Archi
Activité	Agence	Agence / Recherch he	Agence	Recherch he	Agence	Agence	Agence	Recherch he	Agence
Expérience	Senior	Junior	Junior	Interm.	Interm.	Interm.	Senior	Junior	Junior

8.1.4.2 Principe général de l'expérience

Comme schématisé ci-après, chaque expérience consiste à demander à un sujet architecte de concevoir une maison familiale en milieu urbain, sur un terrain en pente¹⁴. Nous lui fournissons le programme listant les différents locaux demandés par le client ainsi qu'un relevé du terrain accompagné de photos, afin que le concepteur puisse mieux percevoir et comprendre le site. Le sujet concepteur dispose d'une heure et demi¹⁵ pour réaliser l'esquisse de son projet. Il est équipé d'une table graphique avec stylo numérique, constituant l'entrée connectée à l'Interpréteur. L'Interpréteur incarné par les trois lutins modélisateurs dans une pièce séparée, lui renvoie en sortie, à partir des esquisses reçues, (1) un modèle numérique 3D sommaire du projet, (2) les plans, coupes et élévations, le cas échéant, mis au net en format CAD, et (3) une planche d'images d'inspiration ou de rendu réaliste du projet. Ces différents éléments sont renvoyés au sujet concepteur toutes les 5 minutes¹⁶. Ce délai, court et régulier, permet aux lutins modélisateurs de mettre à jour l'avancée de la modélisation tout en se rapprochant au maximum d'une réponse en temps réel. En plus de ces envois spontanés réguliers, le sujet peut à tout moment passer une commande plus spécifique à l'Interpréteur pour demander un point de vue particulier dans le modèle 3D, une coupe ou des images d'inspiration sur base de 3 mots-clefs spécifiés. La conversation entre sujet concepteur et Interpréteur continue ainsi jusqu'à la fin de la conception.

¹⁴ La tâche de conception choisie est suffisamment réaliste pour que les sujets prennent l'exercice au sérieux et pour qu'ils soient amenés à mobiliser des méthodes de conception représentatives de leurs usages réels et à faire appel à la technologie proposée tout en rendant possible l'atteinte d'un certain niveau de concrétisation du projet dans le temps imparti. Le programme est adapté au nombre de concepteur, ici un seul, à la durée de l'expérience et à la difficulté de la tâche assignée aux lutins modélisateurs.

¹⁵ Le temps de conception d'une heure trente est choisie car il permet d'avancer suffisamment dans le projet pour atteindre une première esquisse complète (voir ensemble des esquisses finales à la figure 71) tout en étant suffisamment court pour éviter au concepteur une fatigue mentale improductive et pour que l'expérience globale ne le mobilise pas plus de 3 heures, comme nous le verrons à la section 8.1.4.4.

¹⁶ Soit 17 envois de visuels sur une session de conception.

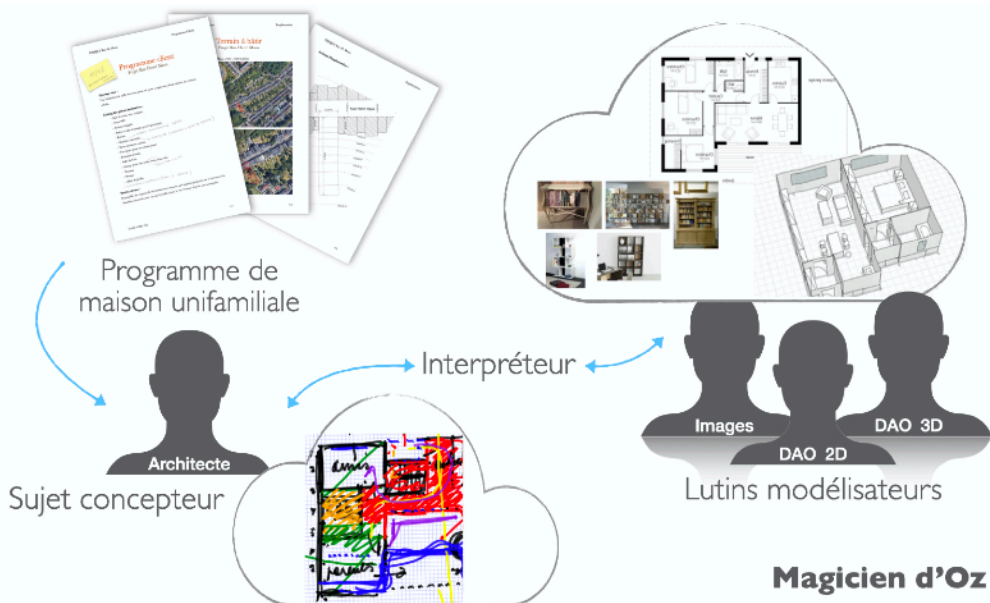


Figure 70. Structure générale de l'expérience (Baudoux & Leclercq, 2023c).

En clôture de cette séquence de conception, une présentation du projet à un client fictif est demandée au sujet sur base des esquisses dessinées à la table graphique et accompagnées des visuels envoyés tout au long de la séquence. Le client fictif est joué par une collègue du laboratoire.

La figure ci-après illustre les différentes esquisses réalisées par chaque sujet concepteur. Les solutions architecturales proposées sont variées et elles ont toutes abouti dans le temps imparti.

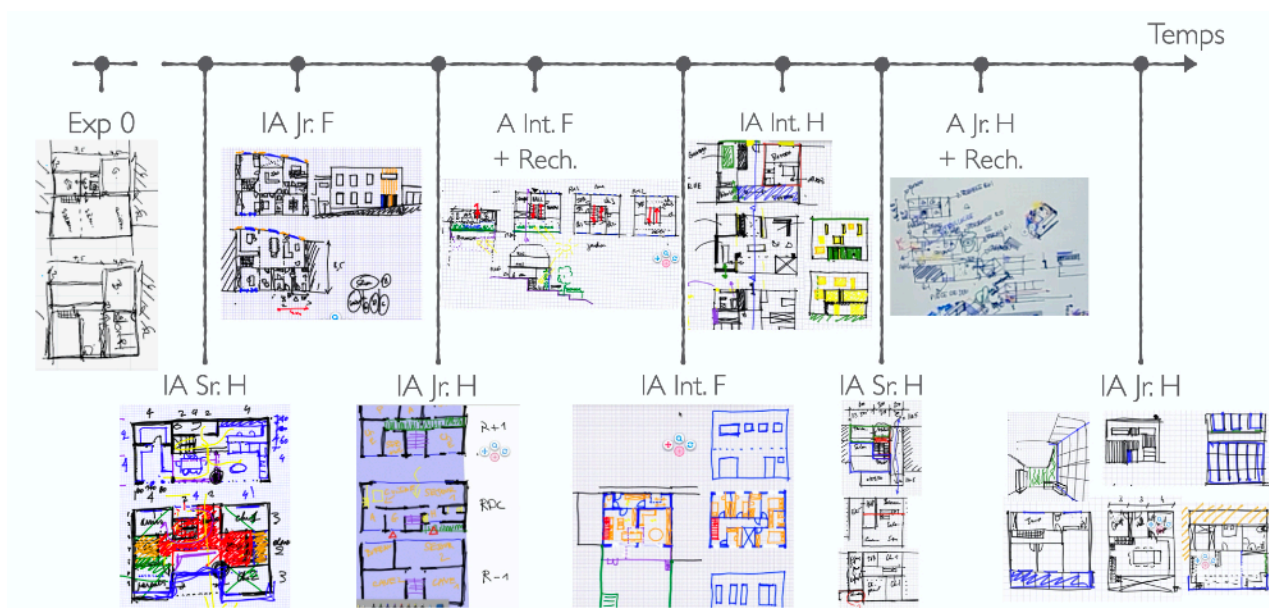


Figure 71. Propositions architecturales individuelles des différents sujets concepteurs - esquisses finales d'input.

8.1.4.3 Espace expérimental

L'expérience prend place dans deux salles adjacentes. Dans la première (figure 72 – « Salle 1 ») s'installent **le sujet concepteur et le chercheur**. Le sujet concepteur prend place à un bureau virtuel composé d'un ordinateur avec trois écrans et d'une tablette graphique de taille A2 encadrée

dans la table. La tablette graphique, via le logiciel d'annotation numérique partagée SketSha (Safin, Delfosse & Leclercq, 2010), est l'interface d'esquisse numérique servant d'entrée pour les dessins. Sur les trois écrans apparaissent, de gauche à droite, (1) le minuteur de l'expérience et la planche en cours d'images d'inspiration ou de rendu réaliste de ce que donnerait le projet, (2) les plans et coupes de DAO en cours, et (3) le modèle 3D en cours ainsi que le terminal de commande¹⁷ de l'Interpréteur (figure 72). Le sujet concepteur dispose également sur son bureau des documents papier reprenant le programme architectural et les informations relatives au terrain. Le chercheur est présent pour faciliter l'usage de l'Interpréteur, rythmer les différentes phases de l'expérience et recueillir les premières données d'observation, à savoir le phasage de l'activité de conception et les moments questionnants sur lesquels il souhaitera revenir plus tard. Plusieurs caméras sont en outre installées dans la pièce pour enregistrer l'expérience : une caméra au plafond, cadrant les usages des documents et de la tablette graphique, une caméra dans le dos du sujet, cadrant les représentations renvoyées par les écrans et une caméra en face du sujet, cadrant ses expressions faciales et son regard porté. Il est également demandé au sujet de penser tout haut, selon un protocole de *think aloud*¹⁸ auquel il a été entraîné, exprimant ainsi ses logiques de conception et ses ressentis face à la machine.

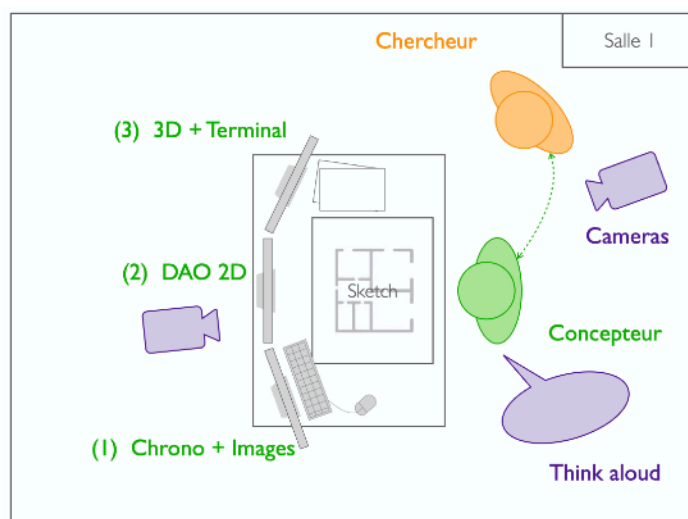


Figure 72. Organisation spatiale et technique de l'expérience - salle de conception (Baudoux & Leclercq, 2023c)

Dans la deuxième salle (figure 73 – « Salle 2 »), s'installe l'équipe des **trois lutins modélisateurs et leur coordinateur**. Ils font face à un écran de régie leur permettant de suivre la conception dans la salle adjacente. Cet écran de régie affiche, de gauche à droite et de haut en bas, (1) le tableau d'images, les documents 2D CAD et la représentation du modèle 3D dont les affichages sont en cours chez le sujet, (2) l'évolution de l'esquisse en temps réel, (3) la vue d'ensemble de la salle de conception, retransmise grâce aux caméras, et (4) le terminal de commande de l'Interpréteur (figure 73). Les lutins modélisateurs travaillent de manière continue et ont chacun une tâche spécifique, à savoir (a) générer un tableau d'images d'inspiration (soit

¹⁷ Le minuteur et le terminal de commande employés dans cette expérience ont été développés spécifiquement par Aurélie Jeunejean, informaticienne au Lucid.

¹⁸ Pour recueillir les intentions de conception, un protocole de *think aloud* a été préféré au carnet de bord utilisé par certains architectes car il y avait déjà de nombreux éléments dans l'espace de travail, que cela nous permettait de contrôler la continuité de l'expression des intentions et de recueillir chacune de celles-ci, que cela donnait accès également aux réactions face au logiciel, et que cela représentait une plus faible charge mentale, surtout pour les concepteurs utilisant peu les carnets de bord dans leur pratique.

d'analogie soit de rendu réaliste de ce que donnerait le projet), (b) la production de plans et de coupes au net ainsi que (c) la production du modèle 3D en fonction des esquisses reçues. Le coordinateur est l'interlocuteur du sujet concepteur, via le terminal de commande, et il transmet les requêtes du sujet concepteur aux lutins modélisateurs. Il déclenche également l'envoi des représentations sur les écrans du sujet concepteur au bout du temps écoulé de cinq minutes et, finalement, apporte un quatrième avis pour aider à l'interprétation des esquisses reçues. Celui-ci est également en communication informelle privée avec le chercheur de manière à pouvoir rendre compte d'un éventuel problème technique.

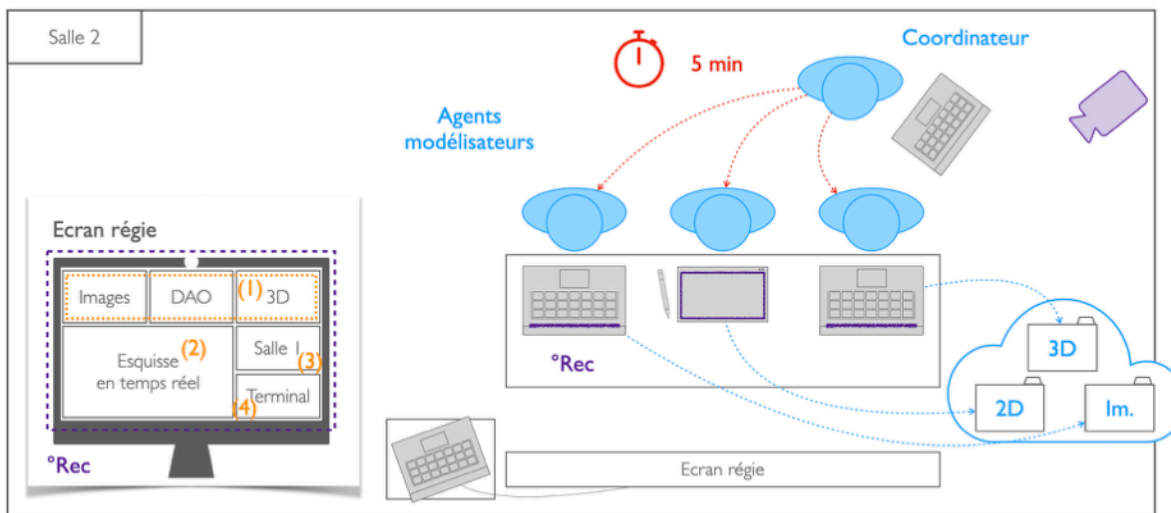


Figure 73. Organisation spatiale et technique de l'expérience - salle de modélisation (Baudoux & Leclercq, 2023c)

Pour mener à bien leur tâche et les placer dans les mêmes conditions que la technologie qu'ils simulent, les modélisateurs ont reçu des consignes strictes :

- les informant du contenu du programme architectural de la capsule de conception ;
- leur interdisant de concevoir une proposition architecturale, leur rôle se limitant à traduire les représentations reçues ;
 - mettant à leur disposition une banque de mobiliers standards ;
 - spécifiant les dimensions à considérer par défaut, sauf contre-indication du sujet concepteur, pour les épaisseurs de murs, les hauteurs sous plafond, les hauteurs d'appuis de fenêtre, les pentes de toit, etc ;
 - mettant à leur disposition le fond de plan d'implantation et la maquette 3D du terrain.

Il est à noter que les lutins modélisateurs chargés de produire les documents 2D au net et le modèle 3D n'entendent pas le *think aloud* du sujet concepteur, de manière à être placés dans les mêmes conditions de données d'entrée qu'un logiciel, soit uniquement l'esquisse et le programme architectural fourni. Les lutins modélisateurs ont également été entraînés sur un sujet 0 et sont donc complètement opérationnels dès la première expérience.

Le travail des lutins modélisateurs est en outre filmé par une caméra placée dans la salle 2. Leurs écrans de travail sont également enregistrés.

La figure ci-après donne un aperçu global du dispositif physique d'expérience.

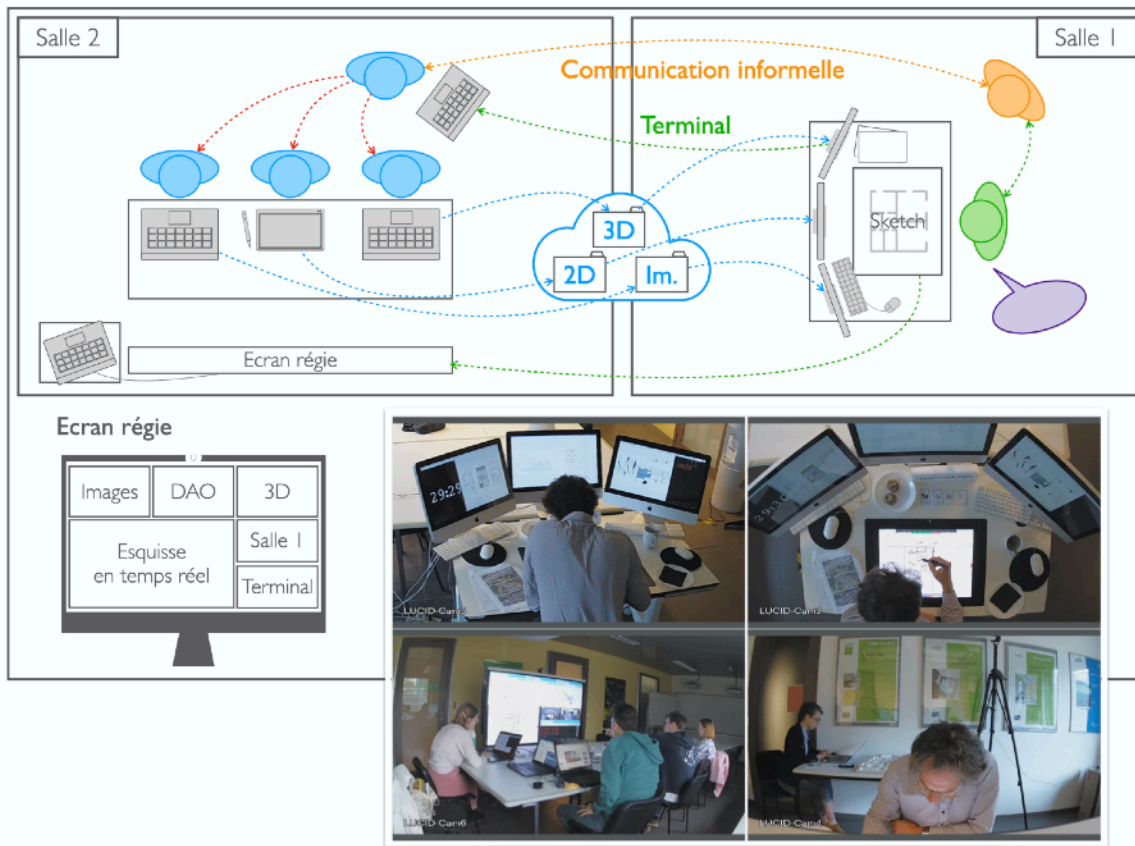


Figure 74. Organisation spatiale et technique de l'expérience - vue globale (Baudoux & Leclercq, 2023c)

8.1.4.4 Déroulé temporel

Le déroulé détaillé de l'expérience, après avoir listé l'ensemble des étapes et leur durée respective, est le suivant :

1. Installation de l'espace expérimental et de l'équipe de modélisation (30' ou 15')
2. Explication de l'expérience au sujet concepteur sans dévoiler le Magicien d'Oz (10')
3. Formation au *think aloud* (10') – court exercice brisant la gêne de parler tout haut pour garantir une bonne récolte des données
4. Présentation du programme architectural (10')
5. Conception et interaction avec l'Interpréteur (90') – des pauses peuvent être effectuées à la meilleure convenance du sujet
6. Clôture de la conception et de la modélisation des lutins (5')
7. Présentation au client (10')
8. Auto-confrontation du sujet concepteur sur les moments spécifiques questionnants (20')
9. Entretien dirigé de synthèse avec le sujet concepteur (20')
10. Entretiens d'auto-confrontation individuels avec les lutins modélisateurs (3x15')

Le temps total prévu par l'expérience est ainsi de maximum 3 heures pour le sujet concepteur et 4 heures pour les lutins modélisateurs, ce qui permet de ne mobiliser les participants qu'une demi-journée.

Le tableau ci-après détaille l'ensemble des tâches de chaque participant ainsi que leur temporalité.

		GAELE	SUJET	CORENTIN/ALICE	PRISCA/CELIA	TAHA/LEA	CELIA/J-L/MYRIAM	AURÉLIE	P. LECLERCQ
Titre :		CHERCHEURE	CONCEPTEUR	LUTIN DAO (3)	LUTIN 3D (4)	LUTIN WEB (1, 2)	COORDINATEUR	SUPPORT TECH.	OBSERVATEUR
Rôle :		Guider le concepteur, entrer les commandes, récolter les minutages pour la confrontation et mener l'entretien post-conception	Concevoir un projet d'habitation à l'aide de l'outil numérique	Dessiner en temps réel et sur commande les plans/coupes/élévations au net (traits rectilignes, perpendiculaires, bonnes cotes, ...)	Modéliser en temps réel ou sur commande le bâtiment (murs sans épaisseur, baies sans détail, porte comme des trous, ...)	Trouver des images d'inspiration appropriées au stade de conception et au projet (spontanément et sur commande) + Sauvegarder les esquisses du concepteur régulièrement et sur commande	Coordonne l'équipe, lance toutes les cinq minutes les top départ de modélisation et d'envois des documents et aide le lutin DAO et le lutin 3D	Aider à l'installation des studios et résoudre les problèmes techniques en cours de route + rôle du client	Prendre du recul sur l'expérience en cours pour observer dans quelle mesure elle permet (ou non) de nourrir les questions posées dans la thèse
Matériel requis :		iPad avec internet + stylet et chargeur	/	iPad avec GoodNote et internet + stylet + chargeur	Ordinateur avec SketchUp et internet et zoom + souris et chargeur	Ordinateur avec internet + chargeur (et souris)	Ordinateur avec internet + chargeur (et souris)	/	/
Documents fournis :		Grille de relevé des moments pour la confrontation, questionnaire d'entretien	Programme, implantation et photos du site + cartes à jouer de commandes	Fond de plan et de coupe, élévation des façades de la rue + bibliothèque de mobilier (ds GoodNote)	Environnement direct et terrain naturel + bibliothèque de mobilier (en .skp 2018)	/	/	/	/
Canal de partage :		SketSha + Terminal [https://www.lucid.uliege.be/software/oz/]	SketSha + Zoom + iCloud	iCloud	iCloud	iCloud + Zoom (reçoit l'audio)	Terminal [https://www.lucid.uliege.be/software/oz/]	/	/
08:00	12:45	Installation des studios + image ne pas déranger porte	/	/	/	/	/	Aide à l'installation des studios	/
08:30	13:15	Aide à l'installation des lutins + lancement et paramétrage SketSha et Zoom	/	Installation personnelle + Ouvrir dossier MagOz iCloud	Installation personnelle + Ouvrir dossier MagOz iCloud	Installation personnelle + connexion Zoom + Ouvrir dossier MagOz iCloud	Installation personnelle + Ouvrir dossier MagOz iCloud	Aide à l'installation des lutins	/
08:45	13:30	Briefing + QR	/	Briefing + QR	Briefing + QR	Briefing + QR	Briefing + QR	Briefing + QR	Briefing + QR
08:55	13:40	Rec video CAM salle 1, CAM salle 2, CAM plafond (sur serveur caméra lucid), SMART (Camtasia /\ prise de son système)							
09:00	13:45	Accueil + explication expérience + Fiche ID	Accueil + explication expérience + Fiche ID						
09:15	14:00	Formation think aloud	Formation think aloud						
09:30	14:15	Explication programme archi et terrain	Explication programme archi et terrain						
09:40	14:25	Lancement Timer (le connexion terminal timer) + connexion Terminal profil chercheur [https://www.lucid.uliege.be/software/oz/]					Connexion terminal [https://www.lucid.uliege.be/software/oz/] + Taper et envoyer - Ready -	Aide technique	
09:40	14:25	Commandes explicites éventuelles envoyées aux lutins + Note des minutes intéressantes pour confrontation	Conception	Production DAO	Production 3D	Sauvegarde et recherche de références	Coordination de l'équipe + Aide DAO/3D	Aide technique	
10:40	15:25	Commandes explicites éventuelles envoyées aux lutins + Note des minutes intéressantes pour confrontation	Production des livrables pour la présentation client	Production DAO	Production 3D	Sauvegarde et recherche de références	Coordination de l'équipe + Aide DAO/3D	Aide technique	
11:10	15:55	Fin rec vidéos + Téléchargement extraits CAM 1	PAUSE	PAUSE	PAUSE	PAUSE	PAUSE	PAUSE	PAUSE
11:25	16:10	Téléchargement extraits CAM 1 + Rec video CAM salle 1	Présentation du projet au client	PAUSE	PAUSE	PAUSE	PAUSE	Rôle du client (écouter la présentation et poser l'une ou l'autre question au choix sur le projet)	
11:35	16:20	Auto-confrontation sur base des extraits video	Auto-confrontation sur base des extraits video	Rangement effets personnels Studio 2	Rangement effets personnels Studio 2	Rangement effets personnels Studio 2	Rangement effets personnels Studio 2	Rangement effets personnels Studio 2	
11:55	16:40	Entretien dirigé	Entretien dirigé					/	
12:05	16:50	Conclusion et remerciement concepteur	Fin (+ dévoiler envers ?)	Fin rec CAM salle 1				/	
12:10	16:55	Fin rec CAM salle 1 + Sauvegarde documents de l'iCloud							
12:10	16:55	FIN	FIN	FIN	FIN	FIN	FIN	FIN	FIN

Figure 75. Feuille de route de l'expérience - préparation du protocole.

8.1.4.5 Données récoltées

Plusieurs types de données ont été injectées et récoltées dans cette expérience. Les données injectées comprennent les consignes et banques données aux lutins modélisateurs, leur expertise, et les documents de l'énoncé de conception. Les données récoltées sont détaillées et numérotées ci-après.



Figure 76. Schématisation des données injectées et récoltées au travers de cette expérience.

Tout d'abord, les données documentant le **déroulement de l'expérience** sont recueillies en enregistrant l'écran de régie et via les caméras de la salle 1. Nous récupérons ainsi toutes les données caractérisant les phases de l'esquisse, les différents visuels envoyés, leur temporalité ainsi que les éventuelles commandes à l'Interpréteur passées par le sujet concepteur. Nous récoltons également les données relatives aux usages des différents visuels à des fins de communication du projet vers le client fictif.

Les données reprenant **les activités du sujet et son raisonnement** sont collectées grâce aux caméras de la salle 1, dont celle cadrant le visage du concepteur, au protocole de *think aloud* et à l'entretien d'auto-confrontation réalisé en fin d'expérience (sur base des enregistrements caméras et des moments interpellants relevés par le chercheur lors de la capsule de conception). Nous collectons par là l'objet d'attention du concepteur en chaque moment, ainsi que les erreurs déclarées de conception ou de compréhension de l'Interpréteur, les évaluations de la pertinence des visuels reçus, les validations et invalidations d'éléments du projet, les prises de décisions et raisons de choix de certaines propositions, ainsi que les analogies produites.

Ensuite, les données alimentant **l'avis du concepteur sur les potentialités et limites** de la proposition d'instrumentation sont récoltées grâce au questionnaire en fin d'expérience. Nous recueillons ainsi l'évaluation de l'utilité des différentes représentations, les contenus des visuels qui ont manqué à l'utilisateur et le niveau de perturbation ressenti suite aux apparitions spontanées des représentations.

Finalement, les données documentant **les activités d'interprétation et de production des lutins modélisateurs** sont recueillies grâce à la caméra de la salle 2, aux enregistrements d'écrans ainsi qu'à l'issue des entretiens individuels d'auto-confrontation. Nous collectons par là toutes les données visuelles et verbales caractérisant chaque moment de leur activité ainsi qu'une synthèse des raisons exprimées justifiant leurs différents choix d'interprétation et de modélisation.

Nous documentons ainsi $9 \times (90' + 10')$, soit 15 heures, de conception commentée, $9 \times 3 \times 90'$, soit 40 heures et 30 minutes, d'interprétation et de modélisation et nous recueillons $9 \times 40' + 9 \times 3 \times 15'$, soit 12 heures et 45 minutes, d'entretiens explicitant les activités réalisées ainsi que $9 \times 3 \times 17 + 9$, soit 468 documents supports de conception.

8.1.4.6 Faisabilité du protocole

Les moyens de collecte de données, y compris le *think aloud*, ont tous permis de récolter la quantité de données prévues. Les sujets concepteurs étaient satisfaits du résultat architectural de leur session de conception et relevaient le grand potentiel d'aide de cette technologie. Les lutins modélisateurs, de leur côté, ont pu atteindre de bons rendements de production.

Par ailleurs, chacun des sujets s'est senti à l'aise, satisfait de l'esquisse produite et n'a pas été perturbé dans ses habitudes de conception. L'écologie de la situation de travail a ainsi été protégée. Les outils à disposition étaient en outre faciles d'usage et n'ont pas nécessité de temps d'apprentissage. Ce protocole élaboré intègre en ce sens tout le savoir-faire IHM du LUCID, laboratoire d'accueil de cette expérience contrôlée.

La limite principalement pointée du protocole de cette expérience est liée à la structuration intrinsèque d'un Magicien d'Oz qui ne permet pas de simuler parfaitement le timing de réaction d'une technologie, l'humain restant plus lent à la production. Cet état de fait a partiellement impacté les activités des sujets concepteurs qui ont parfois changé de tâche en attendant la réception du visuel commandé. Une autre limite de la technique du Magicien d'Oz pourrait être que cela ne réplique pas les erreurs du système et donc ne teste pas la fiabilité de la technologie. Mais dans ce cas-ci, les lutins ont bien rencontré certaines incompréhensions des esquisses ou modélisé avec certaines erreurs, même si c'était un nombre limité de fois. Nous avons donc pu observer les réactions des sujets concepteurs face à ces erreurs. Quelques coupures du réseau internet institutionnel ont en outre créé des coupures de communication entre les deux salles et de mise à jour des documents. Le protocole mis en place reste dépendant de la connexion internet.

Notons finalement que tous les sujets ont cru être réellement en face d'un logiciel opérationnel. Certains étaient plutôt étonnés que ce soit possible à développer, d'autres étaient conquis et n'ont pas une seule fois remis en cause nos propos.

8.1.5 Pistes d'analyses possibles

Grâce à l'ensemble des données récoltées, nous ouvrons 4 pistes d'analyse possible :

- L'interprétabilité de l'esquisse architecturale : quels sont les éléments (in)compréhensibles, (in)utilisés, transformés par les lutins ? Les modélisations sont-elles (in)utiles ou (in)correctes ?
- La conception par analogie avec les visuels de modélisation reçus : quels sont les rôles de l'exploration, de l'(in)validation, de la redécouverte ? Ces analogies varient-elles dans le temps et quel est leur impact ?
- L'évolution du projet : comment évolue chaque caractéristique du bâtiment de son apparition à sa validation définitive ? Comment sont-elles représentées ?
- L'apprentissage mutuel : comment concepteurs et modélisateurs (plus tard la machine) construisent-ils une communication graphique mutuellement compréhensible et est-ce une forme d'apprentissage progressif ?

Nous choisissons dans cette thèse de répondre à la problématique primordiale suivante, permettant de discuter l'intérêt de notre proposition d'assistance à la conception : quelle(s) plus-value(s) pour l'activité du concepteur peuvent apporter les conversations réflexives avec la machine ? Nous ouvrirons ensuite les perspectives sur une seconde question essentielle : Comment interpréter ces esquisses architecturales pour en extraire les informations à modéliser ?

Nous avons élaboré un protocole de type Magicien d'Oz permettant d'évaluer le principe d'instrumentation proposé pour fluidifier la transition idéation-BIM en interprétant les esquisses des architectes. Ce protocole consiste à immerger 9 concepteurs experts dans un environnement de travail outillé de cette technologie. Nous leur demandons de concevoir un projet de maison sur un dispositif unique de bureau virtuel qui permet d'envoyer en temps réel les traces graphiques produites par le concepteur à une équipe de lutins modélisateurs localisés dans la pièce d'à côté. Cette équipe modélise en temps réel le projet conçu et renvoie, par l'intermédiaire d'écrans de visualisation, des images d'analogies, des images donnant un aperçu du rendu réel du projet, les plans du projet mis au net ainsi qu'un modèle 3D sommaire du projet en cours de conception. La récolte de données se fait au moyen de *think aloud*, d'entretiens d'auto-confrontation post-expérience avec les sujets concepteurs et avec les lutins modélisateurs ainsi qu'en capturant le détail des activités de conception au moyen de plusieurs caméras et écrans de contrôle.

Ce protocole ouvre plusieurs pistes d'analyses comme la question de l'interprétabilité des esquisses architecturales, le potentiel des conversations de conception avec les représentations fournies, la plus-value de la stimulation du raisonnement par analogie ou l'apprentissage mutuel entre sujet et machine.

We developed a Wizard of Oz protocol to evaluate the new technology proposed to smooth the ideation-BIM transition by interpreting architects' sketches. This protocol consists of immersing 9 expert designers in a working environment equipped with this technology. We ask them to design a house project on a graphic table. This graphic table allows the graphic traces produced by the designer to be sent in real time to a team of human modelling agents located in the next room. This team models the designed project in real time and sends back, via visualization screens, analogy images, images giving an impression of the real rendering of the project, the cleaned up project plans as well as a rough 3D model of the project under design. The data collection is done by means of think aloud, post-experience self-confrontation interviews with the design subjects and with the modelling agents as well as by capturing the details of the design activities using several cameras and monitoring screens.

This protocol opens several analysis paths such as the interpretability of architectural sketches, the potential of design conversations with the provided representations, the added value of stimulating analogy-based reasoning or mutual learning between subject and machine.

This section has been published in «Baudoux, G. & Leclercq, P. (2023). Experimenting with a New Proposal for Digital Design. eCAADe conference.»

8.2 Activité de conception réflexive instrumentée

Nous étudions dans cette section la première piste d'analyse retenue suite à l'expérience menée en Magicien d'Oz. En effet, la mise en place de cette instrumentation nous amène à questionner l'intérêt potentiel que ces modélisations automatiques soient partagées avec l'architecte tout au long de son activité de conception dans la mesure où lui renvoyer des représentations de son propre projet pourrait nourrir et aider la conception en favorisant les phénomènes d'analogie et de redécouverte.

En outre, les outils d'interprétation d'esquisses ont du mal à sortir des laboratoires, car souvent les belles promesses d'interprétation se heurtent à une mauvaise anticipation de la reconfiguration des activités qu'elles impliquent (Safin *et al.*, 2021).

Nous étudions donc ici l'impact de cette technologie sur les activités des concepteurs. Nous analysons comment les conversations réflexives¹⁹ de ces concepteurs sont enrichies ou modifiées par le rôle actant de l'instrument proposé.

Pour cela, nous regardons concrètement les actions et activités mises en place à la suite de la réception des différents visuels envoyés par l'Interpréteur. Nous regardons si des récurrences et patterns apparaissent dans ces activités, et quel est l'impact de la consultation de ces visuels sur la conception en cours.

8.2.1 Méthodologie d'analyse

Décrivons pas à pas la méthodologie employée pour analyser les données recueillies grâce au protocole détaillé en section 8.1.4, documentant les activités des sujets concepteurs. Nous spécifions les différentes variables étudiées et la modélisation des activités de conception observées.

8.2.1.1 Activité globale de conception

Pour mieux comprendre l'activité de conversation réflexive multi-instrumentée, nous commençons par modéliser de manière globale et sur une ligne du temps le processus de conception observé pour chacun des sujets. Nous mettons tout d'abord en évidence les temps de réception des représentations générées par la machine (figures 77, 78 – « Visuels »), ainsi que les différentes phases successives de ce processus (figures 77, 78 – « Séquences »). Une phase délimite l'ensemble des activités de conception portant de manière continue sur le même élément du projet, comme la répartition des fonctions, l'aménagement du rez-de-chaussée ou encore la composition de la façade avant.

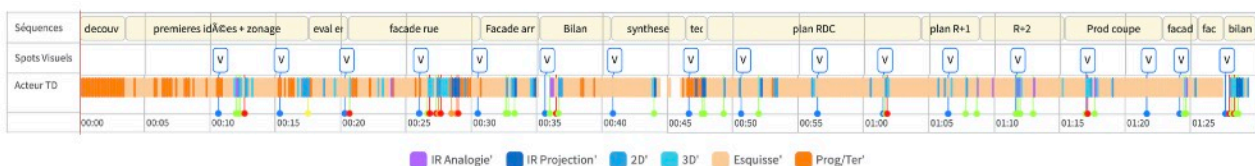










Figure 77. Modélisation globale de l'activité de conception instrumentée en Magicien d'Oz, à titre d'exemple pour le sujet 1.

¹⁹ Par « conversation réflexive », nous désignons les échanges, le dialogue, entre le sujet et le logiciel générant chez le sujet une réflexion sur son activité de conception ou sur l'objet conçu (donc par là réflexive, au sens de Schön).

8.2.1.2 Codage des comportements

Les variables observées dans cette étude sont de plusieurs types. Nous les synthétisons dans le tableau ci-après.

Table 8. Codage des variables étudiées.

Variable étudiée	Modalité	Code	Exemple
Objet d'attention	Documents de travail	 	<i>Regarde l'esquisse, le programme architectural ou les photos du terrain.</i>
	Modélisation numérique	  	<i>Regarde les retours d'images de DAO 2D, du modèle 3D ou de projection du projet conçu.</i>
	Images d'analogie Consultation des visuels	 X	<i>Regarde les images d'analogie renvoyées Regarde l'un des trois écrans de retour du logiciel</i>
Interaction avec le logiciel	Commandes	C	<i>Demande une vue particulière du modèle ou des images d'analogie sur certains mots-clefs</i>
	Incompréhension	?	<i>Dessine un élément incompréhensible du logiciel.</i>
	Erreur	E	<i>Constata que le logiciel a commis une erreur dans son interprétation</i>
	Commentaire positif sur le logiciel	L ⁺	<i>Marque son contentement d'avoir été compris ou la pertinence des images d'analogie proposées</i>
	Commentaire négatif sur le logiciel	L ⁻	<i>Regrette le délais de retour ou l'inadéquation des images d'analogie proposées avec ses idées</i>
Comportements de conception	Évaluation positive du projet	P ⁺	<i>Valide l'aménagement proposé</i>
	Évaluation négative du projet	P ⁻	<i>Invalide le choix du matériaux de façade</i>
	Changement de phase	/	<i>Clôture l'aménagement du 1^{er} étage pour passer à la composition de façades</i>
	Influence directe entre visuel et changement de phase		<i>Consulte les visuels parce qu'il/elle commence une nouvelle phase ou change de phase en réponse aux visuels</i>
	Transformation du projet		<i>Modifie l'aménagement du séjour après s'être rendu compte dans le plan mis au net à l'échelle que l'espace était plus grand qu'il ne le pensait.</i>

Tout d'abord, nous caractérisons l'**objet d'attention** en fonction du regard porté. Il peut être (i) les *documents de travail*, via l'esquisse, le programme ou les photos du site (figure 78 – « Objet projet »), (ii) la *modélisation numérique* du projet faite par la machine, via les images de projection, les plans 2D ou le modèle 3D (figure 78 – « Objet modélisation »), ou (iii) des *images d'analogie*, également générées par la machine (figure 78 – « Objet analogie »). Cette variable traduisant l'objet d'attention est codée, tout au long du processus, en fonction de la direction du regard du sujet.

Plusieurs autres variables portent sur l'**interaction avec le logiciel**. Sur base des verbatims recueillis, nous relevons, tout au long du processus, les *commandes* faites au logiciel (nommées « C »), les *incompréhensions* de celui-ci (symbolisées « ? »), et les *erreurs* de modélisation remarquées par le sujet (identifiées « E »)(modélisées à la figure 78 – « Spots logiciel »). Nous relevons également dans tout le processus les *commentaires*, positifs ou négatifs, à propos des *représentations* reçues (figure 78 – « Validation logiciel » et « Invalidation logiciel »).

Finalement, plusieurs variables décrivent l'**activité de conception**. Nous relevons sur base des verbatims, tout au long du processus, les *évaluations*, positives ou négatives, explicites du projet (figure 78 – « Validation projet » et « Invalidation projet »). Nous identifions finalement, sur base du comportement du sujet, caractérisé son focus de conception ainsi que son regard, les *changements de phase* du processus, i.e. lorsque le sujet change de partie du projet et les *transformations latérales ou verticales*, i.e. les modifications du projet au sens de Goel (1995), qui découlent directement de la consultation d'une représentation, c'est-à-dire les changements d'idées ou les précisions apportées au projet en conséquence de l'échange avec la machine.

En reprenant l'exemple de l'activité de conception modélisée de manière globale et en codant ces différentes variables, nous pouvons reconstituer dans le détail la session de conception comme illustrée ci-après.

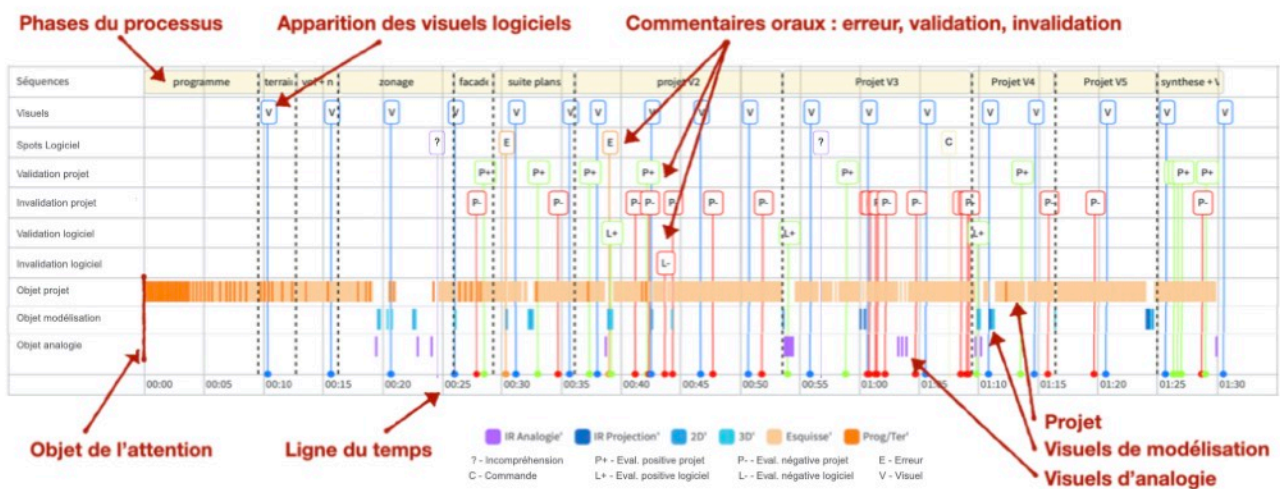


Figure 78. Modélisation détaillée de l'activité de conception instrumentée en Magicien d'Oz, à titre d'exemple pour le sujet 7.

8.2.1.3 Patterns de réception des images

Notre analyse visant à étudier les patterns qui apparaissent dans les activités de conception suite à la consultation des visuels fournis et leur impact sur la conception en cours, nous formalisons donc, au moyen des codes précités, la réaction du sujet dans les 3 minutes suivant l'arrivée d'un visuel, temps maximum identifié pour que la représentation soit mobilisée. Nous caractérisons ainsi la suite d'opérations cognitives menées par le sujet, d'après ses actions et verbatims pour construire un schéma de son comportement. Voici ci-après un exemple illustratif d'un tel schéma de comportement pour le sujet 6 à la minute 10'40 de l'expérience.

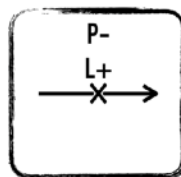
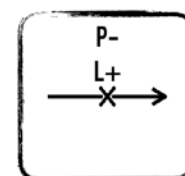


Figure 79. Exemple d'un schéma de comportement à la réception des visuels, plus tard appelé pattern, pour le sujet 6 à la minute 10'40.

Ce schéma traduit ainsi une activité de conception marquée par la consultation du visuel affiché, accompagnée d'un commentaire positif du travail de l'Interpréteur et d'une invalidation du projet, et se soldant par une reprise de la tâche en cours sans changement de phase ni modification du projet. Le tableau ci-après détaille chaque action successive et sa traduction en codage.

Table 9. Illustration de l'identification d'un comportement caractéristique sur base du codage de l'activité du sujet 6 en minute 10'40

Opérations cognitives et actions	Codage en comportement
1 Le sujet 6 est en train de faire un schéma du zonage fonctionnel et il consulte en parallèle le document de programme. Il revient sur son schéma pour marquer les zones communes lumineuses dans son zonage.	L'activité de conception est symbolisée par une flèche « → ».
2 Il relève ensuite les yeux de son esquisse et voit que des nouveaux visuels sont apparus.	Une croix « X » marque la consultation des visuels.
3 Entre temps, il déclare « Ah oui je n'avais pas vu que j'avais tout ça qui était déjà apparu ! ». Il regarde brièvement, de sa droite à sa gauche, le modèle 3D sommaire, le(s) plan(s) au net et les images d'inspiration. Il commente « Ah ça c'est intéressant oui ».	Codé comme une évaluation positive du logiciel « L ⁺ ».
4 Puis il s'attarde sur les images d'inspiration, en exprimant « Donc là dans les images ce que je vois aussi c'est que je vais peut-être devoir établir un recule aussi ».	Codé comme une évaluation négative du projet dans son état actuel « P ⁻ ».
5 Mais ce choix n'est pas arrêté puisque le sujet 6 déclare « je ne sais pas où tout ça va me mener mais bon on verra bien... » et ne dessine rien.	Il n'y a donc pas de transformation du projet « ↯ ».
6 Le sujet 6 regarde à nouveau le plan d'implantation au net et le déclare « chouette » et ça lui permet de « vérifier le tout ».	Suite de l'évaluation positive du logiciel « L ⁺ ».
7 Il s'attarde ensuite sur la 3D. Le modèle 3D, montrant le rapport avec les voisins, l'amène à se questionner : « Là je me rends compte quand même de quelque chose : c'est que... Est-ce que je peux aller chercher ce 2e étage ou pas ? Parce que le code généralement je le jette à la poubelle avec les urbanistes... ». Puis il regarde sur la 3D et le plan net en se demandant « Ok... Est-ce que je ne peux pas générer un décrochement... ? ».	De nouveau une évaluation négative du projet sans transformation à sa suite « P ⁻ ».
8 Finalement, il déclare « Je crois que je vais continuer à persévérer encore un petit peu dans le gros dispatching de tous les espaces et pas m'inquiéter encore trop de tout ce qui est trop détaillé... » en revenant sur l'esquisse.	Le pattern prend fin lors du retour à l'activité initiale. Elle se fait sans changement de phase « / ».



Nous procédons à ce codage de comportement pour l'ensemble des unités analysées, soit pour chacune des séquences de 3 minutes suivant l'arrivée d'un visuel chez chacun des sujets. Nous obtenons ainsi un corpus de 135 comportements codés.

8.2.2 Analyse de l'activité de conversation

Notre analyse vise à comprendre l'impact des représentations externes auto-générées sur l'activité de conception et de qualifier la conversation réflexive prenant place avec ces représentations auto-générées. Nous examinons ainsi les aspects suivants :

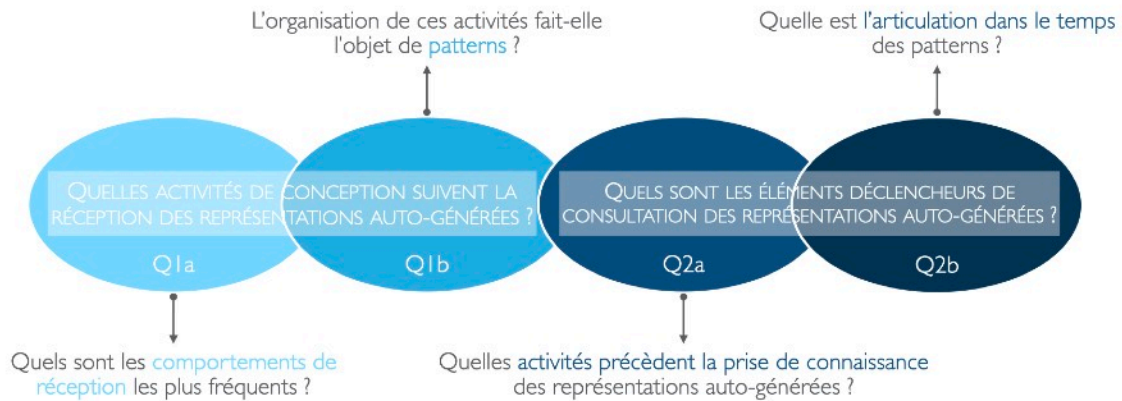


Figure 80. Questions de recherche sous-tendant l'analyse des activités de conception instrumentées en Magicien d'Oz.

8.2.2.1 Comportements de réception des visuels

En réponse au premier volet de cette question de recherche visant à savoir quelles sont les activités faisant suite aux visuels reçus de la machine, nous synthétisons l'ensemble des opérations cognitives caractérisées lors de notre analyse en un arbre d'actions successives illustré à la figure suivante et quantifions leur occurrence.

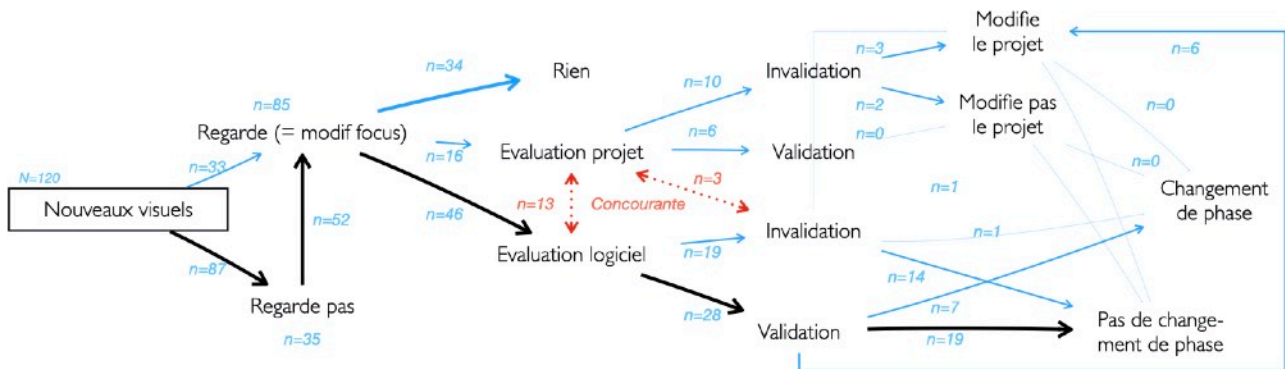


Figure 81. Arbre de mobilisation des représentations générées par l'Interpréteur.

Cette schématisation nous permet d'identifier les différents cheminements d'action et de les quantifier.

Ainsi, dans le parcours le plus emprunté (en gras et noir dans la figure 81), le sujet ne regarde pas les visuels de suite mais au bout d'un délais de plusieurs secondes à quelques minutes. Il évalue ensuite positivement l'Interpréteur et reprend son activité là où elle en était. Nous ne pouvons dire avec certitude qu'il n'y a pas d'évaluation du projet. S'il y en a, elle est par contre très rapide et non exprimée. Ce chemin le plus emprunté semble être un effet de curiosité et résulte aussi du protocole de l'expérience puisque la machine y occupe une position centrale. Pour illustrer ce chemin,

prenons le sujet 6 à la minute 42'30. Il est en phase de synthèse et de mise au net des différentes représentations de son projet lorsqu'en relevant la tête entre le dessin d'une coupe et celui d'un plan il voit que de nouveaux visuels sont arrivés. Il qualifie les images d'inspiration reçues de « chouette » et valide les suggestions de l'Interpréteur. Il retourne ensuite à son activité de mise au net, sans changement de phase.

Très souvent également, après avoir regardé les visuels, le sujet reprend directement son activité de conception là où elle en était.

Finalement, une fois sur 8 (soit 13% des cas), après avoir regardé les visuels, le sujet évalue son projet. Et, dans le cas d'une invalidation, cela peut mener à une modification du projet en cours.

8.2.2.2 Patterns de conversation

Nous considérons ces cheminements récurrents d'action comme des patterns d'activité. Pour plus de lisibilité, nous transformons les différentes variantes de cheminement cognitif de ce schéma (figure 81) en patterns symboliques comme à la figure 79.

Pour illustrer ces cheminements devenus patterns, prenons plusieurs exemples d'enchaînements d'activités cognitives faisant suite à la réception des visuels auto-générés.

Le sujet 7, lors de l'envoi du troisième set de représentations externes auto-générées, présente un des cheminement et pattern le plus simple (figure 82) : lorsqu'il voit apparaître son projet modélisé par l'Interpréteur et accompagné d'images d'analogie, regarde brièvement les images sans les commenter puis reprend le fil de sa conception. Ce pattern est un pattern de non-usage.

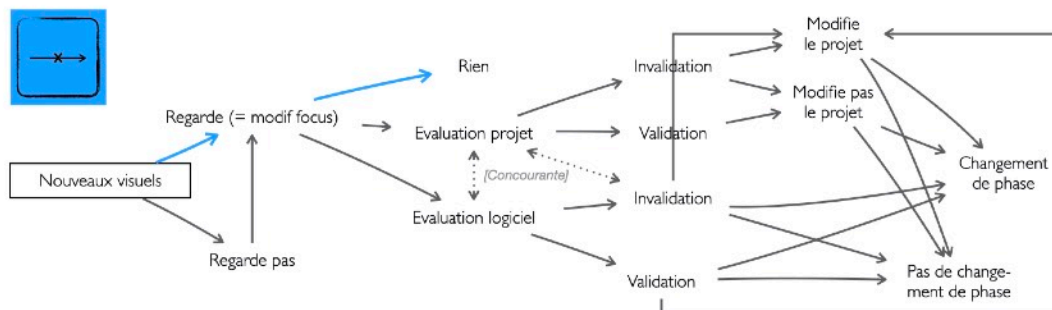


Figure 82. Passage de la représentation de l'arbre décisionnel aux schémas de patterns - exemple de non-usage chez le sujet 7.

Le sujet 9, après 75 minutes de conception, présente un comportement, un peu plus intéressant (figure 83) : en train d'esquisser une perspective de la façade arrière, il relève la tête et voit la mise à jour du modèle 3D qui a suivi son travail. Il salue cette mise à jour du modèle puis s'attarde sur les images d'analogie qu'il commente successivement. Une de ces images retient son attention et il déclare alors qu'en s'inspirant de cette image d'analogie, il créera plutôt une grande baie vitrée sur tout la largeur de la façade, éclairant généreusement les pièces de vie en double hauteur, ce qu'il dessine dans la foulée. Ce pattern est un dialogue avec la machine, pas précisément, d'évaluation de l'Interpréteur.

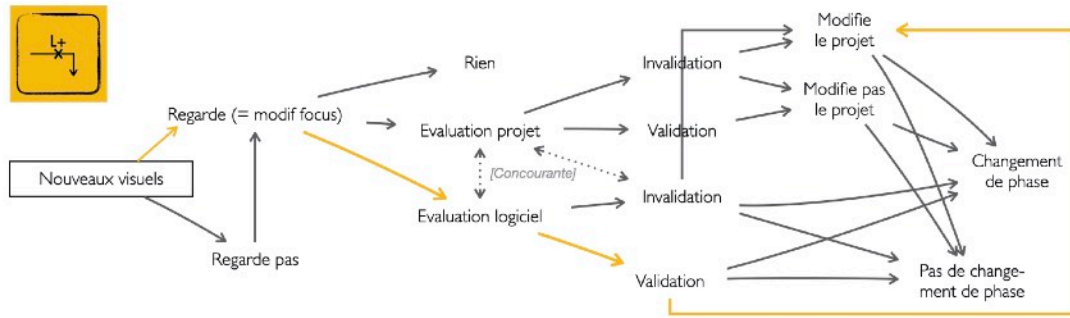


Figure 83. Passage de la représentation de l'arbre décisionnel aux schémas de patterns - exemple de dialogue homme-machine chez le sujet 9.

En dernier exemple, le sujet 6 présente un comportement très complet d'usage des représentations proposées après 65 minute de conceptions (figure 84). Le sujet est en train de dessiner l'aménagement du salon lorsque les visuels apparaissent à l'écran. Il les consulte et, sur base de la représentation de DAO 2D de mise au net de son plan, déclare qu'il y aura bien assez de place pour la chambre d'amis, validant ainsi son placement dans le plan. Il consulte ensuite les images de projection de rendu du projet et valide à nouveau sa conception car les images traduisent un séjour qui sera ample et facilement aménageable par le client de par sa taille adaptée. Il se rend alors compte qu'il a, par contre, perdu de vue l'aspect structurel du bâtiment, ce qui déclenche le passage à une nouvelle phase de conception. Cet enchaînement d'activités est un pattern d'impact sur la conception, plus spécifiquement, d'évaluation du projet.

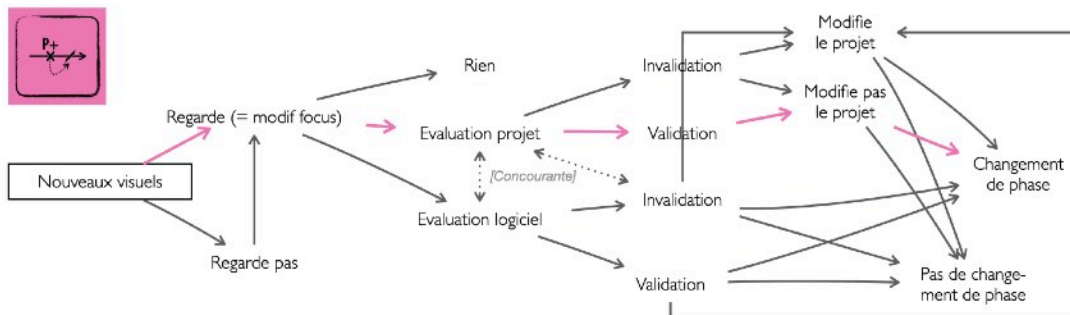


Figure 84. Passage de la représentation de l'arbre décisionnel aux schémas de patterns - exemple d'usage du visuel chez le sujet 6.

Nous identifions ainsi 22 patterns différents que nous répartissons en 6 classes selon une approche *bottom-up* (figure 85). Nous quantifions également le nombre d'occurrence de chacun de ces patterns.

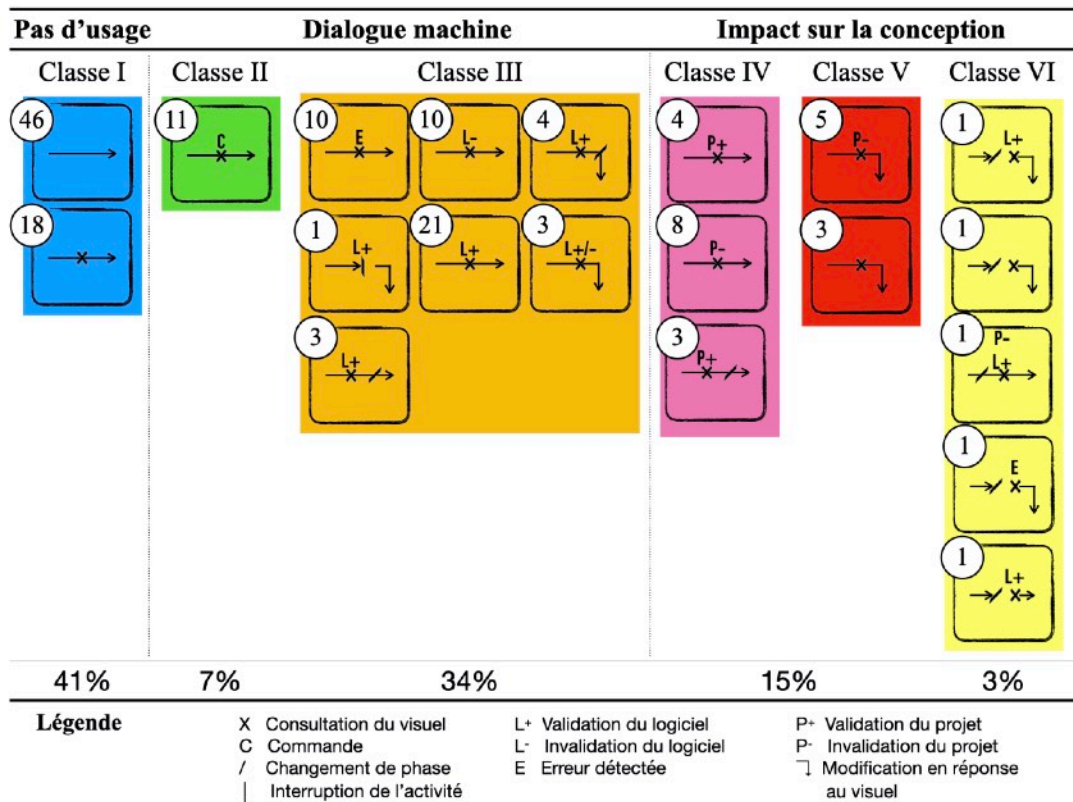


Figure 85. Classes et occurrences de patterns (l'occurrence est indiquée dans la pastille).

La première classe, en bleu, regroupe deux comportements avec une absence d'usage du visuel. Il est soit non regardé, soit regardé mais sans réaction.

Les deux classes suivantes regroupent des comportements orientés vers la machine. Le sujet peut effectuer une commande spécifique à l'Interpréteur (en vert), suite à un besoin ou à la consultation d'un visuel proposé antérieurement. Ou il peut évaluer, positivement ou négativement, l'Interpréteur (en orange).

Les 4^{ème}, 5^{ème} et 6^{ème} classes portent quant à elles sur l'impact du visuel sur le processus ou le projet. Ces impacts peuvent être respectivement une évaluation du projet (en rose), une modification du projet (en rouge), ou une modification de l'activité de conception (en jaune).

A titre d'exemple, un pattern relatif au dialogue homme-machine est le comportement du sujet 9 après le visuel reçu à minute 41 (figure 86 - à gauche) : il regarde ces visuels et félicite l'Interpréteur d'avoir bien compris ce qu'il dessinait jusque-là (« c'est bien, il comprend »), puis remarque tout de même une erreur de proportion dans le dessin CAD de l'aménagement (« Enfin... il a un peu abusé sur les proportions »). Un exemple de pattern avec un impact du visuel proposé sur le contenu du projet apparaît à la minute 51'40 chez le sujet 6 (figure 86 - à droite) : après réception des visuels, il les consulte et commente positivement le modèle 3D reçu et son adéquation avec l'esquisse du projet en cours. Il déclare ensuite « je vois ce qui ne marche pas et que je dois changer » et revient à son esquisse pour implémenter des changements sur les points critiques.

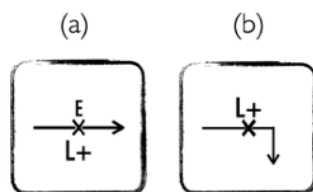


Figure 86. Exemple de pattern relatif au dialogue homme-machine, pour le sujet 9 à la minute 41 (à gauche) et avec impact sur le projet conçu, pour le sujet 6 à la minute 51'40 (à droite).

En quantifiant le nombre d'occurrence de chaque pattern, nous observons la répartition suivante. Dans 41% des cas, il n'y a pas d'usage du visuel reçu. Pour 34% des visuels reçus, l'usage qui en est fait est une évaluation de l'Interpréteur. Dans 15% des cas, c'est plutôt une évaluation du projet qui a lieu et qui mène, pour moitié, à une modification directe du projet. Seulement 3% des visuels modifient par contre l'activité même de conception. Finalement, 7% des visuels sont suivis d'une demande de représentation supplémentaire via une commande à l'Interpréteur.

Regardons alors plus précisément les classes de patterns impactant la conception. De manière générale, nous avons vu que ces impacts peuvent être respectivement une évaluation du projet (en rose), une modification du projet (en rouge), ou une modification de l'activité de conception (en jaune).

Concrètement, dans les patterns roses d'évaluation, nous observons que les sujets se servent souvent des documents affichés comme d'une synthèse caractérisant leur projet. Ils y analysent alors les caractéristiques de leur projet en regard de la demande : « ok, donc les voisins je ne m'en tracasse pas », « non, c'est quand même haut, il y a un étage de trop ». Certains sujets évaluent leur projet en regard de ces représentations externes auto-générées uniquement, ils valident le rendu généré par l'Interpréteur sur base de leur plan, ce qui fait validation de l'idée et ils passent à la phase suivante : « ce genre d'image c'est typiquement ça, donc je peux me remettre dans du détail ». Dans la même dynamique d'exploitation, les visuels sont supports de bilans visant à cerner ce qui est validable, et donc qui devient validé, de ce qu'il faut encore retravailler : « ah, la 3D c'est top (...) je vois ce qui ne marche pas et que je dois retravailler ; allez je vais changer dans le salon... ».

Les patterns rouges de modification du projet mettent en lumière plusieurs rôles des visuels. Certaines fois, ils permettent de constater une erreur, comme dans le cas du sujet 9 qui s'est rendu compte qu'il avait mal coté son plan et qu'il n'utilisait qu'une partie de la largeur de façade à rue du terrain en mitoyens. D'autres fois, les images d'analogie affichées sont mobilisées par le sujet pour s'inspirer : soit parce qu'il était à court d'idée soit parce que l'image envoyée correspondait justement à ce vers quoi il se dirigeait et lui fournit ainsi une solution plus rapide, précise et concrète, correspondant à ce qu'il était en voie de générer. Le sujet 9, dans sa conception de façade, travaille une proposition de bardage ajouré puis dit, en regardant successivement les images d'analogie proposant diverses façades en bardage bois, « oui, ça c'est pas mal... on se rapproche... voilà, il a capté ; donc là ce sera ça ».

Finalement, les visuels reçus modifient parfois le cours de l'activité de conception (classe jaune). A titre illustratif de ce type d'impact, prenons le sujet 7 après 25, puis 50, minutes de conception. A la fin de la répartition des différents locaux dans un zonage, le sujet consulte les visuels reçus. Il passe alors sur un tout autre pan de la conception en s'attaquant à la composition de façade. Plus loin dans la conception, c'est une fois plus ou moins satisfait de sa deuxième

proposition de projet (« je distribue ici... l'espace bureau là... ok, c'est bon. ») qu'il consulte les visuels, disponibles depuis quelques secondes déjà et montrant des images d'analogie d'espaces en mezzanine, pour voir ce que l'Interpréteur lui propose comme idée. C'est sur base de ces images d'analogie qu'il évalue, non pas une proposition donnée, mais la pertinence même de la demande du client d'avoir un espace en mezzanine. Initialement sceptique en raison des nuisances sonores, il trouve les images d'analogie « sympa » et conclut que « en même temps, tu n'as jamais tout le monde en même temps en journée, ça peut fonctionner ». Il se met alors à dessiner une proposition d'espace de bureau en mezzanine sur la double hauteurs des pièces de vie.

8.2.2.3 Activités déclenchantes

Afin de comprendre les déterminants de l'occurrence de tel ou tel pattern, nous répertorions les activités précédant la consultation des visuels, et par là, l'apparition des patterns étudiés. Il s'agit d'éléments déclencheurs, décrits et synthétisés dans le tableau suivant :

Table 10. Répartition des 109 activités déclenchant la consultation des représentations générées.

Type d'activité	Pourcentage d'occurrence (N=109)
Attention attirée par le changement d'image / Relève la tête pour réfléchir et voit les nouvelles représentations	28%
Recherche d'information complémentaire	23%
Bilan avant de passer à la phase suivante ou au début de celle-ci	12%
Consultation à la fin d'une action	10%
Réflexion sur un point du projet qui appelle à rechercher l'inspiration	9%
Vérification d'être bien compris par le logiciel	7%
Attention attirée volontairement (pour corriger une erreur ou signaler l'arrivée des représentations demandées) ou non par le chercheur (par sa posture)	4%
Évaluation du projet au moyen des représentations logicielles	2%
Consultation des visuels commandés	2%
Vérification de la mise à jour des visuels	2%
Moment de pause dans la conception	1%

Ainsi, bien souvent (28%), soit l'attention du concepteur est attirée par un changement de visuel à l'écran, soit son regard s'est porté de manière opportune sur l'écran pendant qu'il était en pleine réflexion, le regard levé. C'est donc sans intention particulière, ni à la suite d'une activité spécifique, qu'il consulte les représentations fournies.

Mais nous constatons que tout de même près d'une fois sur quatre (23%), le concepteur utilise les représentations fournies pour rechercher une information. Cela confirme que les concepteurs peuvent utiliser le logiciel proposé en tant qu'aide à la conception et que leur donner accès à des représentations de ces natures-là constitue une plus-value dans leur activité.

Finalement, apparaissent d'autres activités déclenchantes significatives bien que moins courantes. Le concepteur consulte les visuels pour chercher de l'inspiration (9%), pour faire un bilan de son projet en début ou fin de phase (12%), car il se tracasse d'être compris de la machine (7%) ou simplement parce qu'il est à la fin d'une action (10%).

Notons que c'est seulement 2% des fois un besoin explicite d'évaluation du projet qui amène le sujet à regarder les représentations fournies. Souvenons-nous, dans les patterns de réception des visuels (figure 85), que pourtant 15% des actions suivant cette consultation sont des activités

d'évaluation. C'est un aspect positif de cette proposition d'instrumentation qui propose et favorise donc les activités d'évaluation.

8.2.2.4 Temporalité de mobilisation des patterns

Dans cette section, nous étudions la temporalité de mobilisation des patterns en réponse au dernier volet de notre question de recherche. Nous mettons en évidence, tout au long du processus des différents sujets concepteurs les patterns mobilisés à la suite de chaque réception de représentations générées (figure 87).



Figure 87. Succession chronologique des patterns apparaissant tout au long des processus de l'ensemble des sujets.

Notons que certaines réactions aux visuels reçus appartiennent à deux classes de patterns, et portent donc leurs deux couleurs. En effet, les classes de patterns associées aux couleurs sont construites de manière à représenter un comportement de réaction. Mais dans certains cas, le sujet présente deux patterns de réaction consécutifs mais distincts face à la réception d'une série de visuels. Les stickers de patterns seront tantôt schématisés l'un au dessus de l'autre pour traduire deux actions différentes de réaction et tantôt bicolore si c'est une seule action mais qu'elle appartient à deux classes.

Pour notre analyse, nous écartons les patterns de non usage (en bleu) et de dialogue avec la machine (en orange). En effet, les premiers ne constituent pas des activités et les seconds sont favorisés par le protocole de l'expérience et tendront à disparaître avec l'usage répété dans les pratiques (Defays *et al.*, 2012). Nous focalisons donc notre analyse sur les moments de réception de visuels ayant menés à des patterns avec impact ou à des commandes de représentations supplémentaires (figure 88).

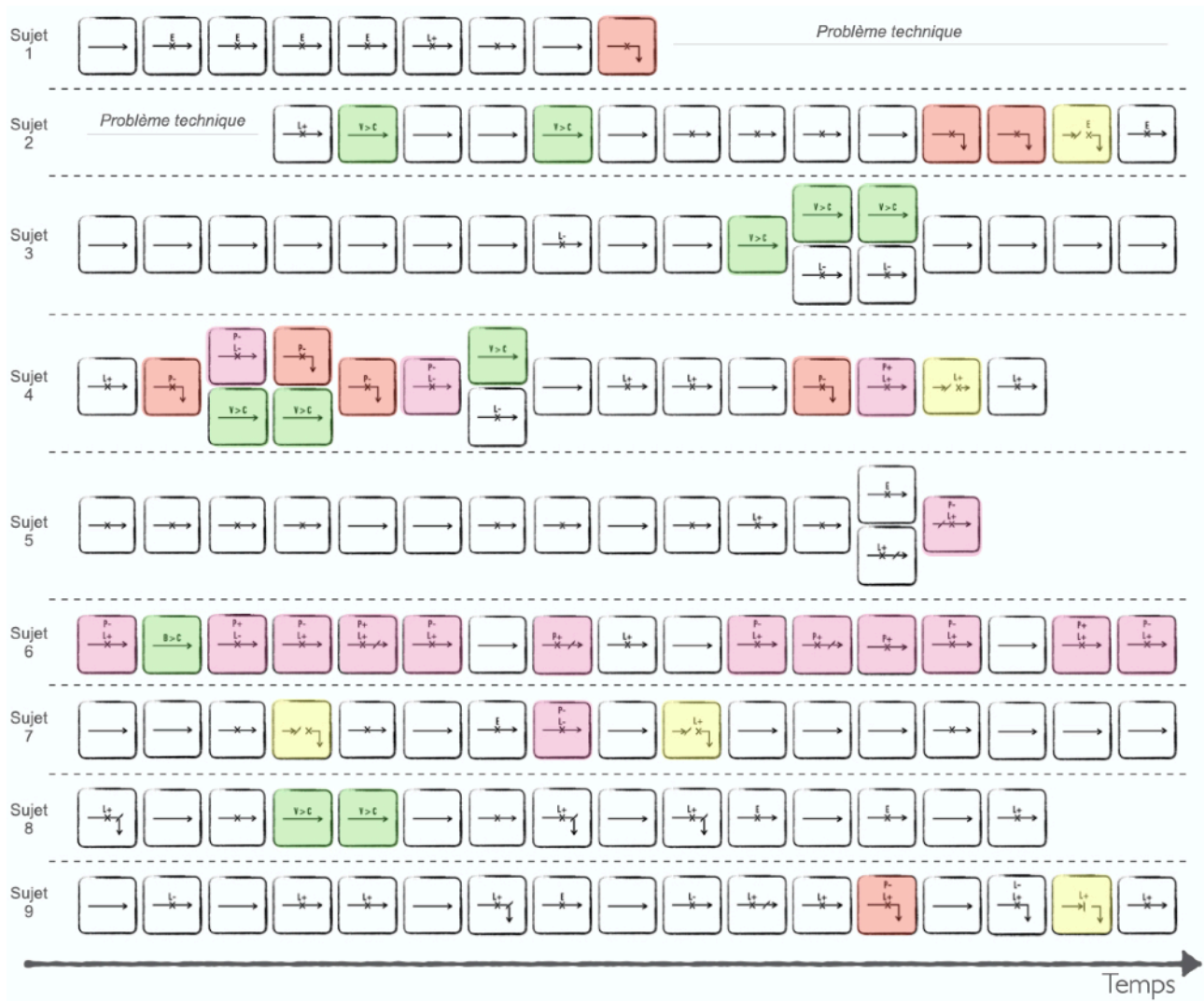


Figure 88. Répartition temporelle des patterns analysés .

Cette mise en évidence montre qu'il ne se dégage pas de moment particulier dans le processus, favorable à l'apparition de patterns impactant la conception. Ils semblent donc mobilisables à tout moment, en fonction des besoins du concepteur. Ils semblent également jugés utiles et/ou pertinents par les acteurs puisqu'ils ne sont pas abandonnés en cours de processus.

Ce schéma fait par contre ressortir des profils de sujets.

8.2.2.5 Profils des sujets

Tout au long de nos analyses, nous avons pu observer des comportements et des usages des représentations fournies variant entre les sujets. Particulièrement visible à la figure ci-dessus, cette variation de profil réside dans la nature et la répartition temporelle des patterns employés.

Pour donner au lecteur un exemple de ces variations perçues dans les activités inter-sujets, comparons les sujets 6 et 9 (figure 89). Le sujet 9 évalue presque exclusivement l'Interpréteur, et à 83% positivement, ce qui le mène une fois sur trois à modifier son projet. Le sujet 6, quant à lui, évalue autant l'Interpréteur que son projet mais il ne modifie jamais concrètement ses esquisses, qui sont pourtant évaluées négativement une fois sur deux.

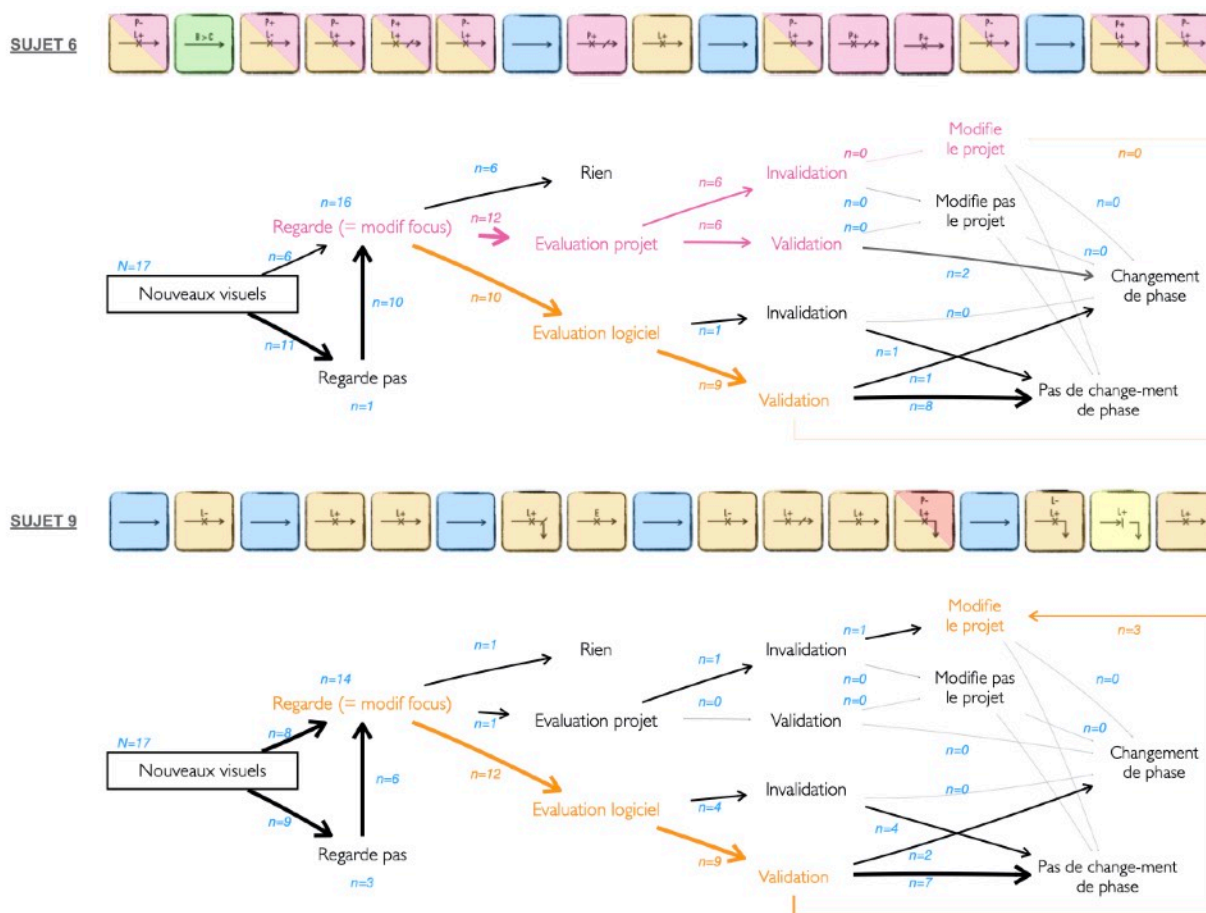


Figure 89. Comparaison des comportements des sujets 6 et 9.

Au-delà d'une différence interpersonnelle triviale, nous pouvons identifier 3 profils parmi les sujets de cette expérience.

Le premier profil utilise les représentations fournies comme un outil intégré de conception. Ces concepteurs intègrent les visuels proposés comme un nouvel outil de conception au même titre que tous les autres existants. Les visuels sont utilisés régulièrement tout au long du processus et en lien direct avec les activités, comme ressource.

Le second profil utilise les représentations fournies comme des ressources clefs. Ces concepteurs mobilisent les visuels proposés à des moments clefs, charnières, de leur processus pour évaluer leur projet ou avant de passer sur un autre aspect du projet.

Le troisième profil utilise de manière anecdotique les représentations fournies.

8.2.3 Discussion des interactions de conception avec l'Interpréteur

8.2.3.1 Notes sur l'expérience

Notons que lors de la modélisation des processus de conception, quel que soit le profil d'architecte, nous retrouvons un fil de conception classique, similaire à ceux régulièrement observés dans les pratiques ou décrit dans la littérature, commençant par une phase de découverte du terrain et de la demande, suivie d'un schéma fonctionnel de répartition des locaux et/ou d'un schéma d'intentions générales avant de dessiner plus en détail les plans et façades. Des moments de synthèse ponctuent ce processus. Cette similarité entre les processus observés dans notre expérience et ceux décrits par ailleurs rassure sur l'absence de biais majeur du protocole influençant les méthodes de conception habituelles des sujets au point de les modifier complètement. Les chiffres d'usage des différents patterns sont favorables à la mise en place d'une telle aide à la conception car ces visuels imprègnent positivement le processus mais ne le déterminent pas. En effet, avec 15% d'impact, ces représentations constituent une plus-value potentielle pour la conception. Ce sont des ressources, mobilisables ou non, et non mobilisées 41% des fois, mais pas des éléments structuraux du processus, puisque seulement 3% ont modifié l'activité de conception. Notons que les 34% de dialogue avec la machine tendront à s'estomper avec l'usage. Defays (*et al.*, 2012) montrait en effet dans ses observations que le dialogue homme-machine s'estompe avec l'accoutumance à l'outil.

Il est également important de préciser que nous avons traité nos données en distinguant les représentations générées de type analogie (images d'analogie) et celles de type modélisation (image de projection, plan 2D et modèle 3D), comme visible sur les analyses graphiques ci-après. Après analyse, cette différence de nature n'impacte pas significativement les résultats et les comportements des sujets concepteurs. En effet, la nature d'image ne semble pas liée à des comportements différents de réaction. Pour éviter un dédoublement de l'ensemble des analyses, nous avons donc ici présenté nos résultats sans faire cette distinction.

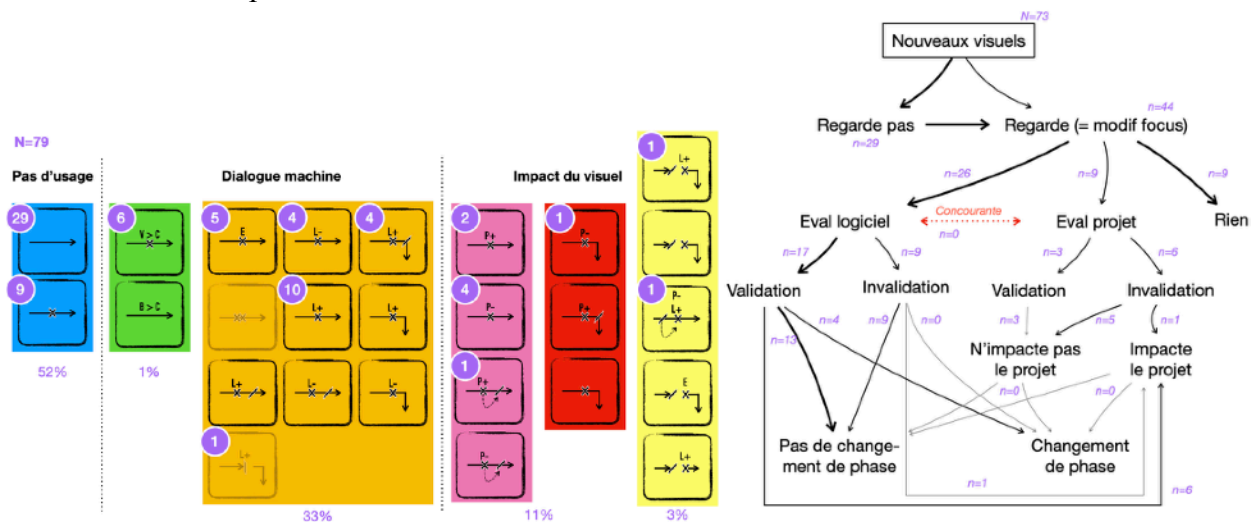


Figure 90. Analyses graphiques et quantitatives réalisées ici individuellement pour les images d'inspiration (en violet).

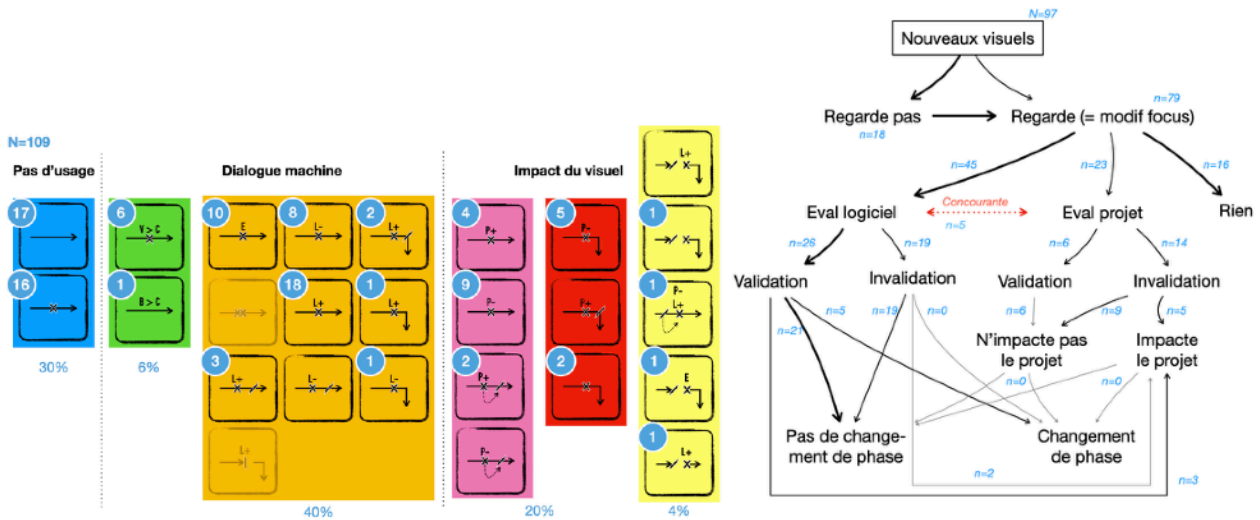


Figure 91. Analyses graphiques et quantitatives réalisées ici individuellement pour les images de projection de rendu (en bleu).

8.2.3.2 Modes d'interaction

Les usages de l'Interpréteur ont parfois été combinés : le sujet concepteur a évalué conjointement l'Interpréteur et son projet. Cela peut être dû à la concurrence de deux activités différentes ou bien ces deux activités peuvent être liées. Il est également intéressant de constater que l'activité d'évaluation de l'Interpréteur pouvait être suivie d'une modification du projet. Dans ce cas, l'évaluation de l'Interpréteur, c'est-à-dire la validation ou l'invalidation de l'exactitude ou de la pertinence des visuels proposés peut (1) directement mener à la modification du projet et donc des caractéristiques du bâtiment ou bien (2) elle peut mener à une évaluation négative du projet, non explicitée oralement par le *think aloud*, par comparaison entre l'esquisse du concepteur et les images de référence proposées par l'Interpréteur, débouchant sur une modification du projet.

Nous avons par ailleurs mis en évidence des activités particulières d'interaction avec l'Interpréteur ainsi que l'existence de profils d'usages. Ainsi, il existe des modes différents d'interaction avec l'Interpréteur : s'en servir comme un outil intégré de conception tout au long du processus, s'en servir pour ses fonctions spécifiques à certains moments clefs du processus, ou s'en servir ponctuellement simplement comme une représentation externe supplémentaire. Nous pourrions donc concevoir plusieurs interfaces différentes également : proposer des représentations de manière régulière, plutôt sur demande ou encore sur demande sauf aux moments charnières où elles seraient proposées automatiquement.

8.2.3.3 Pertinence pour la conception

En conclusion, face à notre questionnaire sur l'intérêt potentiel, en termes d'analogie et de redécouvertes, du partage avec le concepteur de ces représentations automatiquement générées, et en regard de l'étude de l'impact de cette technologie sur les activités des concepteurs, nous pouvons conclure que les conversations réflexives de ces concepteurs sont enrichies par le rôle actant de l'instrument proposé. Les représentations renvoyées constituent des ressources d'information, d'évaluation du projet et des tremplins pour la génération de solutions par analogie. Elles

permettent également de redécouvrir son propre projet, favorisant la détection d'erreurs, ouvrant à des modifications du projet, ou outillant les moments de bilan, soutenant la prise de recul.

En termes d'impact potentiel négatif sur le déroulement des activités de conception, les représentations générées sont des ressources mobilisées ou non au choix du concepteur, mais ne sont pas des éléments structuraux du processus. Ces représentations imprègnent la conception mais ne la déterminent pas.

Suite aux 9 capsules de conception instrumentée au moyen du Magicien d'Oz, nous caractérisons les différents processus en **codant** :

- les différentes phases de la conception ;
- l'objet d'attention du sujet : documents de travail, représentations de modélisation ou images d'analogie ;
- les interactions avec la machine : consultation des représentations auto-générées, commandes spécifiques, incompréhensions de la part de l'Interpréteur, erreurs et commentaires sur le travail de l'Interpréteur ;
- les activités de conception : évaluation du projet, changement de focus, modifications du projet, interruption de l'activité.

Une fois les processus qualifiés par ces variables, nous décrivons les **cheminements d'actions** prenant place à la suite de chaque **consultation** des représentations auto-générées. Au sein de ces cheminements, nous mettons en évidence 22 **patterns de réaction**, répartis en trois classes : absence d'usage, dialogue avec la machine, impact sur la conception. Les premiers ne constituent pas une plus-value de l'instrumentation testée mais montrent qu'elle n'est pas conditionnante, les sujets choisissant d'utiliser ou non les ressources offertes. Les seconds sont favorisés par le protocole et tendront à disparaître avec l'usage répété dans les pratiques. Les derniers sont intéressants puisqu'ils montrent que les visuels envoyés sont des ressources menant à :

- Une évaluation du projet : évaluer la réponse aux contraintes, valider les idées proposées, prendre du recul en s'en servant comme information à un bilan de la conception (tant en terme d'avancement que de satisfaction).
- Une modification projet : détecter des erreurs, s'inspirer dans la concrétisation d'une idée ou dans la génération de nouvelles solutions.
- Une modification de la conception : changement de phase, d'intention de conception, de structuration du problème, etc.

Nous caractérisons ensuite les **déclencheur de la consultation** de ces visuels. Il n'y a pas de logique de temporalité d'usage mais plutôt des activités déclenchantes. Consultés 1/3 des fois sans intention particulière, il le sont le reste du temps avec un but de recherche d'information, d'inspiration, de prise de recul ou pour s'assurer d'être bien compris de la machine.

Nous observons finalement trois **modes d'interaction** avec l'Interpréteur : s'en servir comme un outil intégré de conception tout au long du processus et en lien direct avec les activités, s'en servir pour ses fonctions spécifiques aux moments clefs de charnière du processus, ou s'en servir ponctuellement simplement comme une représentation externe supplémentaire.

En conclusion, les représentations renvoyées constituent des ressources d'information, d'évaluation du projet et des tremplins pour la génération de solutions par analogie. Elles permettent également de redécouvrir son propre projet, favorisant la détection d'erreurs, ouvrant à des modifications, ou outillant les moments de bilan, soutenant la prise de recul.

We characterise the 9 different Wizard-of-Oz instrumented design processes by **coding** :

- the different design phases ;
- the focus : working document, modelling representations or analogy images;
- the interactions with the machine: looking at self-generated representations, asking for specific commands, misunderstandings from the "software", errors in modeling and comments on the "software's" work;
- design activities: project evaluation, change of focus, project modifications, interruption of the activity.

Once the processes have been qualified by these variables, we describe the **action paths** that take place following each **examination** of the auto-generated representations. Within these paths, we highlight 22 **reaction patterns**, divided into three classes: absence of use, dialogue with the machine, impact on the design. The first ones do not constitute an added value of the tested instrumentation but show that it is not a determining one, the subjects choosing to use or not the offered resources. The second ones are favoured by the protocol and will tend to disappear with repeated use in practice. The latest show that the visuals sent are resources leading to :

- Project evaluation: evaluating responses to constraints, validating proposed ideas, taking a step back by using them as information for a design assessment (both in terms of progress and satisfaction).
- Project modification: detecting errors, getting inspiration in the realisation of an idea or in the generation of new solutions.
- Design's activity modification: change of phase, of design concept, of problem structuring, etc.

We then characterise the **triggers for looking** at these visuals. There is no logic of temporality of use but rather of triggering activities. Consulted 1/3 of the time without any particular intention, they are consulted the rest of the time in search of information, for inspiration, to take a step back or to ensure that the machine understands them.

Finally, we observe three **modes of interaction** with the software: using it as an integrated design tool throughout the process and in direct link with the activities, using it for its specific functions at key moments of transition in the process, or using it punctually simply as an additional external representation.

In conclusion, the returned representations constitute resources for information, project evaluation and the generation of solutions by analogy. They also allow the rediscovery of the project, facilitating error detection, project modifications, or providing tools for the assessment moments, supporting retrospection.

For more detailed information about this study, a paper in English will be soon published.

8.3 Micro-expérience de stimulation de l'activité de raisonnement analogique

Suite au constat de l'usage important des images d'analogie dans l'expérience en Magicien d'Oz, nous désirons cerner en quoi cette stimulation du raisonnement analogique impacte le processus de conception des architectes.

8.3.1 Méthode d'évaluation de l'impact des stimuli

Pour répondre à ce questionnement, nous réalisons une micro-expérimentation contrôlée sur deux corpus d'activités de conception collaborative. Le premier présente une conception collaborative traditionnelle et sert de groupe contrôle. Le second présente la même tâche de conception collaborative mais est instrumentée par la stimulation d'images d'analogie. Cette micro-expérimentation a fait l'objet d'une publication (Baudoux & Leclercq, 2023b).

8.3.1.1 Cadre expérimental de la comparaison

Le contexte dans lequel prend place notre expérience est celui du séminaire de recherche d'Analyse des Processus de Conception Collaborative (APC) de l'Université de Liège. Ce contexte nous offre l'avantage de pouvoir intégrer l'observation d'une capsule de conception collaborative comprenant les premières phases idéatives et de spécification de l'artefact.

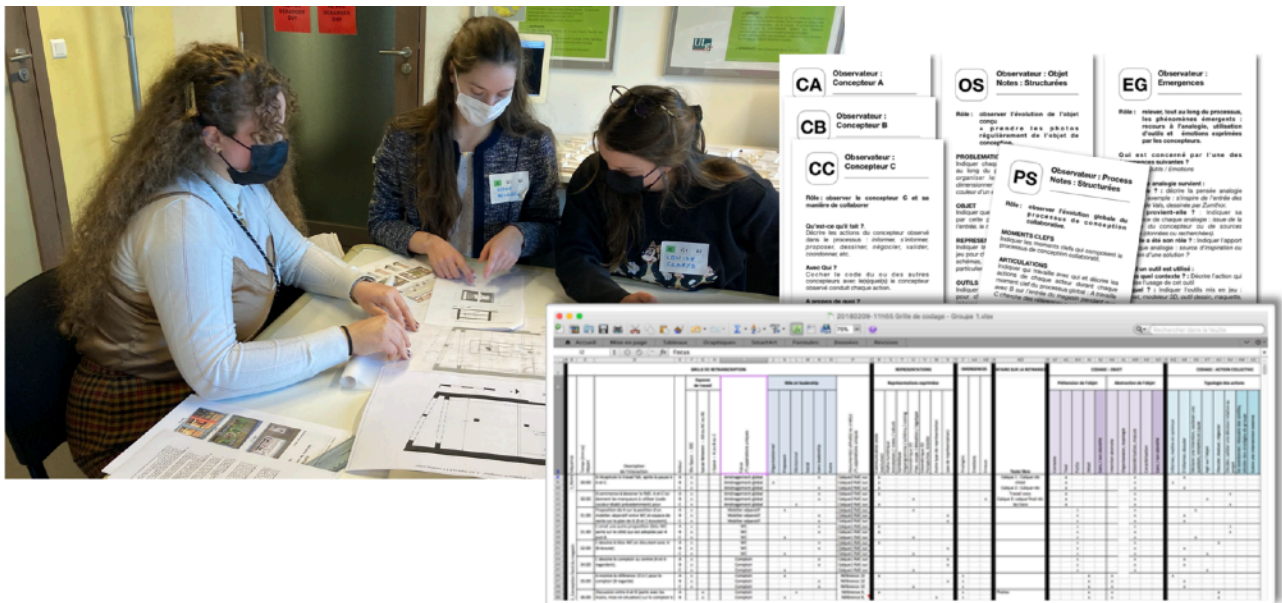


Figure 92. Session de conception et cartes de mission (Cours d'APC 2022).

Le protocole scientifique utilisé dans l'APC a été déjà été mis en place antérieurement et est largement détaillé par ailleurs (Ben Rajeb & Leclercq, 2015a, 2015b, 2016). Ce protocole, employé depuis plusieurs années, propose la mise en place d'une capsule de conception où les concepteurs, au nombre de trois, disposent d'un temps défini, deux heures, et de tous les outils traditionnels pour réaliser un projet architectural de magasin d'optique comprenant un espace vente et un espace

atelier. Des observateurs sont chargés de plusieurs missions pour lesquelles le protocole propose des grilles d'observation adaptées à leur rôle spécifique et des grilles de codage leur permettant d'analyser le processus de conception (notamment au travers de l'abstraction de l'objet architectural, des représentations, des analogies réalisées et des activités collectives).

8.3.1.2 Protocole de stimuli

Pour notre expérience, un premier groupe, servant de groupe contrôle, dispose d'outils traditionnels non numériques (fonds de plan papier, calque, crayon, feutres, ...) et une base de données d'inspiration imprimée (recueil d'images de magasins d'optique). La deuxième équipe dispose des mêmes outils traditionnels non numériques de dessin mais est pourvue d'une technologie de génération d'images numériques d'inspiration. Nous nous sommes basés sur le principe du Magicien d'Oz, selon un protocole similaire à celui décrit en section 8.1.4, pour réaliser cette instrumentation de stimulation par analogie.

La mise en place de notre expérimentation requière trois salles adjacentes : la première salle accueille l'équipe disposant des outils de conception non numériques (outils traditionnels et base d'images imprimée), dans la deuxième prend place l'équipe outillée par le Magicien d'Oz et enfin, la troisième est dédiée au magicien. Une caméra installée, au plafond, dans la deuxième salle et cadrant le bureau de travail de l'équipe de concepteurs permet au magicien de suivre la conception en temps réel et de fournir ainsi des images d'inspiration adaptées à chaque nouveau focus des concepteurs ou à chaque nouvelle idée. Ces images émanent de Google image, Pinterest ou ArchiDaily et sont envoyées aux concepteurs sur leur écran d'ordinateur. Notons que le Magicien d'Oz entend les concepteurs de la salle mais que ceux-ci ne savent pas que les images sont choisies en fonction de leurs discussions.

La figure suivante reprend en exemple quelques images d'inspiration adressées aux concepteurs, à gauche en version papier et à droite proposées par le magicien.



Figure 93. Extraits d'images d'inspiration fournies aux concepteurs (à gauche, inspirations papier fournies uniquement en démarrant l'expérience – à droite, images générées par le Magicien d'Oz et fournies via écran en temps réel pendant l'expérience).

Pour une meilleure compréhension, l'ensemble des éléments du protocole, reprenant la disposition spatiale et les divers outils de conception, est schématisé ci-après.

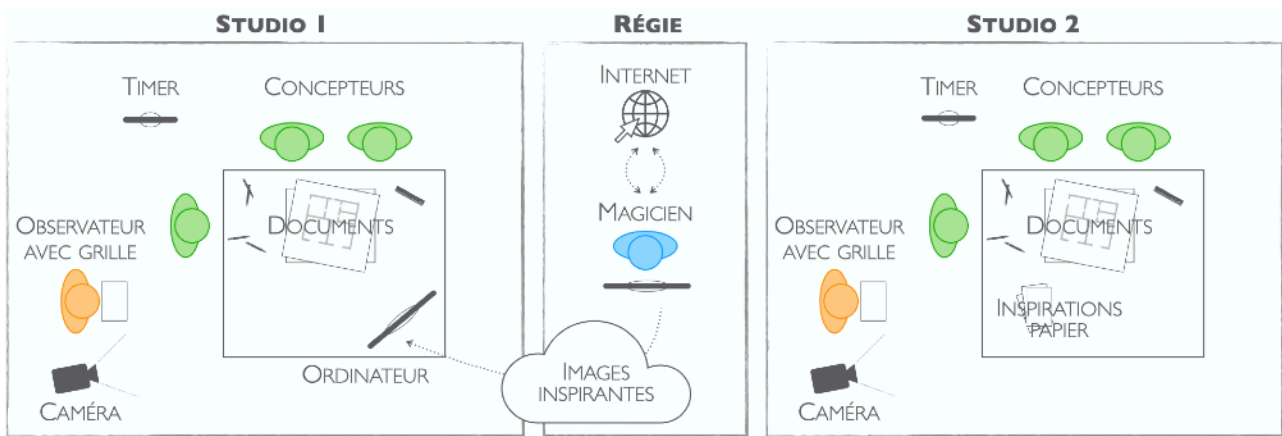


Figure 94. Schéma de l'espace expérimental pour l'étude comparative des stimuli d'analogie.

8.3.1.3 Recueil des données sur l'analogie stimulée

Nous procédons à des observations non-participantes et recueillons nos données à l'aide d'une grille d'observation (figure 95).

DESCRIPTION			ANALOGIES																						
Temps [mm:ss]	Description de l'interaction	Acteur concerné	Appariement			Rôle		Domaine		Type			Mode			Source			Usage			Acteur			Outil
			Objet	Attribut	Relation	Inspiration	Evaluation	Identique	Different	Spontanée	Contrôle	Consciente	Inconsciente	Externe	Interne professionnelle	Interne personnelle	Succès	Echec	Non utilisée	Chaînée	A	B	C		
01:00																									
02:00																									
03:00																									
04:00	A décrit à quoi ressemble une vitrine	A	X			X	X		X		X				X	X					X			/	
05:00																									
06:00	A donne les dimensions d'une toilette PMR (répond à la question de C)	A	X			X	X			X	X			X	X						X			/	
07:00																									
08:00																									
09:00																									
10:00	C regarde les références papier	C		X		X	X		X		X		X		X	X						X		papier	
11:00	A explique ce qu'est un accueil (répond à la question de C)	A	X			X	X			X	X			X	X						X			/	
11:20	B explique ce qu'est un accueil (répond à la question de C)	B	X			X	X			X	X			X	X							X		/	
12:00																									

Figure 95. Grille d'observation des analogies émergeant lors des activités de conception.

Cette grille caractérise chaque analogie réalisée par l'un des concepteurs au moyen de 8 critères (Ben Rajeb & Leclercq, 2016) :

Son *appariement* : si elle constitue un transfert d'objet sans modification, si elle constitue une inspiration grâce à un attribut commun entre l'image reçue et l'artefact produit, ou encore si elle constitue une inspiration car une relation entre les sous-éléments de l'objet est reprise.

- Sa *source* : l'analogie est-elle issue d'un contenu de document, d'une expérience ou connaissance professionnelle, ou d'un vécu personnel ?

- Son *domaine* : est-elle issue du même domaine que celui de conception ou d'un domaine différent ?
- L'*outil* utilisé pour accéder à la référence, dans le cas d'une analogie issue d'un document.
- Son *type* : si elle est spontanée ou demandée.
- Son *mode* : l'évocation de la référence peut être implicite ou explicite.
- Son *rôle* : elle peut constituer une source d'inspiration ou plutôt une source d'évaluation.
- Son *usage* : c'est un succès si elle contribue au projet ; un échec si elle ne répond pas aux attentes ; elle peut aussi être non utilisée si elle n'est pas mise en œuvre dans le projet malgré sa pertinence ; ou elle peut être chaînée si elle conduit à une solution du problème suivant.

Table 11. Critères de codage des données (extrait du protocole du cours d'Analyse des Processus de Conception Collaborative de l'Université de Liège).

Catégorie		Appariement
Critère	Définitions	Exemples
Objet	Appariement du domaine de base et du domaine cible par transfert d'un objet à un autre	<i>Reprendre un meuble conçu tel quel d'un autre projet</i>
Attribut	Appariement du domaine de base et du domaine cible par liaison entre une même caractérisation d'objet	<i>Reprendre une forme analogue à celle d'un espace précédemment conçu</i>
Relation	Appariement du domaine de base et du domaine cible par reproduction des articulations entre objets	<i>Reprendre une configuration spatiale précédente : un accès entre cuisine et salle à manger vs un passe-plats</i>
Catégorie		Source
Critère	Définitions	Exemples
Externe	Source documentaire	<i>Le concepteur évoque une caractéristique reprise dans une référence documentaire Le concepteur ouvre une page internet et exploite une illustration qu'il y trouve</i>
Interne professionnelle	Référence personnelle issue d'une expérience professionnelle et/ou de connaissances issues de la formation acquise	<i>Le concepteur se réfère à un projet antérieur déjà conçu par lui-même Le concepteur cite une connaissance technique issue de sa formation : "une feuille de porte standard mesure 93 x 205"</i>
Interne personnelle	Référence personnelle issue d'un vécu, de souvenirs et/ou d'une expérience corporelle	<i>Le concepteur se rappelle la visite d'un lieu correspondant à celui qu'il doit concevoir Le concepteur estime la dimension d'un espace s'imaginant s'y mouvoir, en référence à sa propre taille</i>

Catégorie		Domaine
Critère	Définitions	Exemples
Même domaine	Le domaine cible et le domaine de base sont identiques	<i>S'inspirer de la configuration d'une cuisine conçue précédemment pour concevoir celle du projet en cours</i>
Domaine différent	Le domaine cible et le domaine de base sont différents	<i>S'inspirer de la configuration d'un aménagement de wagon-lit pour concevoir l'espace intérieur d'un bateau</i>

Catégorie		Type
Critère	Définitions	Exemples
Spontanée	L'évocation d'une référence est prononcée spontanément	<i>Le discours du concepteur évoque une préférence précise dont il s'inspire</i>
Contrôlée	L'évocation d'une référence est-pré-déclarée	<i>Le concepteur déclare chercher une solution en s'inspirant d'un domaine de base précis</i>

Catégorie		Mode
Critère	Définitions	Exemples
Conscient	L'évocation d'une référence est explicitement citée par le concepteur	<i>Le concepteur évoque la référence dont il s'inspire : "je fais comme tel architecte dans telle réalisation" ou "je vais reprendre ce que j'avais conçu pour tel projet" ou "dans mon école, cela fonctionnait comme ceci"</i>
Inconscient	L'évocation d'une référence est-opérée inconsciemment	<i>Le concepteur reproduit la forme particulière d'un objet alors qu'il ne connaît pas la raison</i>

Catégorie		Rôle
Critère	Définitions	Exemples
Inspiration	La pensée analogique survient comme source d'inspiration : elle génère une solution potentielle qui, sous réserve de ses capacités d'adaptation, peut nourrir la problématique traitée	<i>Penser à une oeuvre de Peter Zumthor comme les termes de Vals pour proposer une façade minérale</i>
Evaluation	La pensée analogique est évoquée comme source de validation : elle confirme que la solution discutée est valide pour la problématique posée	<i>Evoquer les termes de Vals de Peter Zumthor comme preuve qu'une façade minérale offre une durabilité effective en site montagneux</i>

Précisons que nous avons pris soin, lors du recueil des données, de ne pas perturber les concepteurs ni influencer leurs activités en nous plaçant suffisamment en retrait de leur espace de conception.

Par ailleurs, l'ensemble de la scène est filmé (son et image) pour capturer les données de manière exhaustive et compléter éventuellement la prise de note. A cet effet, deux caméras sont utilisées, la première est identique à celle placée dans la salle pour que le Magicien d'Oz puisse suivre la conception en cours. La deuxième est placée dans l'angle de la pièce. Elles enregistrent les activités de conception, les interactions verbales, gestuelles et graphiques des concepteurs ainsi que les visuels apparaissant sur l'écran. En outre, des entretiens d'auto-confrontation sont menés avec les sujets à la fin de la capsule de conception.

Finalement, le schéma ci-après synthétise la composition des équipes étudiées.

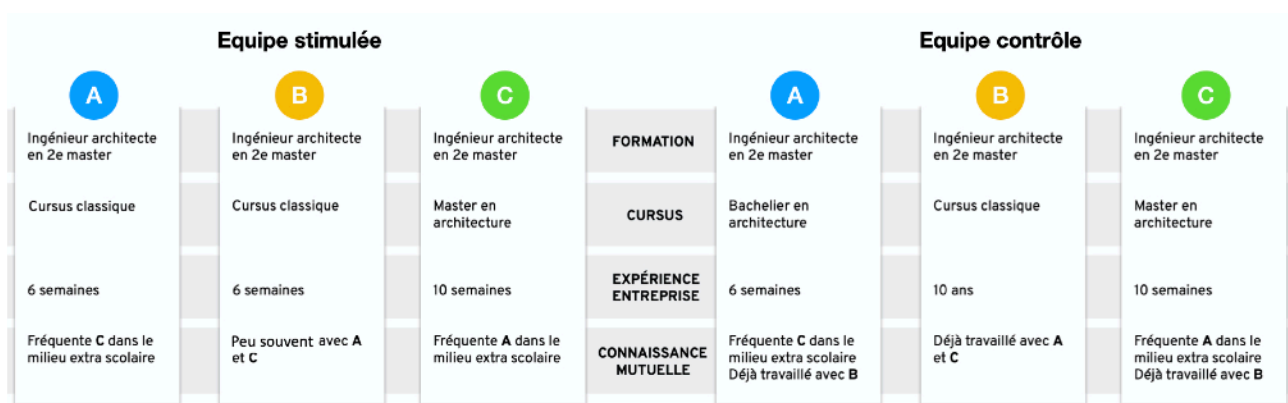


Figure 96. Composition des équipes de concepteurs ayant participé.

8.3.2 Résultats comparatifs de l'impact des stimuli

Les résultats présentés sont une analyse qualitative et comparative de la variabilité des usages, lors du processus de conception, du contenu des différentes sources d'inspiration, images disponibles en consultation ou envoyées en stimuli. Nous observons ainsi globalement le processus de conception ainsi que les analogies réalisées, d'une part dans l'équipe contrôle, utilisant les outils traditionnels, et d'autre part dans l'équipe aux stimuli analogiques. Nous procédons ensuite à la comparaison des types d'appariements et de leurs rôles et usages dans les activités de conception.

8.3.2.1 Description de l'analogie non stimulée

Le déroulement du processus de conception de cette équipe s'organise en trois grandes séquences : phase de lecture, phase d'esquisse et phase de concrétisation.

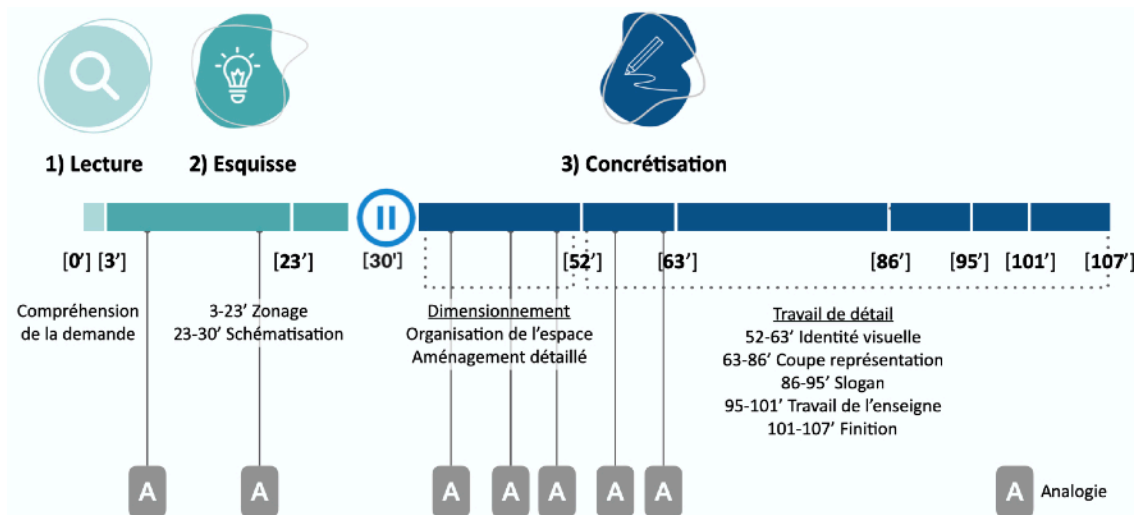


Figure 97. Processus de conception général en situation non stimulée (équipe de contrôle).

Au départ, lors de la phase de lecture, nous avons pu observer que les concepteurs travaillent individuellement pour structurer le problème. Ensuite, dans une seconde phase, la majorité du temps de conception est dédié à l'organisation des locaux et l'aménagement des espaces. Cette élaboration s'effectue de manière concrète et précise, les concepteurs émettent plusieurs idées et en discutent. Puis deux d'entre eux les concrétisent en représentations externes de l'artefact tandis que le troisième évalue les solutions proposées notamment au moyen des images de référence. Dans les dernières minutes, nous observons une évolution de cette organisation collective vers une phase de production individuelle de mise au net des documents finaux.

Nous avons comptabilisé sept analogies dans cette équipe en observant leurs activités de conception. Elles ont été réalisées majoritairement lors de l'organisation et l'aménagement des espaces. Nous avons également pu distinguer deux types d'analogies, implicites d'une part lorsque le concepteur évaluait la pertinence d'une solution par analogie mais sans énoncer l'analogie et explicites d'autre part lorsque ce dernier évoquait oralement le souvenir d'un élément similaire ou comparait explicitement. Nous ne pouvons considérer dans cette étude les analogies implicites, celles-ci ne pouvant faire l'objet d'une liste exhaustive bien que parfois détectables lors de nos observations, ni être caractérisées selon les modalités du protocole utilisé. De plus, lors des entretiens d'auto-confrontation avec les sujets concepteurs, nous n'avons pu déterminer si l'activité de génération ou d'évaluation de solution signalée découlait réellement d'une analogie, le concepteur étant incapable de le confirmer. Pour ces raisons, nous ne considérerons pour notre recherche que les analogies explicites.

Enfin, en analysant les activités entourant l'apparition d'analogies, nous avons constaté qu'elles étaient suivies d'actions concrétisant l'artefact ou validant des choix de conception. En rentrant dans le détail des activités entourant l'apparition d'analogie, nous pouvons voir que les analogies (encarts « A » verts, figure 98) sont suivies d'actions de concrétisation consistant à agir

sur l'artefact (pastilles rouges, figure 98) ou à poser des validations de choix de conception (pastilles jaunes, figure 98). Elles sont donc des moteurs de décision.

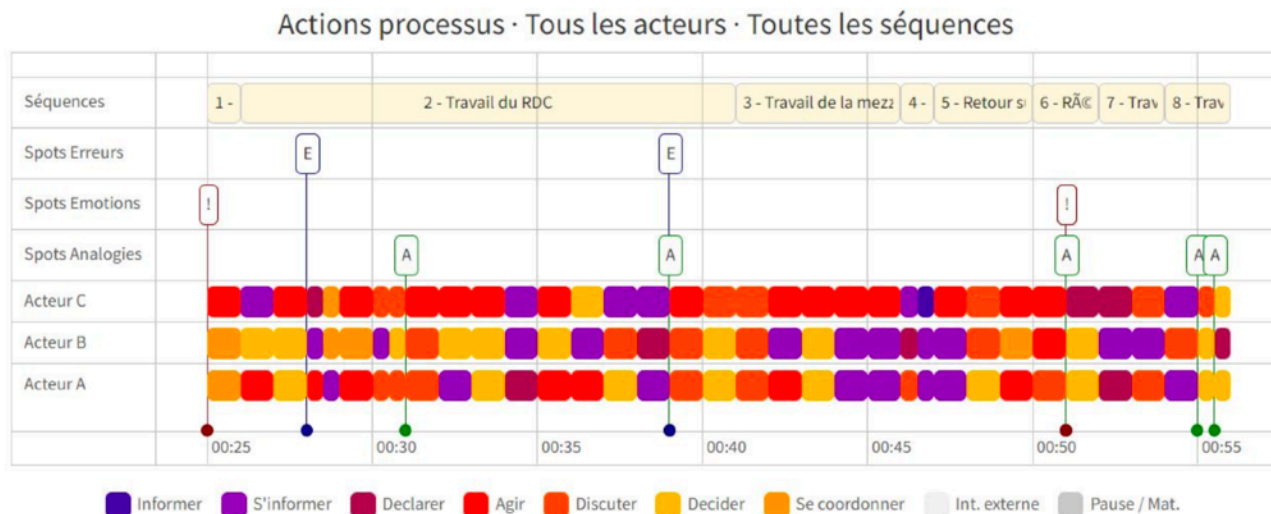


Figure 98. Zoom sur les activités de conception dans la période la plus chargée en analogies (phase de « dimensionnement »).

8.3.2.2 Description de l'analogie stimulée

Le déroulement du processus de conception de cette équipe s'organise en quatre séquences : l'appropriation du sujet d'énoncé, la conceptualisation des idées, la production des documents et la vérification.

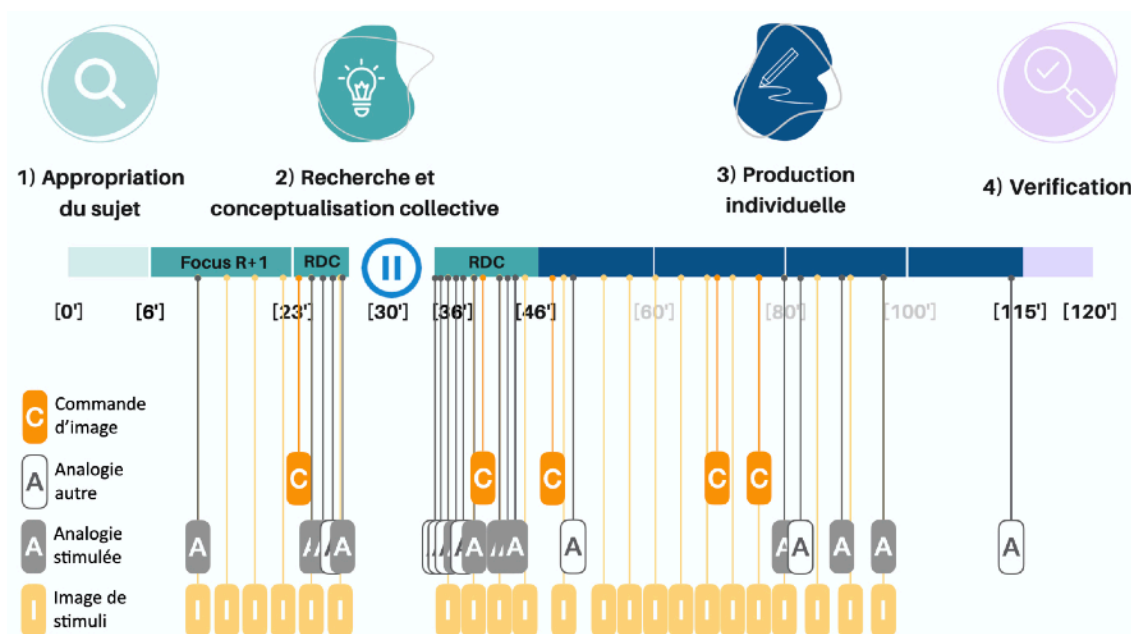


Figure 99. Processus de conception général en situation stimulée (Magicien d'Oz).

La première séquence commence par une prise de connaissance de la part des acteurs des contraintes du projet dans le but de dresser une ligne directrice. La deuxième séquence est consacrée à l'élaboration des principes structurant la répartition des locaux. Cette séquence est animée de

multiples débats au sein de l'équipe cherchant à s'accorder sur les idées proposées. Elle est également ponctuée d'apartés entre deux concepteurs pour détailler certains aménagements. Ensuite, la séquence de production se fait de manière individuelle et le processus de conception se clôture dans les cinq dernières minutes par une vérification en groupe.

Dans la figure ci-avant, nous retraçons durant le processus les divers envois d'images de stimuli (jaune), les analogies réalisées sur base de ces images (gris), les autres analogies provenant de la mémoire des concepteurs (blanc) et les commandes particulières adressées au système (orange). Ce dernier point, non prévu par le protocole, est une initiative des concepteurs lorsqu'ils ont compris que les images envoyées par le système s'ajustaient à leur conception. Ils n'ont alors pas hésité à questionner oralement la technologie, désireux d'images de références spécifiques, traduisant ainsi leur besoin d'inspiration.

Cette équipe a établi vingt analogies lors de leurs activités de conception, principalement durant la séquence de conceptualisation. 60% de ces analogies émanent des images de stimuli. Les 40% restant sont le fruit de la mémoire et sortent donc du cadre des images envoyées. Si nous regardons les usages faits des images de stimuli, seules un peu plus de la moitié sont réellement utilisées dans des analogies (52%), un peu moins d'un tiers sont totalement ignorées (28%) et 20% sont consultées mais laissées sans suite.

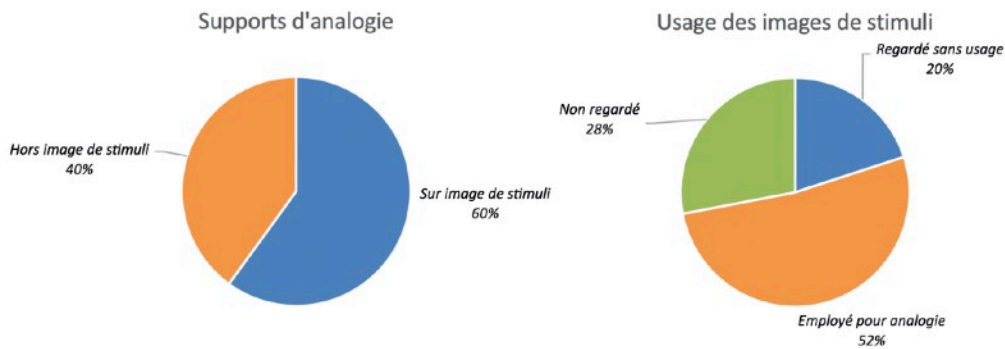


Figure 100. Statistiques sur les analogies réalisées en situation stimulée.

Et pour terminer, nous pouvons observer, en rentrant dans les détails, que ces analogies sont presque exclusivement mobilisées lors des discussions de conception.

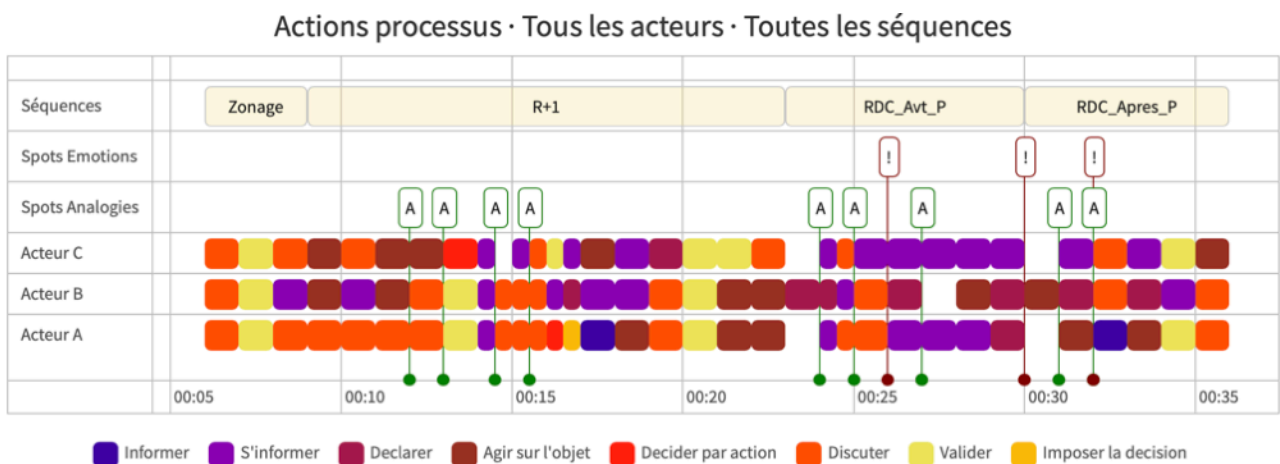


Figure 101. Zoom sur les activités de conception dans la période la plus chargée en analogies (phase de « conceptualisation »).

8.3.2.3 Discussion comparative des activités d'analogie

Tout d'abord, nous constatons un nombre et une fréquence d'analogie plus élevé dans le groupe ayant une analogie stimulée. Cependant un corpus de deux équipes ne nous permet pas de tirer des conclusions de cette répartition. Toutefois, en comparaison avec quatre autres éditions du séminaire de recherche d'Analyse des Processus de Conception Collaborative de l'Université de Liège suivant ce même protocole en ce qui concerne l'équipe de contrôle, un processus présentant 20 analogies est plutôt rare tandis que 7 analogies est une moyenne basse.

Ensuite, nous pouvons constater que l'analogie ne semble pas déterminer le processus de conception mais est plutôt utilisée au service de l'activité de conception à des moments précis, principalement lors de l'organisation et l'aménagement des espaces, et ce quel que soit le support de l'analogie (recueil papier ou images de stimuli). Cette caractéristique temporelle d'usage rencontre les travaux de Chupin (1998) selon lequel il existe une temporalité opportune dans le processus de conception pour solliciter l'analogie.

D'autre part, nous remarquons une variabilité au sein des groupes quant au rôle de ces analogies. Elles sont utilisées par l'équipe stimulée durant les débats entre concepteurs, à titre d'exemple, d'inspiration ou même de validation, alors que pour l'équipe contrôle, non stimulée, leur rôle est plutôt déterminant, comme un moteur de décision, permettant la concrétisation de l'artefact.

En comparant les analogies réalisées dans les deux groupes en fonction des 7 critères de descriptions de Ben Rajeb, Leclercq et Heylighen (Leclercq & Heylighen, 2002 ; Ben Rajeb & Leclercq, 2016), nous obtenons le graphique ci-après :

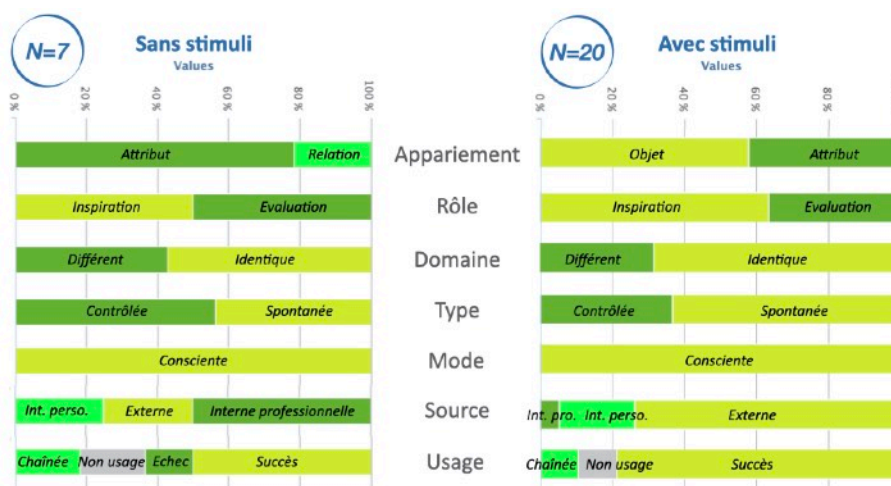


Figure 102. Comparaison des analogies en situation de conception stimulée ou non-stimulée.

Nous observons que, selon les conditions de conception, l'appariement varie. Dans l'équipe avec analogie non stimulée, les images, bien que se rapportant au même type de projet architectural, restent des images d'inspiration générique. Les analogies portent principalement, dans ce groupe, sur les attributs de l'artefact, soit sur une caractéristique inspirante. Par contre, dans l'équipe avec analogie stimulée, les images envoyées sont adaptées à l'objet en cours de conception durant tout le processus. Les analogies portent dès lors principalement sur l'objet architectural entier et quelques fois sur des attributs de cet objet.

Nous observons également une autre différence marquante portant sur les sources d'analogie. Dans le groupe contrôle, le mémoire des concepteurs, qu'elle soit personnelle ou professionnelle, est plus souvent source d'analogie (*source interne*) que les images de référence papier fournies (*source externe*), tandis que, pour le groupe stimulé, se produit l'inverse.

Enfin, les analogies établies en situation de conception stimulée ont plus souvent apporté une contribution au projet, pouvant être apparentées ainsi à un succès, que les analogies réalisées en situation non-stimulée.

En conclusion, ces résultats montrent que stimuler le raisonnement analogique en proposant au(x) concepteur(s) des images d'inspiration adaptées à l'objet en cours de conception constitue une plus-value, sans risquer de contraindre ni déterminer le processus de conception.

Nous avons précédemment proposé d'instrumenter la conception en fournissant au concepteur des images d'inspiration en temps réel et en lien direct avec l'évolution de l'artefact conçu. Nous interrogeons donc les conséquences de cette stimulation du raisonnement analogique. A cette fin, nous avons réalisé une expérimentation contrôlée sur deux corpus d'activités de conception collaborative. Le premier présentant une conception collaborative traditionnelle sert de groupe contrôle. Le second présente la même tâche de conception collaborative mais instrumentée par un Magicien d'Oz pour stimuler les analogies.

Nous avons constaté que dans aucune des équipes les analogies réalisées n'ont déterminé le processus. Dans les deux équipes, les supports d'analogie (papier comme stimuli) ont été convoqués au service de la conception, et principalement au moment de l'aménagement des espaces. L'équipe contrôle a mobilisé les analogies, pour partie de leurs caractéristiques, comme moteur de décision tandis que l'équipe stimulée a mobilisé les analogies, pour l'objet entier, comme inspiration ou illustration lors des discussions de conception.

En outre, les images d'inspiration génériques papier ont moins été employées pour analogie que des souvenirs de mémoire, tandis que les images envoyées par stimuli ont plus été employées par les concepteurs que leur mémoire.

Finalement, les analogies faites en situation de conception stimulée sont plus souvent couronnées par un succès, c'est à dire par une contribution au projet, que celles faites en situation non-stimulée.

***W**e have previously proposed to instrument design by providing the designer with inspirational images in real time and in direct relation to the evolution of the designed artefact. We are now investigating the consequences of this stimulation of analogical reasoning. To this end, we carried out a controlled experiment on two sets of collaborative design activities. The first, presenting a traditional collaborative design task, serves as a control group. The second presented the same collaborative design task but instrumented by a wizard of oz to stimulate analogies.*

We found that in neither team did the analogies determined the process. In both teams, the analogy supports (paper or stimulus) were used in the design process, mainly when the spaces were being laid out. The control team used the analogies, for some features, as a decision-making aid, while the stimulated team used the analogies, for entire objects, as inspiration or illustration during the design discussions. In addition, generic paper inspiration images were less used as analogies than memory recollections, while images sent by stimuli were more used by the designers than their memory. Finally, analogies made in a stimulated design situation were more often successful, i.e. contributed to the project, than those made in an unstimulated situation.

8.4 Compréhension des esquisses architecturales

Dans cette dernière section, nous exploitons les 40 heures documentées de travail d'interprétation et de modélisation des lutins. Notre étude se focalise sur les activités du concepteur mais nous désirons entamer une réflexion sur ce pan plus opérationnel de l'instrumentation par l'Interpréteur. Nous nous inscrivons en complément des travaux réalisés par Juchmes, Leclercq et Azar (2001, 2002, 2004) sur EsQUIsE et par Demaret et Leclercq (2011, 2012) sur NEMo. Nous saisissons l'opportunité ouverte par notre récolte de données d'étudier le travail humain d'interprétation et de modélisation et de voir s'il peut mettre en lumière des stratégies complémentaires à celles développées dans les prototypes numériques.

Nous questionnons donc la capacité des lutins modélisateurs à comprendre les différentes esquisses reçues. Nous analysons ici les actions d'interprétation et de modélisation selon la description que les lutins, modélisateurs humains, en font dans le cadre de l'expérience en Magicien d'Oz.

8.4.1 Retours sur l'activité d'interprétation des lutins modélisateurs humains

8.4.1.1 Entretiens d'auto-confrontation avec les lutins modélisateurs

Comme nous l'avons vu dans la section 8.1.4 de ce chapitre, décrivant le protocole de cette expérience, les données relatives aux activités d'interprétation et de modélisation des lutins modélisateurs sont recueillies par des entretiens d'auto-confrontation individuels réalisés en fin d'expérience sur base d'enregistrements de leur travail. Nous avons choisi de recueillir ces données au moyen d'entretiens pour avoir accès aux logiques d'interprétation et de choix des lutins. En termes de corpus de données, les 5 heures d'entretiens documentent 9*3*90', soit 40 heures et 30 minutes d'interprétation et de modélisation.

Les questions sont posées afin de comprendre les activités d'interprétation de manière générale mais également certains épisodes spécifiques de compréhension d'un dessin particulièrement peu clair ou, au contraire, d'incompréhension. Elles ciblent notamment :

- les facteurs permettant de reconnaître la signification des traits ;
- les informations nécessaires pour reconnaître le terrain, distinguer un plan de rez-de-chaussée d'un plan d'étage ou d'une coupe ;
- les indices permettant de déduire les fonctions des locaux esquissés ;
- La signification donnée aux différentes couleurs utilisées ;
- l'existence de codes généraux non-équivoques ;
- les éléments permettant de constater une erreur d'interprétation ;
- la réaction face à une incohérence du concepteur ;
- etc.

Nous analysons ces entretiens en utilisant la méthode qualitative ancree de Lejeune (2019), déjà utilisée en section 7.2.1.2 du chapitre 7 pour faire émerger les typologies d'information caractérisant le projet. Ainsi, nous extrayons de chaque entretien l'essence des différents concepts

(*étiquettes*) et leurs relations. C'est ainsi que nous construisons un diagramme causal (figure 103) de leur activité d'interprétation. L'activité y est décrite comme un paysage d'actions reliées entre elles par les liens de variation (*articulations*). En vert, l'articulation *conjointe* : ce lien traduit que, si l'une est présente/augmente, l'autre aussi. En rouge, l'articulation *inverse* : si l'une est présente/augmente, l'autre s'annule/diminue. Les bulles rectangulaires représentent des variables *discrètes*, soit on répond à une commande, soit on n'y répond pas, tandis que les bulles hexagonales représentent des variables *continues* (e.g. on peut plus ou moins stresser). Finalement, les articulations en pointillé représentent des articulations *conditionnées* par une étiquette hors bulle.

Prenons l'exemple, de Lejeune (2019), de l'activité de danser : ce diagramme causal, traduite en phrases, décrit notamment que « **Bien danser le hip-hop aide à se lâcher, à être sûr de soi et à se projeter.** Par contre, **répondre à une commande empêche de se lâcher, de se dépasser et de se compléter.** Répondre à une commande fait également stresser. Stresser empêche de bien danser (...). En revanche, *si on se canalise, stresser (...) contribue à mieux danser* » (Lejeune, 2019, p. 126).

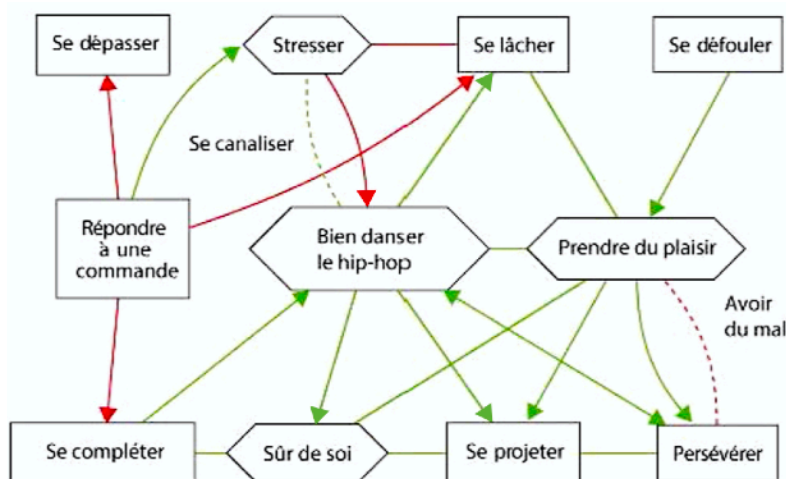


Figure 103. Exemple de diagramme causal obtenu en résultat de l'analyse qualitative ancrée des entretiens - ici dans une analyse de l'activité de danser (d'après Lejeune, 2019).

Cette représentation en diagramme causal amène également à s'interroger sur les potentiels liens supplémentaires existant entre les *étiquettes* et dès lors à interroger la description du phénomène vécu, issue des entretiens.

8.4.1.2 Identification des paramètres permettant la reconnaissance des esquisses

Cette analyse permet d'identifier, sur base des entretiens menés et des stratégies déclarées par les lutins, plusieurs paramètres mobilisés pour comprendre les esquisses reçues. Elle est un complément au travail de Demaret qui pistait dans ses recherches (malheureusement non-publiées) comment un esprit humain construit-il une signification de ce qu'il voit, pendant la construction même de l'artefact en question. Les paramètres de reconnaissance sont (1) le contexte, (2) les codes architecturaux, (3) les associations de forme, (4) l'échelle, (5) les codes couleurs et finalement (6) l'apprentissage.

1. Le **contexte**, notamment connaître le terrain sur lequel s'implante le projet ainsi que le programme demandé, permet déjà de déduire plusieurs caractéristiques attendues dans le projet

dessiné. Un terrain en pente forte permet de s'attendre à minimum deux niveaux (l'un à hauteur du jardin, l'autre à hauteur de la rue). La largeur du terrain permet, en fonction de la largeur d'emprise du plan, de deviner s'il s'agit d'un projet mitoyen, 3 façades ou 4 façades. Savoir qu'une salle de jeu et un bureau sont demandés permet de retrouver ces fonctions dans les espaces dessinés même si l'aménagement des pièces n'est pas représenté.

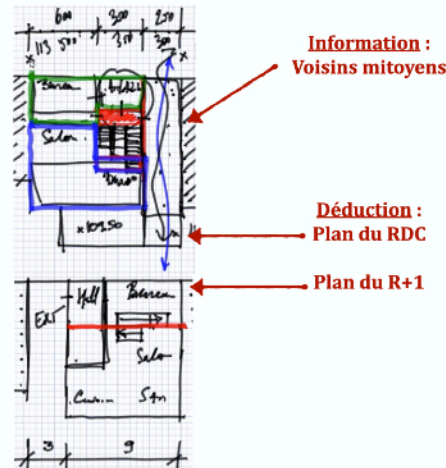


Figure 104. Exemple de composant interprété grâce au contexte.

2. Les **codes architecturaux** sont bien sûr la manière la moins ambiguë d'identifier les composants dessinés. A titre d'exemple, un mur plus épais sera un mur coupé ou porteur par opposition à un muret ou une cloison. Les portes, escaliers, tables à manger, lits, éviers, baignoires, toilettes ont des symboliques propres et uniques. En extrapolant ces codes, une pièce sera une chambre si elle possède un lit, une cuisine ou une salle à manger s'il y a une table. Les composants sont également parfois cotés ou labellisés dans l'esquisse.

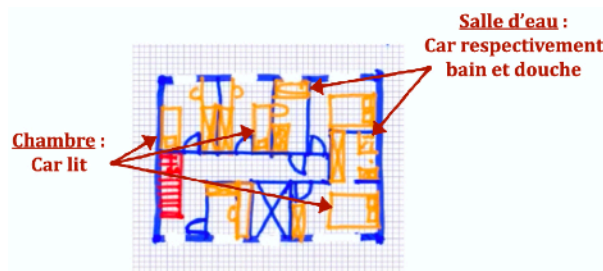


Figure 105. Exemple de composant interprété grâce aux codes architecturaux.

3. Une **forme** peut être comprise parce qu'elle est **associée à une autre**, réduisant ainsi à une solution unique ses potentialités de sens. Prenons un cercle : cette forme basique peut, *a priori*, symboliser beaucoup de choses comme une zone, un tapis, des plaques de cuisson, une table, une chaise, ... Si ce cercle est intersecté d'autres traits et large, c'est plutôt une annotation délimitant une zone. S'il est au milieu d'une pièce, il représente plutôt un tapis. Si ce cercle, au milieu d'une pièce, est entouré de ronds, carrés ou traits identiques et de plus petite taille, il symbolise une table. Si, par contre, il est groupé à un ou trois autres cercles, tous inscrits dans un rectangle ou un carré, c'est une cuisinière.

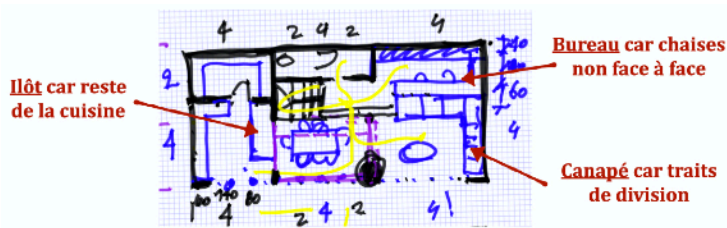


Figure 106. Exemple de composant interprété grâce aux associations de forme.

4. L'échelle des traits joue également un rôle dans l'interprétation des esquisses. Prenons ce même rectangle, fin et long, dont les deux diagonales sont marquées : il est le code architectural désignant une armoire haute. Cependant, si ce rectangle prend un tiers de la superficie d'une pièce, il devient la croix symbolisant le vide d'une mezzanine.

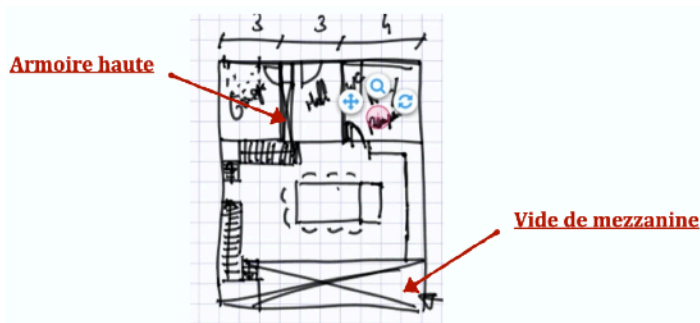


Figure 107. Exemple de composant interprété grâce à l'échelle.

5. Les lutins modélisateurs évoquent également une récurrence dans les codes couleurs employés. Au travers des esquisses et des entretiens, nous constatons que les murs sont représentés dans des couleurs sombres et froides comme le bleu ou le noir, que l'aménagement est représenté en noir, bleu ou orange, et que les annotations sont réalisées dans des couleurs chaudes (jaune, orange, rouge, violet) ou en noir. En outre, le bleu symbolise le vitrage ou l'eau ; le vert, la végétation ; le jaune, la lumière ; et l'orange, le bois. La couleur noire reste, quant à elle, une couleur de défaut. Notons que les concepteurs ont parfois déclaré utiliser la couleur spécifiquement pour se faire comprendre de la machine. Ils ont par contre librement choisi le code couleur employé ainsi que d'en faire usage ou non.

Nous devons nuancer cet usage de codes couleurs parce que, bien qu'il soit constant, dans le sens où un concepteur ne changera pas de code au cours de la conception, il n'est pas systématique : un élément est par exemple colorié en bleu dans la façade pour insister sur sa nature vitrée par opposition à la porte pleine, mais cela ne signifie pas à l'inverse que tout ce qui n'est pas bleu n'est pas du vitrage. Ainsi, la couleur est une information mais l'absence de couleur n'en n'est pas une.

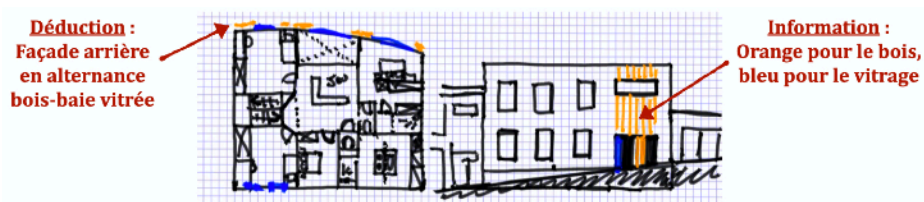


Figure 108. Exemple de composant interprété grâce aux codes couleurs.

6. Finalement, s'installe un **apprentissage** des codes de représentation personnels employés par le concepteur qui permettent aux lutins modélisateurs de mieux comprendre les esquisses. Un sujet a notamment commencé à employer des couleurs pour situer les différentes natures de locaux, chambres, salles d'eau, circulations, ce que les lutins modélisateurs ont compris et ont ensuite utilisé comme information pour mieux comprendre l'évolution du projet. Cet apprentissage tient autant de l'absorption des codes de dessins personnels (couleurs, symboles, abréviations, etc.) que des méthodes de conception (plan par plan en progressant dans le détail, aller-retours entre plans et coupes, test de différentes versions peu détaillées, etc).

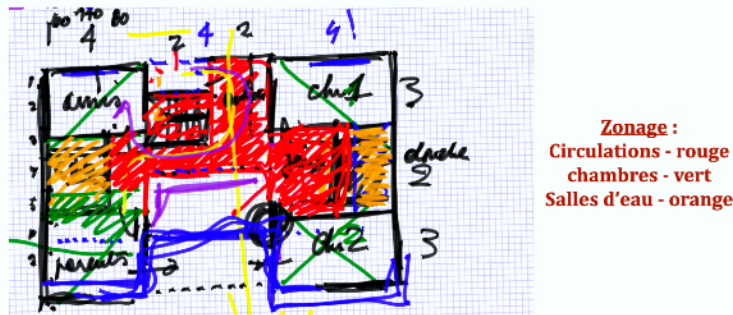


Figure 109. Exemple de composant interprété grâce à l'apprentissage.

Au-delà de toutes ces informations permettant de déduire le sens des traits, le point essentiel de la compréhension des esquisses architecturales réside dans leur évolution dynamique. Comprendre une esquisse tirée de son contexte et figée à un instant t donné peut s'avérer extrêmement compliqué. La temporalité d'apparition des traits et la connaissance du projet construite au fur et à mesure de ses représentations est une clef de compréhension cruciale dans l'activité d'interprétation d'esquisses architecturales.

8.4.1.3 Choix de modélisation

Face à l'évolution rapide des esquisses et aux nombreuses modifications du projet dessiné, les lutins modélisateurs interrogés décrivent une stratégie générale de modélisation qui est la suivante : ils commencent par modéliser les frontières et accès (murs, murets, portes, escaliers), éléments structurants de l'espace en architecture, avant de représenter le mobilier et finalement les cotes.

Notons par ailleurs que, malgré cette évolution des esquisses, les lutins modélisateurs humains sont capables de se souvenir des premiers schémas d'intention des concepteurs ou des autres niveaux précédemment dessinés. Ils continuent ainsi la modélisation du projet même si l'affichage de l'esquisse à l'écran a changé. La mémoire est donc essentielle pour rendre le phénomène d'interprétation possible.

Par ailleurs, les lutins modélisateurs ont dû poser des choix architecturaux, malgré leur instruction de s'en tenir à de la représentation, pour pouvoir accomplir leur tâche. En effet, lorsque les concepteurs ne dessinent pas à une échelle réaliste, les modélisateurs ont dû décider entre respecter les proportions du dessin et donc représenter un mobilier plus grand, ou plus petit, que la normale, ou dessiner un mobilier aux dimensions standard et donc ne remplissant pas l'espace de la pièce ou la surchargeant. La limite est délicate à définir car les architectes dessinent autant des mobiliers sur mesures avec des intentions spécifiques d'effet d'espace que pour meubler leurs

pièces avec du mobilier standardisé. Comment donc distinguer une échelle intentionnellement différente des dimensions standard de l'erreur de représentation. Face à cette difficulté de positionnement, les modélisateurs ont choisi de représenter le mobilier aux dimensions standards en attendant d'être corrigés au besoin. Certains concepteurs ont ainsi pris conscience grâce à l'Interpréteur de leur erreur de dimensionnement.

8.4.2 Perspectives pour l'interprétation d'esquisses architecturales

Ces premiers résultats traitant de la compréhension des esquisses architecturales mettent en lumière le besoin crucial d'expertise dans le domaine pour être capable de reconnaître les composants représentés. Les lutins se sont en effet projetés en tant que concepteur du projet, de manière à anticiper les potentialités de conception et les reconnaître dans les dessins. En outre, ils ont mobilisé leur mémoire pour continuer à modéliser le projet alors même que le cadrage de l'image en cours d'affichage avait changé.

Ces précieuses capacités, naturelles chez l'humain peuvent tout à fait être implémentées dans le travail de la machine.

En synthèse, nous schématisons ci-après la stratégie d'interprétation et de modélisation déclarée par les lutins.

Sur base des esquisses capturées constituant les traits initiaux, ils réalisent un filtrage visuel pour enlever les traits parasites et ne garder en perception visuelle que les traits synthétiques. Ces traits, accompagnés des souvenirs des autres traces antérieures, sont reconnus comme des éléments d'esquisses (des formes, des zones, des symboles d'équipement, etc.). Les lutins génèrent ainsi un modèle mental géométrique et topologique à partir des traits reconnus. Ce modèle mental servira d'ailleurs par la suite à compléter les traits synthétiques reçus des traits antérieurs. Ensuite, en combinant ce modèle mental géométrique avec leurs connaissances du contexte de conception (programme, terrain), leurs connaissances des codes de dessin personnels du sujet (nourries au fur et à mesure), leurs connaissances architecturales (séquences de fonctions souvent adjacentes, attente de mobilier spécifique, etc.) et les intentions architecturales du sujet concepteur (également découvertes au fur et à mesure), ils sont capables d'interpréter ce modèle mental géométrique et topologique pour le transformer en un modèle fonctionnel du bâtiment conçu, qui identifie les différents espaces-fonctions, leurs frontières et connexions, les caractéristiques esthétiques ou fonctionnelles ces éléments de mobilier, etc. Ce modèle fonctionnel nourrit alors la connaissance des lutins sur les intentions du concepteur et sur ses codes personnels de représentation graphique. Finalement, les lutins génèrent des représentations externes de ce modèle sous forme de maquette 3D, de plans nets ou d'images de rendu. Ils peuvent également l'exploiter pour générer des images d'inspiration traduisant alimentant la créativité du sujet par rapport à ses intentions et à la direction qu'a pris le projet.

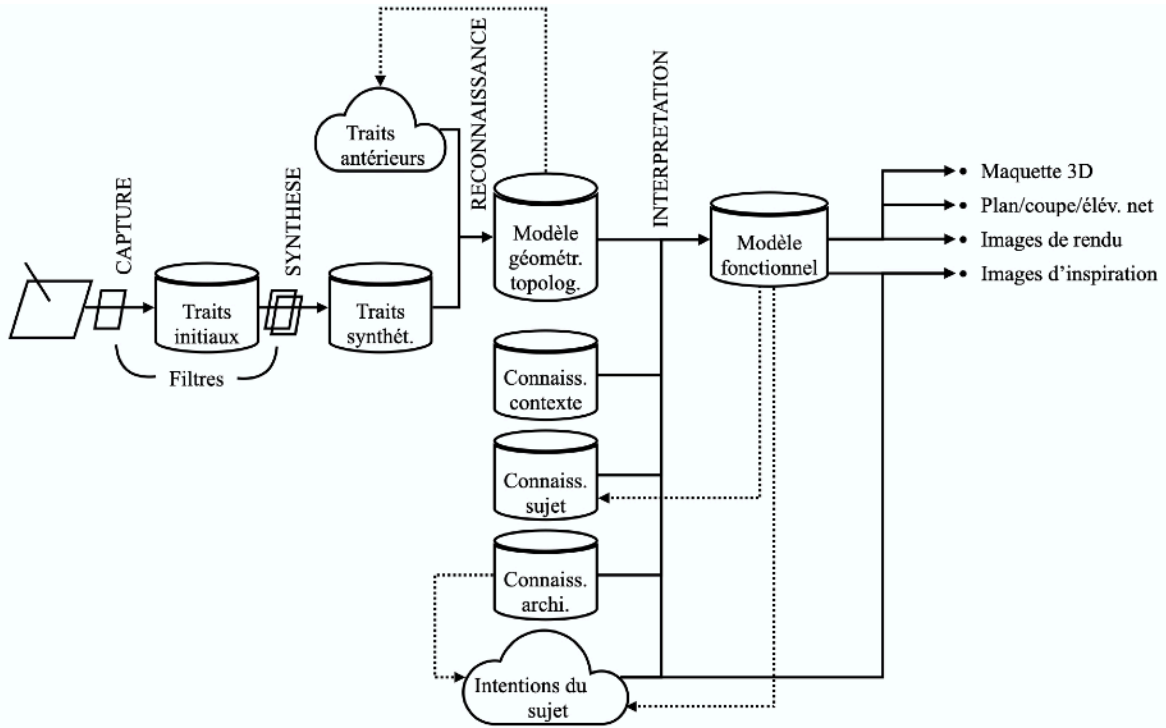


Figure 110. Structure procédurale de la stratégie des lutins modélisateurs.

Nous la mettons en parallèle avec le modèle procédure du prototype EsQUIsE. Pour rappel, ce prototype enregistre, via un module de saisie, chaque action de dessin du concepteur et synthétise les traits. Le mode de synthèse filtre ensuite ces traits pour extraire leurs caractéristiques. Les informations topologiques et géométriques sont analysées pour déduire les différents locaux du bâtiment et leurs fonctions. Le module d'interprétation traduit le plan dessiné en un modèle numérique fonctionnel du bâtiment qui fera l'objet d'une modélisation 3D et d'évaluations thermiques.

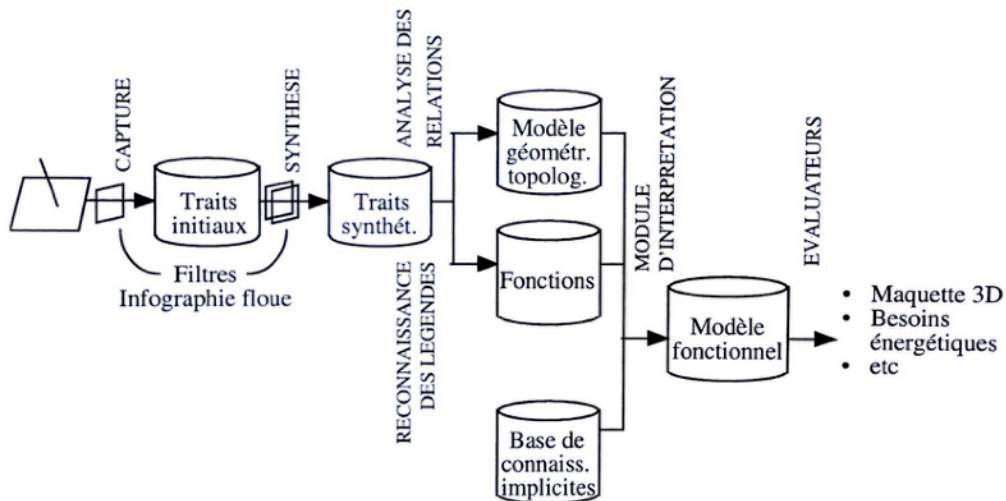


Figure 111. Structure procédurale du prototype EsQUIsE (Juchmes & Leclercq, 2001, p. 130).

Ainsi, nous remarquons que la structure procédurale du logiciel est un flux unidirectionnel analysant l'esquisse trait par trait, tandis que les lutins mobilisent une stratégie de travail présentant des boucles de construction de connaissance. En outre, là où la base de connaissance implicite du

logiciel était floue et englobait tout type de données sans être complète, la schématisation du travail des lutins nous éclaire quant aux différentes formes de connaissance mobilisées dans ces activités d'interprétation de dessins. Cela met en évidence l'intérêt que peuvent présenter les Systèmes Multi-Agents pour accomplir des tâches nécessitant un apprentissage et mobilisant des fonctions de reconnaissance diverses s'informant mutuellement.

Ces premiers éléments ne font qu'ouvrir la perspective d'étudier l'interprétation des esquisses. Ils ne suffisent bien sûr pas à documenter de manière exhaustive les mécanismes humains d'interprétation de l'esquisse architecturale. Il sera riche de la documenter plus en profondeur en étudiant les moments d'incompréhension pour extraire les informations encore difficilement extractible, même par des humains, mais précieuse à l'interprétation ; ainsi qu'en répétant les tâches d'interprétation et de modélisation de manière large, sur plusieurs sujets-lutins, afin de déterminer les stratégies communes et généralisables d'interprétation.

Nous avons analysé les entretiens d'auto-confrontation réalisés avec les lutins modélisateurs selon la méthode qualitative ancrée par étiquetage de Lejeune (2019). Par le biais des cartes heuristiques ainsi obtenues et décrivant le phénomène, nous avons pu identifier 6 facteurs permettant la compréhension des esquisses, à savoir :

- le contexte : connaître le terrain et le programme du projet ;
- les codes architecturaux : connaître le sens de ces codes non-ambigus ;
- les associations de forme : déduire le sens d'une forme d'après les autres ;
- l'échelle : déduire le sens d'un composant selon sa taille ;
- les codes couleurs : utiliser les couleurs comme information supplémentaire ;
- l'apprentissage : intégrer méthode et codes personnels du sujet concepteur.

Nous constatons également que la temporalité d'apparition des traits et la construction de la compréhension du projet sont déterminantes dans la capacité de comprendre les dessins. Le caractère dynamique de l'esquisse et la capacité de mémoire sont donc indispensables à la bonne réalisation de la tâche.

Nous avons par ailleurs observé (i) une stratégie de modélisation progressive du zonage spatial à l'aménagement mis en place pour faire face aux rapides changements de conception ainsi que (ii) le besoin de poser des choix face aux erreurs ou incohérences des concepteurs. Nous développons finalement le schéma procédurale de l'activité d'interprétation des lutins modélisateurs.

***W**e analysed the self-confrontation interviews conducted with the modelling agents according to the qualitative anchored method by labelling of Lejeune (2019). Through the heuristic maps thus obtained and describing the phenomenon, we were able to identify 6 factors allowing sketch understanding:*

- *Context: knowing the site and the building programme.*
- *Architectural codes: knowing the meaning of these unambiguous codes.*
- *Form associations: deducing a form's meaning from surrounding ones.*
- *Scale: deducing a component's meaning from its size.*
- *Colour codes: using colours as additional information.*
- *Learning: integrating method and personal codes of the designer.*

We also note that the temporality of the appearance of the features and the construction of the understanding of the project are determining factors in the ability to understand the drawings. The dynamic nature of the sketch and the memory capacity are therefore essential for the successful completion of the task. We observed (i) a strategy of progressive modelling from spatial zoning to layout set up to cope with rapid design changes as well as (ii) the need to make choices in the face of errors or inconsistencies of the designers. Finally, we develop the procedural scheme for the elves' interpretation activity.

Chapitre 9

Discussion

Ce chapitre commence par synthétiser les différents résultats obtenus dans nos observations et expérimentations précédemment détaillées afin de répondre aux sous-questions de recherche de notre thèse. Nous ouvrons ensuite la discussion sur l'impact des objets médiateurs et leur rôle actant dans la conception, sur les conversations de réflexion homme-machine puis par questionner la modélisation des informations en conception architecturale et le caractère BIMable des esquisses. Nous discutons également la capacité d'utiliser collectivement les instrumentations proposées ainsi que la plus-value de tels principes d'instrumentation pour toute production numérique, même en dehors du BIM, et l'importance du modèle sémantique comme support de l'information.

***T**his chapter begins by synthesizing the various results obtained in our previously detailed observations and experiments in order to answer the research sub-questions of our thesis. We then open up the discussion on the impact of mediator objects and their acting role in design, on man-machine reflection conversations, and by questioning the modeling of information in architectural design and the BIMability of sketches. We also discuss the ability to use the proposed instrumentation collectively, as well as the added value of such instrumentation principles for all digital production, even outside BIM, and finally the importance of the semantic model as an information carrier.*

9.1 Rappel de la question de recherche

Pour rappel, notre thèse cherche à comprendre comment instrumenter numériquement les phases amont du processus de conception architecturale pour en collecter les informations utiles et nécessaires qui permettront d'articuler l'idéation à la dynamique BIM. Nous avons découpé cette question en 6 points d'interrogation :

- Quelles sont les limites de la transition actuelle ?
- Par quel principe d'instrumentation la fluidifier ?
- Comment évoluent les informations au travers du processus de conception ?
- Certains artefacts sont-ils plus appropriés pour véhiculer les informations ?
- Comment collecter l'information ?
- Comment formaliser ces informations en un modèle manipulable qui puisse constituer une plus-value pour l'activité du concepteur ?

9.2 Réponse aux sous-questions de recherche

9.2.1 Quelles sont les limites de la transition actuelle ?

Nous relevons plusieurs caractéristiques de la **transition actuelle** entre les phases de conception idéative et de production BIM.

Le BIM peine à s'intégrer aux pratiques de travail déjà existantes et aux outils traditionnels (Sergeevich *et al.*, 2019) car il se positionne en rupture dans les activités, avec une faible interopérabilité des outils employés. Il impacte également la répartition des tâches et l'organisation des concepteurs (Guéneau, 2019; Calixte, 2019b, 2021; Rahhal *et al.*, 2020), notamment en amenant un nouveau métier, de nouvelles tâches spécifiques de modélisation. De plus, le processus BIM diffère de ses promesses lors de sa mise en oeuvre sur terrain, où nous voyons coexister de nombreux documents hors maquettes portant de l'information unique et où la collaboration intégrée ressemble plus à une co-conception synchronisée ponctuellement.

L'articulation observée présente tout d'abord un changement imposé dans la nature des activités, passant de la conception à la production, et donc passant d'activités itératives de proposition de solutions avec des hauts niveaux d'abstraction, à des activités convergentes de précision de l'artefact avec de bas niveaux d'abstraction. Ensuite, un changement de médias de conception est également constaté : le dessin et les plans CAD laissent la place aux outils BIM tels que les maquettes numériques et les plateformes de visualisation et résolution géométrique des conflits. Enfin, une perte d'informations apparaît, compensée, en partie seulement, par l'ajout aux maquettes BIM de supports d'informations et d'échanges complémentaires. En effet, le BIM, en tant qu'outil de représentation composé de plans, coupes et textes associés aux composants géométrisés, transmet essentiellement les informations requises et exploitées dans les phases ultérieures, celles-ci étant déjà représentées sous cette même forme de plans, coupes, textes et perspectives. Les schémas et croquis par contre, contenant le reste des informations attendues, sont difficilement transposables à la maquette BIM. Et toute l'information non attendue, mais néanmoins essentielle pour comprendre le projet dans sa globalité, est perdue puisque présente dans diverses représentations, mais pas dans celles exploitées par le BIM.

Pour répondre à notre problématique, la gestion de cette transition doit donc dépendre de la nature des informations concernées et du type de représentations. Actuellement, les plans, les

coupes, les perspectives brutes, l'immersion 3D et les informations textuelles sont facilement transposables à un modèle BIM, tandis que d'autres, tels que les croquis, les annotations graphiques, les perspectives de rendu, les images de référence et les informations textuelles non associées à des composants géométrisés, doivent être conservés dans des documents externes au modèle.

Finalement, une fois une maquette BIM sommaire réalisée, une deuxième fracture surgit puisque celle-ci est peu exploitable et doit être manuellement remodelisée pour servir à la suite du processus BIM.

9.2.2 Par quelle proposition d'instrumentation fluidifier la transition ?

Notre proposition d'un **principe de méthode de formalisation** sémantique du bâtiment permet de palier à ces fractures et alimenter plus aisément la maquette d'exploitation du BIM. Notre réflexion s'inscrit dans la continuité de plusieurs travaux de recherche sur l'interprétation d'esquisses. En effet, Self (2009) affirme qu'en idéation, sont principalement nécessaires les outils capables de supporter la « *self-reflexion* » ainsi que les représentations ambiguës, et que, pour cela, les outils conventionnels d'esquisse resteront plus adaptés que leurs équivalents numériques. Safin (2011, p. 111) complète qu'« une des voies prometteuses pour réconcilier la souplesse du dessin et les possibilités offertes par l'informatique est d'utiliser le dessin numérique à main levée ».

La collecte des informations utiles serait automatique, tout au long du processus, à partir des traces graphiques, déjà codifiées, des concepteurs. Ces informations seraient ensuite modélisées automatiquement dans un modèle sémantique, riche en sens. Sur base d'une ontologie spécifique, un Interpréteur pourrait dès lors interpréter les attributs du projet pour générer automatiquement un Modèle Architectural Numérique qui facilitera l'implémentation des informations du projet à la maquette numérique BIM.

Pour synthétiser, l'extraction d'informations des traces graphiques générerait automatiquement ce Modèle Numérique Architectural destiné à favoriser la création de la maquette BIM. Pour ce faire, il était nécessaire de connaître *quelle information* extraire, *d'où*, *comment* et avec *quel impact*, positif ou négatif, engendré sur l'activité de conception.

9.2.3 Comment évoluent les informations au travers du processus de conception ?

Dans un premier temps, afin de caractériser ce qui est au coeur même de la transition, l'actuelle comme l'alternative, nous avons éclairci **comment évolue cette information** au travers des activités de conception et comment elle se transforme.

Nous avons observé que les différents types d'informations vont des plus généraux, comme le concept architectural, aux plus détaillés comme des solutions répondant aux normes ou aux challenges techniques, en passant par des informations relatives à la répartition des fonctions ou au flux dans le bâtiment. Nos données montrent que pour la grande majorité des épisodes, les informations abordées successivement par les concepteurs sont de même typologie et portent par conséquent sur le même sujet. Ces associations observées entre des informations du même type traduisent le traitement d'un focus de conception unique et précis par les concepteurs, ce jusqu'à l'obtention d'un consensus. Ces sessions de conception épisodique visent ainsi à évaluer les propositions en cours et à en proposer de nouvelles, plus appropriées. Une fois que la problématique nécessitant un épisode de conception est solutionnée, les concepteurs passent au point suivant.

Nos observations soulignent par ailleurs l'importance du changement de moyen et les enjeux de la transition d'un média à l'autre, à la fois pour aider le concepteur à redécouvrir de nouvelles sources d'inspiration pour son travail et pour l'aider à prendre des décisions de sélection parmi les solutions alternatives disponibles, afin de parvenir à un résultat final satisfaisant. Il est donc primordial de laisser au concepteur la liberté de choisir ses outils. Le principe d'automatisation de la transition ne contraint ainsi pas le concepteur mais demeure une opportunité d'accéder à une conception plus libre tout en supportant les activités de mise au net et de sélection des variantes. Cette collecte et cette modélisation automatique des informations s'enrichissent également d'un partage de retour au concepteur, permettant les activités de redécouverte inspirante du projet sous une autre forme de représentation.

9.2.4 Certains artefacts sont-ils plus appropriés pour véhiculer les informations ?

L'information s'exprime au travers d'objets médiateurs qui lui sont propres, en fonction de sa typologie. Nous avons ainsi remarqué que les plans et coupes, réalisés à l'ordinateur ou à la main, sont de loin les plus présents mais qu'il reste des natures d'informations qui nécessitent l'usage d'autres objets médiateurs, comme les croquis et annotations ou les images de référence. Parmi les différents types d'informations, celles liées aux concepts et aux usages nous intéressent particulièrement puisqu'elles font partie des informations souvent perdues lors de la transition. Elles apparaissent partiellement dans les esquisses finales, mais principalement via des maquettes physiques ou numériques et des images de référence. Ces images de référence constituent un réel moyen de conception et de communication du projet dont nous avons initialement sous-estimé l'usage.

De plus, les concepteurs mobilisent principalement des activités de dessin de croquis à la main et des annotations pour générer et partager l'ensemble des typologies d'information. Pour faciliter l'instrumentation de la conception, il est donc crucial de ne pas entraver ces activités prépondérantes et essentielles de documentation. Afin de respecter le processus agile des concepteurs, il est nécessaire de permettre l'usage concomitant des maquettes 3D, des plans et des coupes. En effet, ces outils sont parfois utilisés en complément par les différents acteurs impliqués dans le processus de conception. Il importe de veiller à ne pas contraindre les pratiques organisationnelles et de coordination des concepteurs puisque nous avons observé des usages différents entre les activités de conception longue et celles de conception épisodique. De même, nous avons constaté des processus de conception « focus par focus », selon un certain cheminement cognitif récurrent par associations de typologies d'informations. A titre d'exemple, l'équipe 5 traite du problème posé par la batterie d'ascenseur du hall en échangeant de nombreuses informations successives de typologie identique, portant donc sur ce même focus, jusqu'à obtention d'une solution satisfaisante, en déplaçant les ascenseurs un peu plus loin et en redistribuant la position des colonnes du hall. L'équipe passe ensuite à un autre élément du bâtiment selon l'un des schémas récurrents observés, passant d'un focus d'aménagement à un focus de répétition des fonctions dans le bâtiment.

Soulignons également l'importance de la trace graphique dans les activités de conception, tant pour l'action de dessiner que pour les traits obtenus en représentation, à la fois en génération mais également en évaluation de solutions. Avec une esquisse numérique, les concepteurs exploitent d'avantage les apports de la trace graphique (Calixte, Baudoux & Leclercq, 2021).

Nos résultats ont par ailleurs mis en évidence de nombreux détournements des médias. En d'autres termes, les usages initialement attendus ne sont pas ceux réellement mis en place (Baudoux & Leclercq, 2021). Trois de ces usages inattendus sont d'ailleurs réitérés tout au long du processus. Ces trois usages sont (1) l'emploi de perspectives issues de modèles 3D pour supporter des informations relatives aux flux dans bâtiment ; (2) l'emploi de plans de DAO 2D pour transmettre des caractéristiques liées à la volumétrie du bâtiment ; et (3) l'emploi d'images de référence pour concevoir les solutions techniques nécessaires. Nous en déduisons qu'ils sont pertinents puisque les concepteurs ont la liberté de choisir les médias qu'ils utilisent et qu'ils continuent à utiliser ces emplois spécifiques. Ils rejoignent l'ensemble des usages déjà connus de ces médias.

Nos résultats ont en outre mis en évidence des fluctuations rapides dans la mobilisation des objets médiateurs. Ces allers-retours témoignent des spécificités d'usage de chaque objet médiateur, qu'il soit un moyen de conception ou des représentations externes. Cela signifie qu'aucun média n'est employé de manière constante et universelle tout au long du processus. En d'autres termes, les nombreux médias sont utilisés à des moments différents et pour divers types d'informations, selon les besoins du processus en question. Ce constat remet en lumière l'importance de la variété des objets médiateurs dans l'activité de conception. Le fait de passer d'une représentation externe à une autre crée des phénomènes de redécouverte du projet, ce qui offre des opportunités d'évaluation de l'existant et de génération de nouvelles idées. De même, la représentation du projet au moyen d'un autre outil amène à évaluer et choisir parmi les différentes solutions co-existantes.

Comme nous l'avons vu, les concepteurs voyagent beaucoup et très rapidement d'un type d'information à un autre et d'un média à un autre. Nous avons constaté qu'il choisissent également spécifiquement leurs moyens de conception et de représentation de leur projet. Ils vont jusqu'à détourner les médias existants en leur appliquant des usages inattendus. Les concepteurs s'approprient ainsi constamment les outils à leur disposition, ce qui est un constat majeur.

9.2.5 Comment collecter l'information ?

Après avoir regardé où se trouve l'information utile, nous avons analysé **comment collecter l'information**, c'est-à-dire comment extraire le sens des traces graphiques pour recueillir la sémantique qu'elles contiennent. Nous identifions les paramètres suivants, qui peuvent être mobilisés pour reconnaître les esquisses produites.

Le *contexte*, notamment le terrain sur lequel s'implante le projet ainsi que le programme demandé, permet déjà de déduire plusieurs caractéristiques attendues dans le projet dessiné.

Les *codes architecturaux* sont bien sûr la manière la moins ambiguë d'identifier les composants dessinés. Une *forme* peut être comprise parce qu'elle est *associée à une autre*, réduisant ainsi à une solution unique ses potentialités de sens. L'*échelle* des traits joue également un rôle dans l'interprétation des esquisses.

Une récurrence est relevée dans les *codes-couleurs* employés : les murs sont représentés dans des couleurs sombres et froides comme le bleu ou le noir ; l'aménagement est représenté en noir, bleu ou orange ; les annotations sont réalisées dans des couleurs chaudes (jaune, orange, rouge, violet) ou en noir ; le bleu est associé au vitrage ou l'eau, le vert à la végétation, le jaune à la lumière et l'orange au bois. La couleur noire reste, quant à elle, une couleur de défaut. Précisons que, bien qu'il soit constant, dans le sens où un concepteur ne changera pas de code au cours de la conception, cet usage de codes-couleurs n'est pas systématique : un élément est par exemple colorié en bleu dans la façade pour insister sur sa nature vitrée par opposition à la porte pleine, mais cela ne

signifie pas à l'inverse que tout ce qui n'est pas bleu n'est pas du vitrage. Ainsi, la couleur est une information, mais l'absence de couleur n'en n'est pas une.

Finalement, s'installe un *apprentissage* des codes de représentation personnels employés par le concepteur qui permet de mieux comprendre les esquisses. Ainsi, lors de notre expérience en Magicien d'Oz, un sujet a notamment commencé à employer des couleurs pour situer les différentes natures de locaux, ce que les lutins modélisateurs ont vite compris et les ont ensuite utilisées pour mieux comprendre l'évolution du projet. Cet apprentissage tient autant de l'appropriation des codes de dessins personnels (couleurs, symboles, abréviations, etc.) que des méthodologies de conception (plan par plan en progressant dans le détail, allers-retours entre plans et coupe, test de différentes versions peu détaillées, etc).

Au-delà de toutes ces informations permettant de déduire le sens des traits, le point essentiel de la compréhension des esquisses architecturales réside dans leur *évolution dynamique*. Comprendre une esquisse tirée de son contexte et figée à un instant t donné peut s'avérer extrêmement compliqué. La temporalité d'apparition des traits et la connaissance du projet construite au fur et à mesure de ses représentations est une clef cruciale de la compréhension dans l'activité d'interprétation d'esquisses architecturales. La *mémoire* est donc essentielle pour rendre ce phénomène possible.

9.2.6 Comment formaliser ces informations en un modèle manipulable qui nourrisse l'activité du concepteur ?

En partant de l'hypothèse que notre proposition d'instrumentation logicielle serait développée et implémentée, évaluons la **manière de retourner les informations collectées et les modèles générés au concepteur**. Est-il préférable de produire les modèles en arrière-plan, sans que les concepteurs n'en soient conscients, ou serait-il plus bénéfique pour l'activité de conception de leur y donner accès ? Dans notre expérimentation du Magicien d'Oz, nous avons pris le parti de renvoyer aux concepteurs les visuels de la modélisation numérique de leurs esquisses, accompagnés d'images d'inspirations. Trois grandes classes de réaction (*patterns*) ont été mises en évidence : l'absence d'usage, le dialogue avec la machine et l'impact sur la conception. Les patterns de la première classe ne constituent pas une plus-value de l'instrumentation testée mais montrent qu'elle n'est pas conditionnante, les sujets choisissant d'utiliser ou non les ressources offertes. Ce dialogue de la deuxième classe est favorisé par le protocole expérimental et tend à disparaître avec l'usage répété dans les pratiques comme le prédit Defays (*et al.*, 2012). La dernière classe montre que les visuels envoyés constituent des ressources de conception menant à :

- une évaluation du projet : évaluer la réponse aux contraintes, valider les idées proposées, prendre du recul en s'en servant comme bilan de la conception (tant en termes d'avancement que de satisfaction) ;
- une modification projet : détecter des erreurs, s'inspirer dans la concrétisation d'une idée ou dans la génération de nouvelles solutions ;
- une modification de la conception : changer de phase, d'intention de conception, de structuration du problème, etc.

Il n'y a pas de logique de temporalité d'usage des visuels fournis, mais plutôt des activités déclenchant leur consultation. Consultés une fois sur trois sans intention particulière, ces visuels sont regardés le reste du temps avec un but de recherche d'information, d'inspiration, de prise de recul ou de confirmation d'être bien compris de la machine.

Nous observons finalement trois modes d'interaction avec l'instrumentation proposée. Les concepteurs s'en servent d'abord comme un outil intégré de conception tout au long du processus et en lien direct avec les activités. Ils l'utilisent aussi pour ses fonctions d'appui spécifique aux moments charnière du processus. Ils l'exploitent enfin ponctuellement, comme un service de représentation externe supplémentaire.

Ainsi, les représentations renvoyées constituent des ressources d'information, d'évaluation du projet et des tremplins pour la génération de solutions par analogie. Elles permettent également de redécouvrir son propre projet, favorisant la détection d'erreurs, ouvrant à des modifications, ou outillant les moments de bilan, soutenant la prise de recul. Il est donc intéressant de donner accès aux concepteurs à ces modèles.

Les sujets-concepteurs, lors des entretiens, étaient tous convaincus de la plus-value d'une telle instrumentation et soulignaient le potentiel en particulier des images de référence. Ils discutaient également les potentialités de ce type d'assistance pour évaluer leurs idées, voir rapidement si leur concrétisation leur plaisait, s'inspirer, communiquer avec le client ou encore créer des sessions d'idéation efficaces au besoin dans leurs pratiques.

Cette expérience de Magicien d'Oz met en avant le rôle important de l'analogie en conception idéative (notamment dans l'usage observé des images d'inspiration proposées). A la suite de ce résultat, la micro-expérience sur la stimulation de l'analogie montre que, stimulées (en mini Magicien d'Oz) ou non (disponibles sur support papier dès le début), les analogies réalisées par les concepteurs ne structurent pas le processus. Dans les deux cas, les supports d'analogie (papier comme stimuli) sont convoqués au service de la conception, principalement au moment de l'aménagement des espaces. En situation non-stimulée les analogies sont mobilisées, à travers une partie de leurs caractéristiques, comme moteur de décision. Tandis qu'en situation stimulée, les analogies sont mobilisées, à travers l'objet entier, comme inspiration ou illustration lors des discussions de conception entre les acteurs architectes. En outre, nous remarquons que les images d'inspiration génériques sur papier ont été moins employées que des souvenirs de mémoire. Par contre, les images envoyées par stimuli ont plus été employées par les concepteurs que leur mémoire. Celles-ci sont aussi plus souvent soldées par un succès, c'est à dire par une contribution au projet, que celles générées en situation non-stimulée.

9.2.7 Conclusion

Ces éléments de réponse nous permettent de présenter un principe d'instrumentation de la conception exploitant l'esquisse numérique, aux avantages avérés, comme moyen de collecte des informations pour caractériser le projet au fil des activités de conception, pour ensuite les articuler en des représentations variées du projet et, finalement, pour les exploiter dans la stimulation d'idéation par analogies.

Ces réponses mettent en lumière les conversations de conception qui s'établissent entre les acteurs humains et les moyens de conception actants, renforçant et soutenant, sans déterminer pour autant le processus, les activités d'évaluation et de modification du projet conçu. En particulier le rôle clef du stimuli par analogies est ainsi souligné dans la conception préliminaire.

Par ce travail de thèse, nous réactivons les recherches menées sur l'interprétation d'esquisse numérique pour la génération de modèles numériques du bâtiment. Nous nous positionnons dans la suite du développement d'EsQUIsE (Leclercq & Jumches, 2002; Jumches, Leclercq & Azar, 2004), capable d'interpréter un dessin architectural complexe et ambigu, et d'adopter des techniques

d'intelligence artificielle à travers un système multi-agents, lui permettant de classer des croquis en fonction de leur environnement ou contexte temporel, puis de fournir un modèle sémantique déduit des plans dessinés. Nous convoquons sa suite, avec le prototype NEMo (Demaret & Leclercq, 2011, 2012), capable de réaliser une interprétation de croquis robuste en design architectural, générant un modèle sémantique de l'intention du concepteur basé sur l'interprétation automatique de croquis dessinés à la main pour générer la représentation 3D du bâtiment esquissé dès les premières étapes d'un projet. Nous tirons aussi profit du logiciel SketSha (Safin, Delfosse & Leclercq, 2010), un outil de conception collaborative en temps réel permettant le partage de documents et d'annotations graphiques, grâce à une interface très légère et un support d'interaction naturelle par le dessin au stylo, auquel nous couplons notre Interpréteur sous forme de Magicien d'Oz.

A ces recherches existantes sont ajoutées, par ce travail de thèse :

- une description des enjeux auxquels ce type d'assistance peut apporter réponse, ici les ruptures du processus de conception dans le cadre de la dynamique contemporaine BIM ;
- une meilleure connaissance des informations échangées en conception et notamment au travers du sens des traces graphiques ;
- une fonctionnalité de stimulation de l'analogie, exploitant et renforçant l'usage des images de référence tant pour l'idéation que dans l'évaluation des choix de conception ;
- une analyse des conversations de conception établies avec ces types de logiciels d'interprétation d'esquisse ;
- et une stratégie de modélisation automatique du bâtiment en cours de conception avec analyse de l'impact de ce type de logiciel sur les activités des concepteurs.

9.3 Discussion générale

Ce chapitre ouvre la réflexion sur l'impact des objets médiateurs dans la conception et sur la nature BIMable des esquisses architecturales.

Nous avons commencé par discuter dans l'état de l'art le rôle des objets médiateurs dans les activités de conception²⁰. Rappelons que plusieurs auteurs incluent déjà la notion de schème d'usage comme partie intégrante de l'outil et de ses caractéristiques (Rabardel & Beguin, 2000). D'autres vont plus loin en déclarant que les objets sont des acteurs à part entière (Simondon, 1989; Latour, 2006). Nous avons constaté, de manière transversale dans nos observations, que leur rôle n'est pas neutre pour la conception et que leurs caractéristiques intrinsèques impactent les activités. Les détournements de médias observés dans les activités de conception longue, l'usage du média disponible sous la main en conception épisodique ainsi que l'instrumentation de l'idéation, bien que sous forme de Magicien d'Oz, mettent en lumière cette nature d'objet actant. Dans le cadre du Magicien d'Oz, l'outil devient d'ailleurs complètement proactif, suscitant des conversations de conception entre l'humain et la machine. Citons Claeys (2019) qui pointait qu'à l'ère actuelle de l'information, le concepteur est, dans sa pratique, à la fois, « immergé », « externalisé » et « en réseau ». Nous nous positionnons donc ici en déclarant que les objets médiateurs ne sont ni objet, ni acteur, mais sont plutôt des objets actants. Boujut (Eckert & Boujut, 2003; Boujut & Blanco, 2003) prend une position similaire à la nôtre en affirmant que l'objet conçu est fortement influencé par sa représentation, et nous rajouterons par extension, par le type d'objet médiateur conditionnant cette

²⁰ Voir section 3.1.1.1, page 49.

représentation. En effet, les informations portées et véhiculées par ces objets, autant que celles non-contenues, impactent directement la compréhension de la solution proposée et donc les activités de conception. Chaque objet de conception porte un potentiel de solutions multiples, fonction de l'espace possible d'interprétation de la représentation qu'il fournit.

Le second élément de discussion est le caractère BIMable de l'esquisse. L'esquisse architecturale et le BIM ont en commun une fonction de soutien au partage de l'information relative au bâtiment. Cependant, là où la première est floue, ambiguë et évolutive au gré des changements de conception, le second est une caractérisation voulue, exhaustive, rigide, qui impose une cristallisation de la conception. Passer de l'un à l'autre inclut donc une mise au net (dans le sens d'une sélection parmi les solutions représentées et d'une réduction de l'ambiguïté du dessin²¹) et une cristallisation des idées de conception.

Dans ses représentations synthétiques en plans et en coupe (au sens du croquis synthétique, c'est-à-dire l'expression graphique explicite de synthèse, avec une faible incertitude de tracé et des annotations précisant les intentions, destinée à la communication²²) ou dans ses annotations textuelles, l'esquisse peut facilement être transformée en modèle BIM, moyennant des fonctions logicielles de reconnaissance et de modélisation numérique réalisant une transformation automatique, à la manière d'EsQUISE ou de NEMO²³.

Notre expérience en Magicien d'Oz a montré que les esquisses conceptuelles (c'est-à-dire les traces graphiques d'exploration, favorisant l'implicite²⁴) pouvaient également être comprises en vue d'être modélisées. A ce stade d'avancement, elles sont compréhensibles par des modélisateurs humains, mais il est plausible qu'un logiciel puisse les interpréter bientôt. Nous ouvrons d'ailleurs ce point dans les perspectives. Les croquis et annotations non textuelles peuvent par contre être plus difficilement compréhensibles quand ils expriment des informations de haute abstraction ou des idées brièvement explorées. Ils peuvent participer à l'identification d'un contexte qui serait énoncé par un agent IA. Il faudra attendre que les représentations se précisent au fil de l'activité de la conception pour devenir des esquisses conceptuelles ou apparaître dans les croquis synthétiques.

Nous avançons donc que l'esquisse est BIMable. Bien que chaque élément de dessin ne soit pas interprétable en chaque instant pour générer un modèle, l'esquisse comme moyen de représentation et de conception reste, dans son aspect synthétique de communication ou grâce à son côté dynamique, transformable en maquette 3D autogénérée et autocohérente. Pointons tout de même qu'il faut ajouter les images de références aux représentations du projet par esquisses pour rendre accès à l'ensemble des informations existantes et caractérisant le projet.

Cela nous amène à questionner la modélisation et la figuration des informations en conception architecturale. Selon notre perception théorique et les observations menées dans cette thèse, trois grandes familles de représentations de l'information coexistent en architecture :

- les représentations traditionnelles comme les plans, coupes, croquis, maquettes ou annotations réalisés à la main ou via des outils numériques ;
- les modèles sémantiques collectant l'information brute et permettant d'articuler des informations non attachées à de la géométrie ou à des sous-éléments du bâtiment ;

²¹ L'activité de mise au net a été détaillée en section 3.1.2.6, page 60.

²² La notion de croquis synthétique a été définie en section 3.1.2.6, page 60.

²³ Voir point 6.2, page 104.

²⁴ La notion d'esquisse conceptuelle a également été définie en section 3.1.2.6, page 60.

- et les images d'inspirations ou objets matérialisés d'analogie, portant des caractéristiques choisies pour le bâtiment à venir sans constituer des descriptions de celui-ci.

Ces trois formes de représentations sont complémentaires et toutes nécessaires, à notre sens, pour porter l'information bâtiment et architecturale d'un projet en conception.

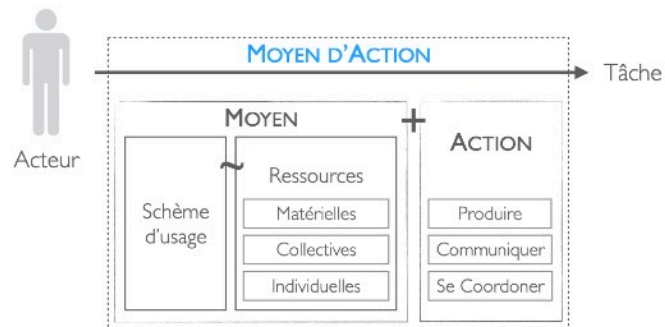
9.4 Discussion éclectique

Nous souhaitons ici discuter certains points plus spécifiques, rencontrés dans nos analyses ou émanant d'échanges avec d'autres chercheurs. Cette section est qualifiée d'éclectique pour traduire le fait que les quelques sujets qui suivent ne sont pas nécessairement reliés.

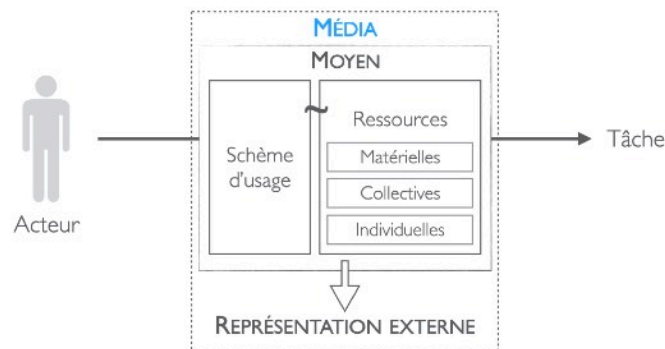
9.4.1 Le moyen de conception

Faisant suite aux différentes théorisations des outils médiant l'activité de conception et aux nombreux termes existants tels qu'instrument, outil, objet médiateur, etc., nous avons proposé, avec la docteure Calixte la notion de *Moyen* de conception (Calixte, Baudoux, Ben Rajeb & Leclercq, 2019a). Celui-ci se définit comme l'ensemble des ressources, qu'elles soient matérielles, méthodologiques ou relatives aux compétences, mobilisées au travers d'un schème d'usage par un acteur pour réaliser sa tâche de conception. Le *Moyen* dépasse donc l'outil et l'instrument pour englober toute action permettant la conception. Il est médiateur dans son rôle mais pas objet dans sa nature.

A la manière de Calixte (2021) qui, dans ses résultats d'étude, mettait en évidence des *Moyens d'action*, associant aux *Moyens* de conception la *typologie d'action réalisée* par ce biais (figure 112-a), nous désignons par *média* l'association du *Moyen* de conception et de la représentation externe produite (figure 112-b).



a - notion de Moyen d'action (Calixte, 2021)



b - notion de Média

Figure 112. Combinaisons de Moyen et de représentation constituant des médias, observées dans la conception.

Nous avons initialement séparé les *Moyens* de conception et les représentations externes lors de nos analyses des informations générées et véhiculées en conception afin de nuancer nos observations. Mais nous avons constaté la prépondérance de certaines combinaisons de *Moyens* et de représentations, c'est-à-dire de certains *médias*, et même l'apparition de combinaisons inattendues, tandis que d'autres combinaisons potentielles n'ont pas été relevées. Nous nous penchons dès lors ici sur ces différentes combinaisons Moyen-Représentation observées (fig. 113).

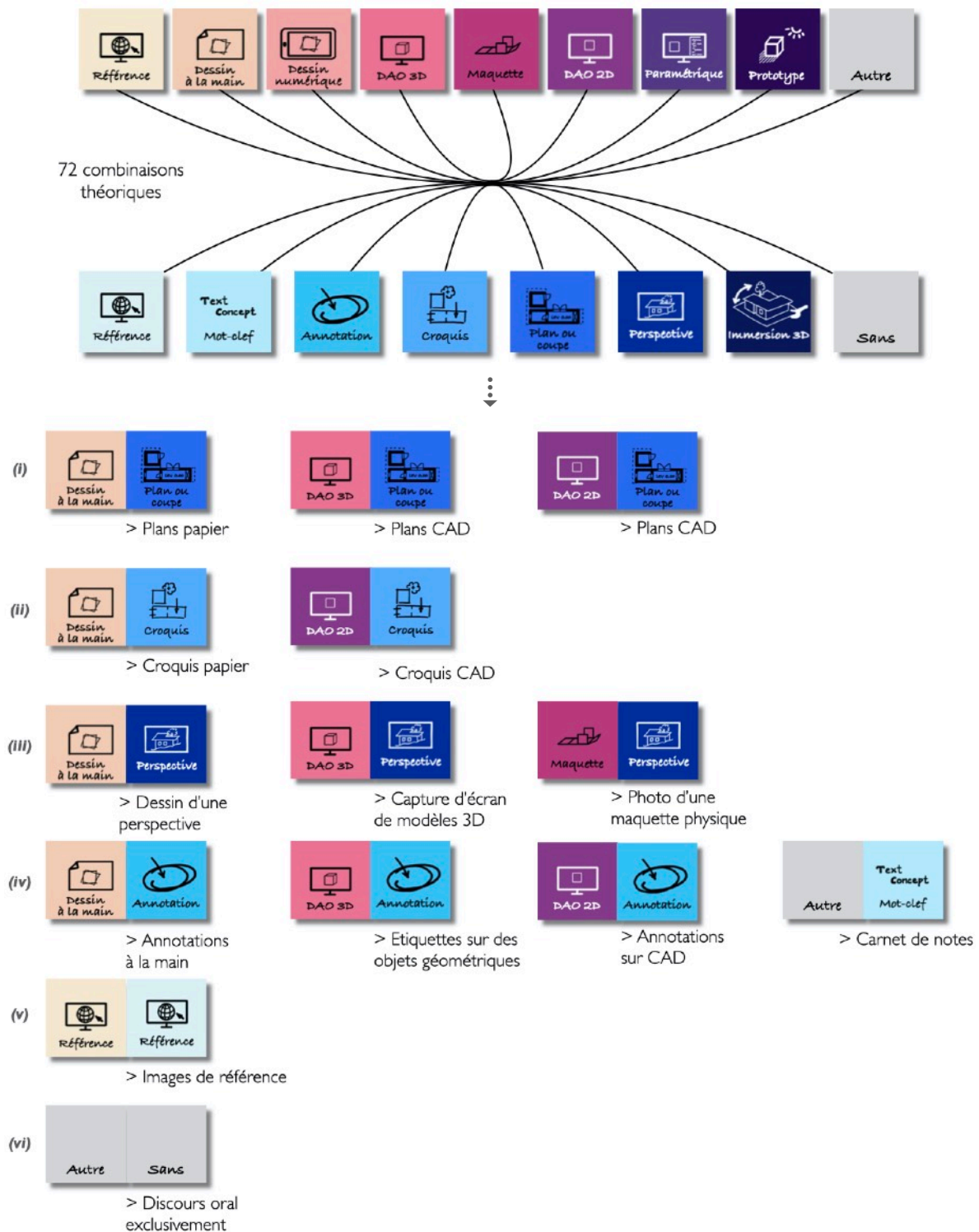


Figure 113. Combinaisons de Moyen et de représentation constituant des médias, observées dans la conception.

Les 9 typologies de Moyen de conception et les 8 types de représentations générables constituent théoriquement 72 combinaisons possibles qui traduisent l'usage significatif de 14 médias de conception, en écartant les usages à occurrence unique.

Face à ces 14 médias, nous serions tentés de les regrouper en familles, par exemple (i) l'usage de plan, (ii) les croquis, (iii) les représentations 3D, (iv) les annotations ou prise de note, (v) les images de référence et (vi) la communication orale exclusive. Mais ce serait alors concéder une place trop importante au formalisme de représentation, en minimisant l'impact du moyen employé sur la conception. Dans l'idée que l'objet n'est pas neutre mais actant, annoter au crayon, sur un logiciel CAD ou au stylo numérique ne peuvent être fusionnés en une tâche d'annotation unique. Nous insistons donc sur toute l'importance de la nuance de ces moyens de conception pour analyser les activités de conception.

9.4.2 La transition conception idéative - production numérique

Notre recherche étudie la proposition d'un principe d'instrumentation visant à fluidifier la transition entre idéation et BIM, au moyen d'une instrumentation de collecte des informations et de génération automatique de modèles du bâtiment. Ce travail est développé pour répondre aux enjeux spécifiques de cette transition des phases amont de conception vers des phases aval BIM, mais ces résultats et le principe d'instrumentation dépassent ce cadre.

Ils peuvent, en effet, s'appliquer à toute articulation entre des activités de génération d'idées et des activités de production numérique, que le processus soit composé linéairement de ces deux séquences ou qu'il soit une activité itérative cyclique entre idéation papier et production numérique. Les limites pointées dans la transition vers le BIM s'appliquent en effet à toute interruption de la génération de solutions pour produire des livrables (souvent numériques). Dès qu'il y a interruption d'activité, changement de médias pour des outils rigides de spécification concrète et détaillée avec une transition réalisée manuellement, cela tombe sous le modèle de transition à fractures multiples que nous avons observé. Et, les plus-values dégagées dans ce travail de thèse s'appliquent de ce fait, quel que soit l'outil numérique de spécification concerné (BIM ou autre). L'aide à l'idéation et l'instauration de conversations avec les représentations externes peuvent enrichir tous les processus de conception, qu'ils incluent le BIM ou non.

9.4.3 La compatibilité collective de l'instrumentation

La question de l'usage collectif d'un dispositif d'esquisse numérique couplé à une génération automatisée d'images d'inspiration, ou de maquettes numériques, a été discutée avec les concepteurs lors des entretiens de fin d'expérimentations du Magicien d'Oz. La conception architecturale étant bien souvent collective, plusieurs sujets-concepteurs ont relevé les potentiels usages collectifs de cette proposition d'instrumentation.

D'une part, le bureau virtuel est conçu pour être utilisé par plusieurs personnes dans le cadre de sessions de conception collective, que ce soit en présentiel ou à distance (Ben Rajeb & Leclercq, 2013). D'autre part, les esquisses dessinées restent interprétables, qu'elles soient réalisées à une ou plusieurs mains. En effet, lors de dessin collectif, les esquisses sont communes et ne constituent pas une juxtaposition de dessins individuels, comme observé sur le terrain de l'atelier IV. De même, ces esquisses sont le résultat d'une validation et non des représentations uniques de propositions

différentes (Calixte, Baudoux & Leclercq, 2021). A l'heure actuelle, la reconnaissance vocale correctement fonctionner avec plusieurs sujets. Les conversations réflexives, jusque là considérées comme un dialogue entre l'humain et la machine, deviendront des conversations de groupe entre les concepteurs et cette machine.

Cette compatibilité avec de potentiels usages collectifs ouvre les perspectives d'une mise en place au sein d'agences et autorise de plus larges usages de cette proposition de système, dont les pratiques actuelles de conception collaborative architecturale.

9.4.4 La plus-value d'un modèle BIM sémantique

Dans notre principe d'instrumentation de la transition, nous mobilisons le modèle sémantique comme support d'accueil des informations, couplé à un modèle numérique. L'expérience en Magicien d'Oz n'a pu tester la mise en place de cette modélisation sémantique faute de capacité de réalisation humaine en un temps suffisamment instantané. Néanmoins, elle est essentielle à une instrumentation de la transition. Ce modèle ajoute une grande plus-value, reconnue par différents chercheurs spécialistes des usages du BIM en conception. Au-delà du domaine du BIM, Boujut et Hisarcikilar (2012, p. 155) montrent que les représentations 3D CAD purement graphiques ne suffisent pas à l'échange entre concepteurs. Bien que les représentations géométriques constituent la base principale des représentations externes, elles doivent, selon ces auteurs, être complétées d'expressions symboliques pour faire figurer le savoir et les informations non géométrisables. Cette proposition de génération automatisée d'un modèle sémantique du projet conçu s'avère faisable techniquement, puisqu'EsQUISE l'opérait déjà en 2001 (Juchmes & Leclercq, 2001) et, plus récemment, Topologic propose de générer un modèle sémantique à partir des modèles numériques d'un bâtiment (Aish *et al.*, 2018).

A contrario, il ne peut suffire à lui seul. Une possibilité d'amélioration des maquettes BIM soulevée en discutant lors de séminaires (Claeys, 2023) est d'ajouter aux maquettes existantes une couche d'informations architecturales, celles manquant jusqu'à présent, dans un modèle sémantique attaché. Mais cet ajout ne résout que partiellement les fractures constatées dans nos observations lors de la transition idéation-BIM. En effet, la fracture observée de perte d'informations sera résolue mais les autres fractures d'interruption des activités de génération d'idées, de changement imposé de média et de re-modélisation manuelle des premières maquettes pour les rendre exploitables, ne sont pas solutionnées par ce seul ajout d'un modèle sémantique du bâtiment relié à la maquette BIM.

Nous terminons cette thèse par ouvrir la discussion sur différents points émergeant de nos résultats et de nos échanges avec les chercheurs de la communauté :

- Les objets médiateurs sont bien, à notre sens, des objets actants. Ils ne sont ni tout à fait objets, ni tout à fait acteurs, mais, en étant porteurs d'usages, ils ont indéniablement une influence sur le processus de conception et sur les activités menées. Dans ce sens, la notion de Moyen, intégrant l'action dirigée par l'outil, est précieuse.
- L'esquisse est BIMable. Certains types de représentations le sont plus facilement que d'autres. Celles-ci feront l'objet de reconnaissance de croquis pour être intégrées. Seules les images de référence sont difficilement intégrables au BIM.
- La figuration des informations mobilise en fin de compte trois grands canaux qui coexistent : les représentations traditionnelles du bâtiment, les modèles sémantiques et les images de référence. Il serait d'ailleurs intéressant d'ajouter un modèle sémantique au BIM, accueillant toute l'information architecturale moins tangible.
- La transition étudiée ici prenait place entre l'idéation et le BIM mais la qualification de cette transition et la pertinence de l'assistance proposée peut s'étendre à toute transition entre des activités d'idéation et des activités de production numérique. L'instrumentation proposée au travers du Magicien d'Oz peut d'ailleurs également être compatible avec des activités collectives de conception.

We conclude this thesis by opening the discussion on various points emerging from our results and from our exchanges with researchers in the community.

- In our view, mediating objects are indeed acting objects. They are neither entirely objects, nor entirely actors, but, as carriers of uses, they undeniably have an influence on the design process and on the activities carried out. In this sense, the notion of Mean of design, integrating the action directed by the tool, is valuable.*
- Sketches are BIMable. Certain types of representation are more easily BIMable than others, which will require sketch recognition in order to be integrated. Only reference images are difficult to integrate into BIM.*
- In the final analysis, there are three main coexisting channels for representing information: traditional representations of the building, semantic models, and reference images. As a note, it would be interesting to add a semantic model to BIM, to accommodate all the architectural information.*
- The transition studied here took place between ideation and BIM, but the qualification of this transition and the relevance of the proposed assistance can be extended to any transition between ideation activities and digital production activities. The instrumentation proposed through the Wizard of Oz can also be compatible with collective design activities.*

Chapitre 10

Conclusion

Finalement, ce chapitre de conclusion résume l'ensemble des contributions de cette recherche à la connaissance des phénomènes de conception instrumentée. Elles portent sur les trois grands volets que nous avons étudiés : la transition idéation-BIM, les médias de conception et les conversations réflexives homme-machine.

Ce chapitre pointe également les limites de la recherche menée et ouvre les perspectives d'études futures.

***F**inally, this concluding chapter summarises all the contributions of this research to the knowledge of instrumented design phenomena. This contributions relate to the three main areas we have studied: the ideation-BIM transition, design media and reflexive man-machine conversations.*

This chapter also points out the limits of the research carried out and opens up perspectives for future studies.

10.1 Synthèse

• Problématique

Les modes de conception architecturale actuels présentent peu d'articulation entre leurs multiples acteurs, appelés pourtant à gérer une complexité croissante des projets de construction. Les technologies et processus intégrés du BIM (Building Information Modeling) sont avancés aujourd'hui comme la voie prometteuse pour multiplier les échanges entre acteurs et améliorer la performance des ouvrages bâtis. Si elle apporte incontestablement des bénéfices dans les phases de construction, cette approche numérique du partage d'informations ne se transpose pas aisément dans les phases d'idéation car elle n'est pas en adéquation avec la nature ouverte, floue et itérative des activités de génération des solutions qui y sont menées. En outre, son usage diffère sur le terrain et présente plusieurs limites.

De nombreuses études guident l'usage du BIM mais elles n'abordent pas l'impact des pratiques dans les phases amont, ni la question du basculement entre conception imaginative et conception productive. Nous questionnons donc **comment instrumenter la conception architecturale pour générer, suivre, récolter et articuler l'information du travail d'idéation** en vue de fluidifier cette transition.

Nous découpons cette question en 6 points :

- Quelles sont les limites de la transition actuelle d'information ?
- Par quelle proposition d'instrumentation la fluidifier ?
- Comment évoluent les informations au travers du processus de conception ?
- Quels artefacts sont plus appropriés pour véhiculer quelles informations ?
- Comment collecter l'information en nourrissant l'activité du concepteur ?
- Comment formaliser ces informations en une représentation manipulable ?

• Transition idéation-BIM

Nous avons étudié in-situ un processus de conception intégrée articulant conception préliminaire puis détaillée et démarche BIM, afin de documenter et modéliser la transition conception-BIM telle qu'actuellement menée dans les pratiques d'aujourd'hui (figure 114-a). Nous avons ensuite élaboré un principe alternatif de transition, illustré à la figure ci-après. Nous avons proposé de collecter automatiquement, tout au long du processus, les informations utiles à partir des traces graphiques, déjà codifiées, des concepteurs. Ces informations peuvent ensuite être modélisées « automatiquement » dans un modèle sémantique, riche en sens²⁵. Sur base d'une ontologie spécifique, un futur algorithme pourra dès lors interpréter les attributs du projet pour générer automatiquement un Modèle Architectural Numérique qui facilitera l'implémentation des informations du projet à la maquette numérique BIM.

²⁵ Voir élaboration de l'ontologie bâtiment page 113.

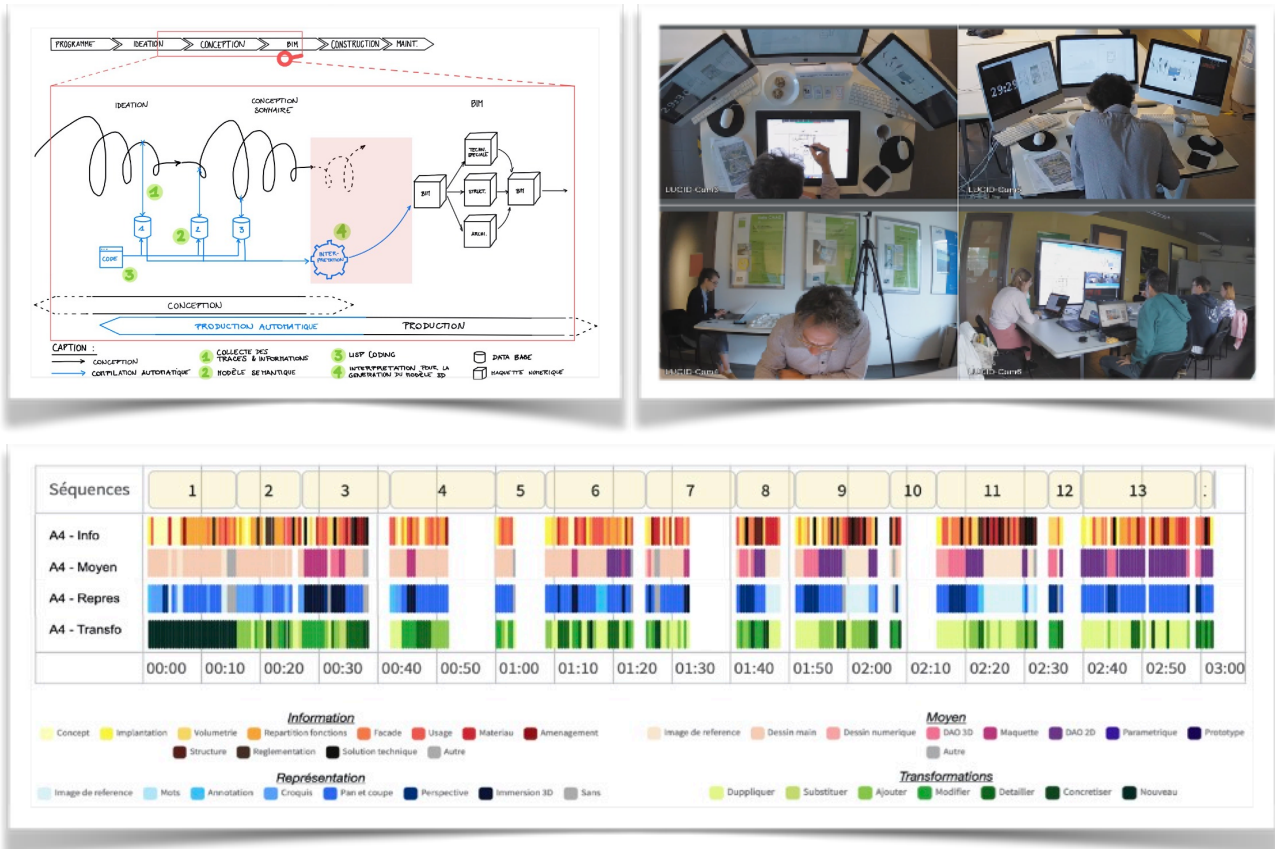


Figure 114. Rappel des différentes études menées : a-Modélisation de la méthode de transition alternative proposée ; b-Dispositif du Magicien d'Oz : le concepteur appuyé par les lutins. ; c-Codage temporel des informations et de l'activité associée.

• **Evolution des informations**

Nous avons par ailleurs mené plusieurs expériences in-situ²⁶ pour caractériser l'information, les moyens de conception (notion dérivée des objets médiateurs), ses représentations et son évolution, coeur de cette problématique (figure 114-c). Nous distinguons deux natures de conception dans les processus : la *conception de longue durée*, étalée sur plusieurs lieux, moments et outils, caractérisée par une alternance d'activités individuelles et collectives; et la *conception épisodique*, caractérisée par une activité collaborative synchrone de courte durée.

En *conception de longue durée*, l'analyse des transformations d'informations et des usages de médias les supportant a révélé :

- de nombreux décalages du niveau d'abstraction entre information et média, et, de ce fait, des usages inattendus de média, témoignant ainsi d'un détournement d'usage de ces derniers par les concepteurs. Nous avons mis en évidence la capacité des concepteurs à s'approprier des outils mis à disposition;
- des fluctuations rapides entre les informations successivement abordées ainsi que des usages récurrents de média, notamment l'importance du rôle joué par les images de référence;
- et des changements rapides et répétés de média, traduisant la variété d'usages spécifiques de ces médias et rappelant les enjeux de redécouverte inspirante et de sélection des variantes lors des

²⁶ Observations non-participantes réalisées dans l'Atelier de master ULiège à la fois en conception longue et en conception épisodique.

changements de média.

Pour la *conception épisodique*, l'analyse des transformations d'informations et des usages de médias les supportant a indiqué :

- des activités largement effectuées au moyen de croquis à la main et d'annotations, et dans un second temps complétées de maquettes et de plans de DAO, qu'il faudra donc soutenir par l'instrumentation;
- une conception centrée sur un focus unique et précis, présentant des cheminements cognitifs préférentiels pour passer d'un focus au suivant, qu'il faudra respecter;
- l'importance de la trace graphique en génération comme en évaluation de solutions, favorisée en outre par les outils d'esquisse numérique.

• Instrumentation de la conception

L'expérience majeure de cette thèse a été réalisée en laboratoire pour immerger des concepteurs professionnels en situation de conception instrumentée au moyen de notre proposition (figure 114-b). Nous y avons étudié comment extraire et modéliser les informations conçues en temps réel et comment le concepteur converse avec le dispositif.

L'expérimentation est basée sur un protocole de type Magicien d'Oz immergeant 9 sujets concepteurs experts pendant 1h30 dans un environnement de travail outillé de ce principe de technologie proposé pour fluidifier la transition idéation-BIM en interprétant les esquisses des architectes (ici par plusieurs lutins oeuvrant à distance). Cette pseudo-technologie stimulait également le raisonnement analogique en présentant des images d'inspiration.

Au sein de ces activités de conception instrumentées, nous avons mis en évidence trois classes de patterns de réaction : une absence d'usage, un dialogue avec la machine et un impact sur la conception. Les premiers ne constituent pas une plus-value de l'instrumentation testée mais montrent qu'elle n'est pas conditionnante, les sujets choisissant d'utiliser ou non les ressources offertes. Les seconds sont favorisés par le protocole et tendront à disparaître avec l'usage répété dans les pratiques. Les derniers sont intéressants puisqu'ils montrent que les visuels générés du projet sont des ressources menant à :

- une évaluation du projet : évaluer la réponse aux contraintes, valider les idées proposées, prendre du recul en s'en servant comme information à un bilan de la conception (tant en terme d'avancement que de satisfaction);
- une modification du projet : détecter des erreurs, s'inspirer dans la concrétisation d'une idée ou dans la génération de nouvelles solutions;
- une modification de la conception : changement de phase, d'intention de conception, de structuration du problème, etc.

L'usage de la "technologie" proposée est déclenché une fois sur trois sans intention particulière et, le reste du temps, avec un but de recherche d'information, d'inspiration, de prise de recul ou encore pour s'assurer d'être bien compris du système.

Nous avons également observé trois modes d'interaction avec cette technologie : s'en servir comme un outil intégré de conception tout au long du processus et en lien direct avec les activités, s'en servir pour ses fonctions spécifiques aux moments clefs de charnière du processus, ou s'en servir ponctuellement simplement, comme une représentation externe supplémentaire.

10.2 Contributions

Les apports de cette thèse à la connaissance des phénomènes de conception instrumentée portent sur les trois grands volets que nous avons étudiés : la transition idéation-BIM, les médias de conception et les conversations réflexives homme-machine.

- **Apports méthodologiques**

Du point de vue méthodologique, notre thèse apporte des analyses graphiques originales sous forme de tableau d'occurrence, de caractérisation des informations successivement partagées, ou de classification de comportements ainsi que de variables sous forme de stickers.

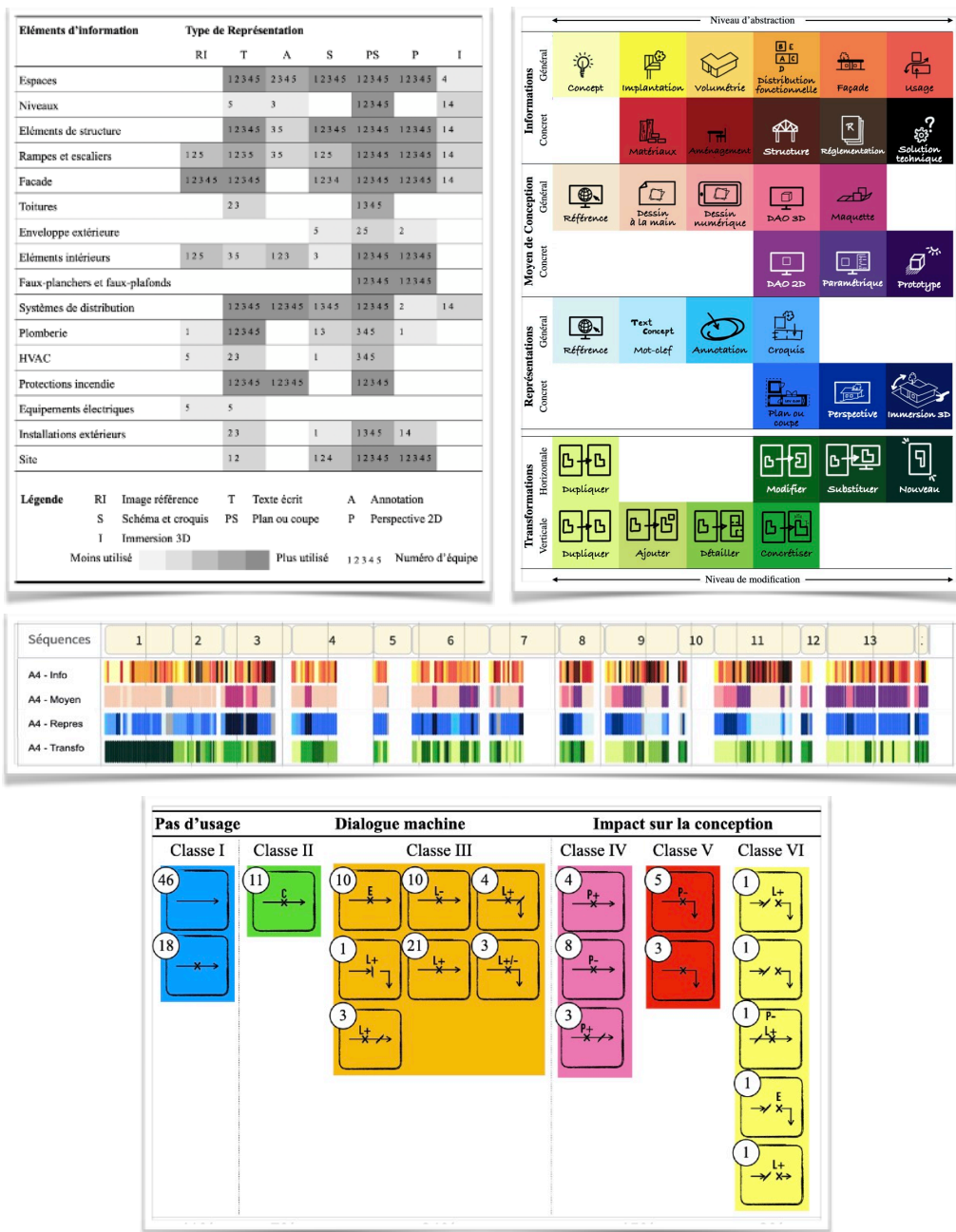


Figure 115. Synthèse des analyses graphiques originales mobilisées dans notre thèse.

• Apports pour la transition idéation-BIM

Le premier apport de cette thèse concerne la transition idéation-BIM. L'explicitation par modélisation théorique de la transition actuelle idéation-BIM passe par la qualification de la transition actuellement observée dans les processus met en évidence, sous la forme d'une modélisation graphique²⁷, des différents pivots de changement et fractures apparaissant dans cette transition.

Le second apport est la proposition d'un principe d'instrumentation de la transition²⁸, mobilisant l'interprétation des documents de conception et la production automatisée de modèles sémantiques et numériques du bâtiment en conception. Ce principe d'alternative à la transition amène à lisser les changements et à éviter les fractures observées dans la transition actuelle tout en permettant aux activités de conception de perdurer en parallèle de celles de production. Nous accompagnons ce principe d'instrumentation de la spécification d'une ontologie bâtiment instanciée pour accueillir l'information architecturale et constructive caractérisant le projet durant sa conception²⁹.

• Documentation des médias de conception

Les apports de cette recherche résident également dans l'élaboration d'une méthodologie de caractérisation des informations bâtiment et de leur évolution. Pour construire cet outillage méthodologique³⁰, nous avons identifié 5 variables permettant de caractériser cette information de conception : type d'information, moyen de conception, représentation externe, transformation du projet et présence de trace graphique. Parmi ces variables, nous avons introduit (avec la docteure Calixte) la notion de *Moyen de conception*. Nous avons également développé une classification bottom-up des informations caractérisant le bâtiment en cours de conception et complété la classification des transformations de représentation de Visser en y ajoutant une classe supplémentaire : « nouveau ». Nous avons finalement proposé une modélisation en triple lecture de cette activité de conception : cette modélisation³¹ fait figurer en lecture horizontale l'évolution des différentes variables, en lecture verticale leurs associations et en intensité de teinte une sixième variable, ici leur niveau d'abstraction.

En outre, nous avons documenté les associations entre informations bâtiment et médias de conception, mettant ainsi en évidence des activités de détournement et d'appropriation des médias ainsi que l'existence d'un choix spécifique par usage désiré ou par économie cognitive du média employé³².

²⁷ Voir section 6.1.2, page 101.

²⁸ Détaillé en section 6.2.2, page 108.

²⁹ Elle a été décrite en section 6.2.2.3, page 110.

³⁰ L'outillage a été décrit en section 7.2.1, page 125.

³¹ Voir section 7.2.3, page 132.

³² Observés pour rappel en section 7.2.4, page 134.

Nous avons également défini deux natures d'activités typiques de conception : la *conception de longue durée*, étalée sur plusieurs lieux, moments et outils, caractérisée par une alternance d'activités individuelles et collectives ; et la *conception épisodique*, caractérisée par une activité collaborative synchrone de courte durée.

En conception de longue durée, nous avons mis en évidence trois usages inattendus de médias pour générer et véhiculer des informations spécifiques³³ : (1) l'emploi de perspectives issues de modèles 3D pour supporter des informations relatives aux flux dans bâtiment ; (2) l'emploi de plans de DAO 2D pour transmettre des caractéristiques liées à la volumétrie du bâtiment ; et (3) l'emploi d'images de référence pour concevoir les solutions techniques nécessaires.

Nous avons également montré que les activités de conception épisodique sont largement effectuées au moyen de croquis à la main et d'annotations, complétées dans un second temps de maquettes et de plans de DAO, avec une conception centrée sur un focus unique et précis, présentant des cheminements cognitifs préférentiels pour passer d'un focus au suivant³⁴.

Nous avons en outre observé l'importance de la conception par image de référence, mobilisant directement le raisonnement analogique, et de la trace graphique.

• **Qualification des conversations réflexives homme-machine**

En articulation avec le principe d'instrumentation de la transition par reconnaissance d'esquisse et production de modèles sémantiques et numériques, nous avons proposé un principe d'assistance à la conception par conversation réflexive multi-instrumentée³⁵.

Ce principe mobilise trois axes de stimulation de l'idéation :

- favoriser le raisonnement analogique, en fournissant des images d'inspiration, pour stimuler la créativité et la génération de solutions ;
- présenter différents points de vue et représentations de l'artefact en conception pour favoriser la redécouverte sous un autre angle et, par là, la détection d'erreurs, l'évaluation des solutions et la génération de solutions plus satisfaisantes ;
- et favoriser la dimension interactive de la conception dans ses itérations perceptives des solutions proposées et des contraintes structurées.

Ce support consiste concrètement à renvoyer au concepteur des représentations externes « automatiquement générées », constituées d'images d'inspiration ainsi que des représentations externes de la proposition (plan au net, modèle 3D et image de projection du rendu réel).

En outre, un protocole de test original³⁶ a été créé et mis en place pour comprendre comment extraire le sens des traces graphiques des architectes et sous quelle forme retourner les modèles générés pour constituer une plus-value au processus de conception, au-delà de la production des livrables, constitue également un apport. Ce protocole original, exploitant la technique du Magicien d'Oz, inclut une mise en place élaborée d'un environnement de travail instrumenté par ce principe ainsi qu'une combinaison de moyens de collecte de données permettant de documenter (1) les activités nécessaires pour interpréter les esquisses architecturales et produire les modèles, ainsi que (2) les activités de conception et les interactions homme-machine des sujets concepteurs architectes.

³³ Voir section 7.2.5.1, page 139.

³⁴ Détaillé en section 7.3.3, page 147;

³⁵ Détaillé en section 8.1.1, page 156.

³⁶ Détaillé en section 8.1.4, page 160.

• **Patterns de comportement d'usages de l'instrumentation**

Finalement, nous avons proposé une caractérisation originale des patterns de comportement d'usages de l'instrumentation proposée observés, sous forme de stickers, selon un codage graphique traduisant les différents comportements observés³⁷. Sur base de cette caractérisation, nous avons défini 6 classes de patterns répartis en trois familles de comportement³⁸ : sans usage, dialogue avec la machine et impact sur la conception. Notre recherche met en évidence trois usages faits de cette instrumentation proposée, ainsi que trois profils d'interaction avec celle-ci : s'en servir comme un outil intégré de conception tout au long du processus et en lien direct avec les activités, s'en servir pour ses fonctions spécifiques aux moments clefs de charnière du processus, ou s'en servir ponctuellement simplement comme une représentation externe supplémentaire³⁹.

10.3 Limites

Tout d'abord, notre recherche n'a pas abordé les processus purement cognitifs de transformation des informations. Nous nous sommes limités à leur étude au travers de leur matérialisation en représentations ou au travers des médias les générant. Nous n'avons pas pisté les perceptions mentales de ces informations. Nous n'avons pas non plus étudié les dynamiques collaboratives ni les activités cognitives collectives entre les concepteurs des équipes étudiées. Dans les terrains de conception collective, nous sommes restés ici focalisés sur l'information elle-même. L'étude du caractère sémiotique des représentations externes a également été laissée de côté pour nous concentrer sur leur rôle dans les activités de conception et sur les informations caractérisant le projet architectural qu'elles portent. Tous ces points étant étudiés par ailleurs⁴⁰, nous les avons écartés du coeur de notre recherche.

Ensuite, les expériences ont été pour partie menées dans des environnements contrôlés en laboratoire. Si ces conditions sont a priori critiquables par ce qu'elles manquent une partie de la complexité des activités réelles, elles sont précieuses pour certains objectifs et donnent accès à une qualité de récolte de données difficilement assurable dans des agences. En effet, nous avons laissé de côté des phénomènes comme les effets de hiérarchie, les compétences sociales ou les interactions collectives, mais ces sacrifices étaient nécessaires pour aller pister, à travers la technique du Magicien d'Oz, la gestion des informations au coeur d'une situation instrumentée d'une technologie encore non-développée. Nous avons dès lors veillé à préserver des conditions écologiques réalistes et nous les avons complétées d'observations des pratiques de terrain.

Par ailleurs, nos observations des moments de synthèse de projet permettent de reconstituer l'évolution des informations en conception de longue durée mais seulement par instantanés. Cela nous donne donc accès à l'évolution par saut des informations mais pas à chacune de leurs

³⁷ Voir figures 79 et 85, respectivement pages 173 et 178.

³⁸ Explicités en section 8.2.2.2, page 178.

³⁹ Voir section 8.2.2.2 et 8.2.3.2, respectivement pages 176 et 185.

⁴⁰ Respectivement par Darses (1992, 2004) et Falzon (2004, 2005) pour les processus cognitifs de transformation, Détienne (2007, 2021) et Ben Rajeb (2012, 2018) pour les activités cognitive collective et Joachim (2016) pour la sémiotique des représentations architecturales.

transformations. En ce sens, elle est donc bien complétée par l'étude des moments de conception épisodique lors de laquelle nous caractérisons l'évolution en direct.

Finalement, la limite principale de toute notre recherche est que nous ne pouvons accéder aux pensées instantanées et aux mécanismes cognitifs précis des concepteurs. Nous pouvons seulement attraper le maximum de données possibles par des observations, des entretiens ou des protocoles de *think aloud*.

10.4 Perspectives

- **Dépasser les limites de notre étude**

La première perspective de cette thèse est de dépasser les limites pointées ci-dessus. Une première perspective serait de boucler la recherche en retournant auprès des concepteurs sur terrain pour discuter avec eux de l'alternative de transition proposée. Mener des focus groupes en agence pour les impliquer enrichirait la recherche sur la transition Idéation-BIM.

Par ailleurs, nous pourrions proposer de réaliser le Magicien d'Oz et plusieurs sessions successives de conception, sur des projets architecturaux réels. Dans l'idée d'une « micro-résidence » de conception sur demande, les architectes professionnels pourraient se rendre au laboratoire pour s'immerger dans le Magicien d'Oz pour une session d'idéation (les sujets-concepteurs de l'expérience ayant relevé les bénéfices et la productivité de s'immerger dans une activité d'idéation continue d'une demi-journée outillée de cet Interpréteur permettant d'évaluer rapidement la pertinence et le potentiel des idées et de s'ouvrir à d'autres solutions potentielles). En terme de recherche, cette « implémentation » permettrait, d'une part, d'observer les moments critiques du processus global de conception auxquels les concepteurs ressentent et expriment le besoin de revenir à une phase d'idéation et, d'autre part, d'étudier la faisabilité de cette instrumentation sur des projets réels de plus grande envergure.

- **Questionner les enjeux politiques et sociaux du BIM**

Comme certains auteurs l'ont pointé, le BIM est hissé comme un étendard du progrès, sous le discours idéologique d'une innovation technologique collaborative qui permettrait d'organiser toute l'information d'un projet au sein d'une maquette unique et partagée entre les multiples acteurs du bâtiment (Patrascu & Hémond, 2019 ; Bressani *et al.*, 2019). Il conviendrait de mieux comprendre les dynamiques de promotion et d'instauration du BIM pour distinguer les éventuels effets des lobbies des réels avantages du BIM.

Le BIM, une fois implémenté dans les pratiques, transforme en outre ces dernières : de l'organisation de l'agence à l'organisation cognitive de travail collaboratif, en passant par les rôles et tâches nouvelles qu'il fait émerger (Géneau, 2019; De Boissieu, 2020; Calixte, 2021). Cette question est déjà en partie étudiée mais il pourrait être enrichissant de pister la créativité dans ces nouvelles organisations et voir comment elle se répartit entre les profils de rôles au sein des agences.

- **Stimuler l'analogie en conception**

Cette thèse a mis en avant le rôle-clef joué par la proposition, via une instrumentation, de visuels favorisant les analogies. Nous avons identifié le potentiel des conversations réflexives comme ressource au service de l'activité de conception.

Sur base de ce potentiel, s'ouvre la perspective d'outiller concrètement les concepteurs, en développant des outils efficaces, basés sur le raisonnement analogique et proposant des ressources visuelles d'inspiration, ainsi qu'une méthode multicritères pour les aider à générer des solutions vertueuses. Pour ce faire, il faudrait analyser, plus en détails et sur un nombre représentatif de concepteurs, l'impact de l'usage de visuels d'inspiration sur le processus de conception et sur les qualités et performances de l'objet conçu. Il faudrait également étudier les processus de décision et les activités d'évaluation des éléments conçus afin de dégager des critères d'évaluation pertinents et leur juste pondération.

- **Documenter la reconnaissance d'esquisses architecturales**

Par ailleurs, l'expérience en laboratoire selon le protocole de Magicien d'Oz a permis de récolter de nombreuses données et d'ouvrir plusieurs pistes d'analyse.

Les résultats de cette étude du système d'assistance par instrumentation intelligente dépendent des lutins modélisateurs supportant son protocole en Magicien d'Oz. Il serait intéressant d'étudier plus en détail leur façon de travailler : comment les images d'inspiration sont-elles choisies ? Sur base de quelle compréhension ? Comment les esquisses sont-elles interprétables, même lorsque les dessins sont largement ambigus ? Cette interprétation peut sembler subjective et dépendante de chaque modélisateur. Nous projetons donc d'analyser leurs processus et les résultats de leur interprétation. Nous chercherons à documenter la capacité des modélisateurs experts à interpréter l'intention d'un sujet de conception, en plus du contenu explicite des esquisses. En complément, pister les différentes incompréhensions et erreurs des lutins modélisateurs, en plus de leur stratégie d'interprétation et de modélisation, documentera la réflexion sur l'élaboration de Systèmes Multi-Agents destinés à rendre opérationnel ce principe d'instrumentation intelligente. Pour développer cela, il faut réussir à identifier les différents agents à mettre en place, leurs objectifs respectifs et donc les rôles qu'ils ont à remplir à la fois en termes de réaction à l'environnement et en termes de services aux autres agents. Il est à noter que ce type de travail collaboratif entre agents est déjà un niveau élevé de SMA. Pour établir la finalité attendue, nous pouvons intégrer les outputs déjà identifiés dans les activités des lutins modélisateurs et les compléter d'autres, jugés utiles, comme le calcul de bilans thermiques, le contrôle du respect des réglementations, la génération de propositions fonctionnelles ou topologiques alternatives, etc.

Notre thèse apporte les contributions suivantes :

- Qualification de la transition sous sa forme actuellement observée dans les processus et la mise en évidence, sous la forme d'une modélisation graphique, des différents pivots de changement et fractures apparaissant dans cette transition.
- Proposition d'un principe d'instrumentation de la transition, mobilisant l'interprétation des documents de conception et la production automatisée de modèles sémantiques et numériques du bâtiment en conception, amenant à lisser les changements et à éviter les fractures observées tout en permettant aux activités de conception de perdurer en parallèle de celles de production.
- Outillage méthodologique de l'observation de l'évolution des informations en identifiant 5 variables de caractérisation et en modélisant en triple lecture de cette activité de conception avec en lecture horizontale l'évolution des différentes variables, en lecture verticale leurs associations et en intensité de teinte une sixième variable qui est leur niveau d'abstraction.
- Documentation des associations entre information et média, mettant ainsi en évidence des activités de détournement et d'appropriation des médias ainsi que l'existence d'un choix spécifique par usage désiré ou par économie cognitive du média employé.
- Mise en évidence d'activités typiques de *conception longue durée* (avec usages courants et d'autres inattendus de médias, dont l'importance des images de référence) et de *conception épisodique* (avec une conception centrée sur un focus unique et précis, présentant des cheminements cognitifs préférentiels pour passer d'un focus au suivant)
- Proposition d'un principe d'assistance à la conception par conversation réflexive multi-instrumentée mobilisant trois axes de stimulation de l'idéation : le raisonnement analogique, la redécouverte des représentations et l'interaction.
- Elaboration d'un protocole original, incluant une mise en place élaborée d'un environnement de travail instrumenté en Magicien d'Oz, ainsi qu'une combinaison de moyens de collecte de données, permettant de documenter (1) les activités nécessaires pour interpréter les esquisses architecturales et produire les modèles ainsi que (2) les activités de conception et les interactions homme-machine des sujets concepteurs architectes.
- Création d'une modélisation originale des patterns de comportement des sujets observés sous forme de stickers.
- Définition de 6 classes de patterns répartis en trois familles de comportement (sans usage, dialogue avec la machine et impact sur la conception) qui font apparaître trois usages faits de cette instrumentation proposée, ainsi que trois profils d'interaction avec celle-ci.

En perspectives, nous étudierons la stimulation de l'analogie en conception ainsi que les stratégies de reconnaissance des esquisses architecturales.

- Our thesis makes the following contributions:*
- *Qualification of the transition in its form currently observed in the processes and highlighting, in the form of graphic modelling, of the various pivots of change and fractures appearing in this transition.*
 - *Proposal of a transition instrumentation principle, mobilising the interpretation of design documents and the automated production of semantic and digital models of the building under design, leading to the smoothing of changes and the avoidance of the fractures observed, while allowing design activities to continue in parallel with those of production.*
 - *Methodological tools for observing the evolution of information by identifying 5 characterisation variables and by modelling this design activity in a triple reading, with the evolution of the different variables read horizontally, their associations read vertically and a sixth variable, their level of abstraction, read in tint intensity.*
 - *Documentation of the associations between information and media, thus highlighting activities of diversion and appropriation of the media as well as the existence of a specific choice by desired use or by cognitive economy of the media employed.*
 - *Highlighting of typical long-term design activities (with common and other unexpected uses of media, including the importance of reference images) and episodic design (with design centred on a single, precise focus, presenting preferential cognitive pathways for moving from one focus to the next).*
 - *Proposed a principle of design assistance using multi-instrumented reflective conversation, based on three ways of stimulating ideation: analogical reasoning, rediscovery of representations and interaction.*
 - *Development of an original protocol, including an elaborate set-up of an instrumented work environment as a wizard of oz, as well as a combination of data collection methods, making it possible to document (1) the activities required to interpret architectural sketches and produce models, as well as (2) the design activities and man-machine interactions of the architectural design subjects.*
 - *Creation of an original model of the behaviour patterns of the subjects observed in the form of stickers.*
 - *Definition of 6 classes of patterns divided into three families of behaviour (no use, dialogue with the machine and impact on design) which reveal three uses made of this proposed instrumentation, as well as three interaction profiles with it.*

In the future, we will study the stimulation of analogy in design and the strategies for recognising architectural sketches.

Bibliographie

A - B - C - D

- Abdirad, H. (2017). Metric-based BIM implementation assessment: a review of research and practice. *Architectural Engineering and Design Management*, 13(1), 52-78.
- Abualdenien, J., & Borrmann, A. (2019). A meta-model approach for formal specification and consistent management of multi-LOD building models. *Advanced Engineering Informatics*, 40, 135-153.
- Aish, R., Jabi, W., Lannon, S., Wardhana, N., & Chatzivasileiadi, A. (2018). Topologic: tools to explore architectural topology.
- Alevêque, G. (2019). Intelligence et artifice. Le Magicien d'Oz ou la simulation de l'interaction humain-machine. *Techniques & Culture. Revue semestrielle d'anthropologie des techniques*.
- Anastassova, M., Mégard, C., & Burkhardt, J. M. (2007). Prototype evaluation and user-needs analysis in the early design of emerging technologies. In Human-Computer Interaction. Interaction Design and Usability: 12th International Conference, HCI International 2007, Beijing, China, July 22-27, 2007, Proceedings, Part I 12 (pp. 383-392). Springer Berlin Heidelberg.
- Azuma, R.T., (1997). A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 6, no. 4, pp.355-385.
- Baldwin, M. (2019). *The BIM-manager: A practical guide for BIM project management*. Beuth Verlag GmbH.
- Ball, L. J., & Christensen, B. T. (2009). Analogical reasoning and mental simulation in design: Two strategies linked to uncertainty resolution. *Design Studies*, 30, 169-186.
- Ball, L. J., & Christensen, B. T. (2019). Advancing an understanding of design cognition and design metacognition: Progress and prospects. *Design Studies*, 65, 35-59.
- Baudoux, G. (2019). *Analyse des méthodes de travail collaboratif en conception intégrée-Analyse des patterns d'usage des Moyens de conception*. Thèse de master, Université de Liege, Belgique.
- Baudoux, G., Calixte, X., & Leclercq, P. (2019). Analysis of instrumental practices in collaborative design: method of identifying needs, means and their effectiveness. 16th International Conference on Cooperative Design, Visualization, and Engineering, CDVE 2019, Spain, Mallorca.
- Baudoux, G., Calixte, X., & Leclercq, P. (2020). Numérisation de l'idéation : analyse des méthodes de travail collaboratif instrumenté en conception intégrée. *SHS Web of Conferences*, 82, 03002. doi:10.1051/shsconf/20208203002

- Baudoux, G., Calixte, X., & Leclercq, P. (2022). From architectural ideation to BIM: Method of Semantic Formalisation of the Building, 40th international conference on Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe, KULeuven, Belgium.
- Baudoux, G., & Leclercq, P. (2021). Pratiques d'écriture collaborative en conception architecturale : caractérisation de l'information-projet en regard de l'usage des médias, 16ème édition de la conférence internationale Hypertextes et Hypermédias, Produits, outils et méthodes, H2PTM 2021, France, Paris.
- Baudoux, G., & Leclercq, P. (2022a). Usability of BIM in preliminary design: a study of the relevance of the different representations allowed by BIM, 19th international conference on Cooperative Design, Visualization and Engineering, Krakow, Poland.
- Baudoux, G., & Leclercq, P. (2022b). Collaborative design: Evolution of project's information and role of the graphic interactions, 10th International Conference on Design Computing and Cognition, Glasgow, UK.
- Baudoux, G. & Leclercq, P. (2023a). Analyse d'activités de conception intégrée : une méthode de traçabilité de l'information et de la visualisation de son évolution. Conférence internationale Mod'ACT, Paris, France.
- Baudoux, G. & Leclercq, P. (2023b). Interactions de conception avec des technologies intelligentes : le potentiel de stimuler le raisonnement analogique en architecture. Conférence internationale EPIQUE, Paris, France.
- Baudoux, G & Leclercq, P. (2023c). Experimenting with a New Proposal for Digital Design. eCAADe conference, Gratz, Austria.
- Beguin, P. (2004). Conception, développement et monde commun. *Monde, version des mondes et monde commun. Bulletin de Psychologie.*
- Ben Rajeb, S. (2012). Modélisation de la collaboration distante dans les pratiques de conception architecturale - Caractérisation des opérations cognitives en conception collaborative instrumentée, Doctoral dissertation, ENSA Paris-La Vilette, Paris, France.
- Ben Rajeb, S. (2018). Conception collaborative distante instrumentée: Étude architecturologique pour la caractérisation des opérations cognitives. *Interfaces numériques*, 2(3), 509-530.
- Ben Rajeb, S. & Leclercq, P. (2013). Apports des configurations spatiales augmentées aux activités de formation par projet. In C. van de Leemput, C. (Ed), *Activités humaines, technologies et bien être*, Paris, Sciences publishing.
- Ben Rajeb, S., & Leclercq, P. (2015a). Instrumented analysis method for col- laboration activities. Proceedings of the Fifth International Conference on Advanced Collaborative Networks, Systems and Applications, COLLA 2015, San Julian, Malta
- Ben Rajeb, S., & Leclercq, P. (2015b). Co-construction of meaning via a collaborative action research approach. Yuhua Luo éd., In *LNCS, Lecture Notes in Computer Sciences, Cooperative Design, Visualization, and Engineering*, 9320, pp. 205-215.
- Ben Rajeb, S. & Leclercq, P. (2016). Analysis of Collaborative Design through Action Research: Methodology and Tools. In *IARIA Journals, International Journal on Advances in*

Intelligent Systems, vol 9 no 1 & 2, http://www.iariajournals.org/intelligent_systems/, pp.199-212.

- Berthelot, J.-M. (2001). *Epistémologie des sciences sociales*. Presses Universitaires de France.
- Bilda, Z., & Demirkan, H., (2003). An insight on designers' sketching activities in traditional versus digital media. *Design Studies*, 24(1), 27–50.
- BIMForum (2018). 2020 level of development specification guide. <<http://bimforum.org/lod/>> (dernière consultation le 07/06/2021).
- Bobillier Chaumon, M.-E., & Clot, Y. (2016). Clinique de l'usage : les artefacts technologiques comme développement de l'activité. *Activités*, 13.
- Bonnardel, N. (1999). L'évaluation réflexive dans la dynamique de l'activité du concepteur. In J. Perrin (Ed.), *Pilotage et évaluation du processus de conception* (pp. 87-105). Paris: L'harmattan.
- 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*.
- Bonnardel, N. (2009). Activités de conception et créativité: de l'analyse des facteurs cognitifs à l'assistance aux activités de conception créatives. *Le travail humain*, 72(1), 5-22.
- Bonnardel, N., & Sumner, T. (1996). Supporting evaluation in design. *Acta Psychologica*, 91(3), 221-244.
- Borillo, M., Goulette, J.P. (2002). *Cognition et création : Explorations cognitives des processus de conception*. Sprimont : Mardaga.
- Boton, C., Forgues, D. & Halin, G. (2017). Les enjeux liés à l'intégration de l'approche BIM de modélisation des données du bâtiment à l'enseignement universitaire : cas d'une école d'ingénierie. *Revue Internationale des Technologies en Pédagogie Universitaire*, vol. 14, no 2. pp. 5-23.
- Boujut, J.-F., & Blanco, E. (2003). Intermediary objects as a mean to foster co-operation in engineering design. *Journal of Computer Supported Collaborative Work*, 12(2), 205-219.
- Boujut, J. F., & Hisarciklilar, O. (2012). Using a semiotic classification to characterise objects involved in collaborative design. *Journal of Design Research*, 10(3), 155-169.
- Bressani, M., Carpo, M., Martin, R., Picon, A., & Vardouli, T. (2019). L'architecture à l'heure du numérique, des algorithmes au projet. Un débat entre Martin Bressani, Mario Carpo, Reinhold Martin et Theodora Vardouli, mené par Antoine Picon. *Perspective. Actualité en histoire de l'art*, (2), 113-140.
- Briggs, R. O., & Reinig, B. A. (2010). Bounded ideation theory. *Journal of Management Information Systems*, 27(1), 123-144.
- Brown, J. S., Collins, A., & Duguid, P. (1989). Situated cognition and the culture of learning. *Educational Researcher*, 18(1), 32-42.

- Browne, J. T. (2019). Wizard of oz prototyping for machine learning experiences. In *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-6).
- Burkhardt, J.-M., Détienne, F., Hebert, A.-M., Perron, L., Safin, S., & Leclercq, P. (2009). *An approach to assess the quality of collaboration in technology-mediated design situations*. Paper presented at the ECCE 2009 : European Conference on Cognitive Ergonomics.
- Cadix, A. (2009). *Innovation Design*
- Cahour B., Salembier P., Zouinar M. (2016). Analysing lived experience of activity, *Le Travail Humain*, Special Issue ‘Analysing Activity: what endures and what is new? II’, vol.79, n°3.
- Calixte, X. (2021). Les outils dans l'activité collective médiatisée en conception: traçabilité des usages au sein du processus de conception architecturale, Doctoral dissertation, Université de Liège, Liège, Belgium.
- Calixte, X., Baudoux, G., & Leclercq, P. (2021). L'interaction graphique collaborative d'invalidation : analyse de l'écriture graphique au sein des revues de projets architecturaux. In *Information : enjeux et nouveaux défis* (pp. 187-200). ISTE éditions.
- Calixte, X., Baudoux, G., Ben Rajeb, S., & Leclercq, P. (2019a). Analyse des activités complexes de conception médiatisée. *Proceedings of the 15th International Conference H2PTM'19: De l'hypertexte aux humanités numériques*. ISTE Group, 2019, Montbéliard, France.
- Calixte, X., Ben Rajeb, S., Gronier, G. & Leclercq, P. (2019b). Questionnement de la synchronisation de l'information pas les usages logiciels (BIM) en conception architecturale collaborative. *10ème colloque de Psychologie Ergonomique, EPIQUE*, Lyon, France.
- Calixte, X., Cuffi, K., & Leclercq, P. (2022). Mise en place d'un outil pédagogique de documentation du processus de conception architecturale. *SHS Web of Conferences*, 147, 03002. doi:10.1051/shsconf/202214703002
- Calixte, X., & Leclercq, P. (2017). The Interactive Projection Mapping as a Spatial Augmented Reality to Help Collaborative Design: Case Study in Architectural Design, *Proceedings of CDVE 2017 / the 14th International Conference on Cooperative Design, Visualization, and Engineering, Mallorca, Spain, September 17-20, 2017*, Springer, Cham, pp. 143–152. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66805-5_18
- Calixte, X., & Rahhal, A. (2019). Articulation du travail collaboratif dans un contexte pédagogique. Session poster présentée au Séminaire doctoral conjoint - EDT 62, Bruxelles, Belgique.
- Carpo, M. (2013). *AD : The Digital Turn in Architecture 1992-2012*. United Kingdom: John Wiley and Sons Ltd.
- Carpo, M. (2017). *The Second Digital Turn - Design Beyond Intelligence*. Writing Architecture, Mit Press.

- Casakin, H. (1997). The role of analogies and visual displays in architectural design, unpublished doctoral dissertation, Technion, Haifa.
- Casakin, H. & Goldschmidt, G. (1999). Expertise and the use of visual analogy: implications for design education, *Design Studies*, 20, 153–175.
- CEFRIO (2011). Améliorer l'efficacité et la productivité du secteur de la construction grâce aux technologies numériques, publication du CEFRIO, groupe canadien d'experts sur l'appropriation et l'utilisation du numérique (150 universitaires, industriels et gouvernementaux), Québec, Canada.
- Celnik, O., & Lebègue, E. (2014). BIM et maquette numérique pour l'architecture, le bâtiment et la construction (2e édition). Coédition Eyrolles / CSTB.
- CIC (Computer Intergated Construction Research Program). (2010). *BIM Project Execution Planning Guide - Version 2.0*. From The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA: <http://bim.psu.edu/Project/resources/default.aspx>
- Clabaugh, C. and Matarić, M. (2019). Escaping oz: Autonomy in socially assistive robotics. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2, 33-61.
- Claeys, D. (2013). Architecture et complexité: Un modèle systémique du processus de (co) conception qui vise l'architecture. Presses universitaires de Louvain.
- Claeys, D. (2017). De l'interprétation créative du réel au processus bayésien de conception architecturale. *Acta Europeana Systemica*, 7, 65-80.
- Claeys, D. (2019). Trois figures architecturales post 1969: Les concepteurs immergé, externalisé et en réseau. *lieuxdits*, 25-35.
- Claeys, D. (2023). Séminaire de recherche autour du numérique en architecture. Bruxelles, 24 janvier 2023.
- Charef, R., Emmitt, S., Alaka, H., & Fouchal, F. (2019). Building information modelling adoption in the European Union: An overview. *Journal of Building Engineering*, 25, 107-177.
- Charmillot, M., & Dayer, C. (2007). Démarche compréhensive et méthodes qualitatives: clarifications épistémologiques. *Recherches qualitatives*, 3, 126-139.
- Charmillot, M. (2021). Définir une posture de recherche, entre constructivisme et positivisme. *Guide décolonisé et pluriversel de formation à la recherche en sciences sociales et humaines*.
- Chen, X., Kang, S. B., Xu, Y. Q., Dorsey, J., & Shum, H. Y. (2008). Sketching reality: Realistic interpretation of architectural designs. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 27(2), 1-15.
- Chone, P., Colin, C., Delaplace, M., Kenel-Pierre, X. & Thome, N. (2016). Révolution numérique dans le bâtiment: analyse des gains escomptés par la diffusion des outils numériques (BIM et maquette numérique) dans le secteur du bâtiment. Technical Report, ENPC and CSTB.

- Chupin, J.-P. (1998). Le projet analogue, les phases analogiques du projet d'architecture en situation pédagogique. National Library of Canada = Bibliothèque nationale du Canada.
- Conein, B. (2004). Cognition distribuée, groupe social et technologie. *Réseaux*, 124, 53-79.
- Cordeiro, E., Giannini, F. and Monti, M. (2019). A survey of immersive systems for shape manipulation. *Comput. Aided. Des. Appl*, 16, 1146-1157.
- Creswell, J. W., & Plano Clarck, V. L. (2006). Understanding mixed methods research. *Designing and conducting mixed methods research*, 1-19.
- Cross, N. (2011). *Design thinking*. Oxford, Berg.
- Cuadra, A., Goedicke, D. & Zamfirescu-Pereira, J. D. (2021). Democratizing Design and Fabrication Using Speech: Exploring co-design with a voice assistant. In Proceedings of the 3rd Conference on Conversational User Interfaces (pp. 1-8).
- Dahlbäck, N., Jönsson, A. & Ahrenberg, L. (1993). Wizard of Oz studies—why and how. *Knowledge-based systems*, 6(4), 258-266.
- Darses, F. (1992). Mécanismes cognitifs de gestion de contraintes dans la résolution de problèmes de conception. *ERGO-IA '92*, Biarritz, France
- 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. (2009). Résolution collective des problèmes de conception. *Travail humain*, pp. 43-59.
- Darses, F., Détienne, F., & Visser, W. (2001). *Assister la conception: perspectives pour la psychologie cognitive ergonomique*. Paper presented at the ÉPIQUE 2001, Actes des journées d'étude en psychologie ergonomique.
- Darses, F., Détienne, F. & Visser, W. (2004). 33. Les activités de conception et leur assistance. Dans : Pierre Falzon éd., *Ergonomie* (pp. 545-563). Paris cedex 14, France: PUF.
- Darses, F., Falzon, P. (1996). La conception collective : une approche de l'ergonomie cognitive. In G. de Terssac & E. Friedberg (Eds). *Coopération et Conception*. Toulouse : Octarès.
- Dautremont, C., Martin, V., & Jancart, S. (2020). Multidisciplinarité en conception architecturale: retour sur deux décennies en agence. *Actes du Séminaire de Conception Architecturale Numérique*.
- Davis, R. (2002). Sketch understanding in design: Overview of work at the MIT AI lab. In *Sketch Understanding, Papers from the 2002 AAAI Spring Symposium* (pp. 24-31).
- 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. (2020). Super-utilisateurs ou super-spécialistes? Cartographie des catalyseurs de la transformation numérique en agence d'architecture. *Les Cahiers de la Recherche Architecturale urbaine et paysagère*, (9| 10).

- De Boissieu, A., Marques, S., Guerriero, A., Ferries, B., & Kubicki, S. (2016). Maturité et mesure du retour sur investissement d'opérations BIM: BIMetric, une méthode d'évaluation. In *SCAN'16-Mètre et paramètre, mesure et démesure du projet*. Presses universitaires de Nancy, Nancy, France.
- De Bruyne, P., Herman, J., & De Schoutheete, M. (1974). *Dynamique de la recherche en sciences sociales: les pôles de la pratique méthodologique*. Paris, Presses Universitaires de France.
- Defays, A. (2015). *Influence des communications multimodales sur le processus de grounding*. Liège: Thèse de doctorat en Sciences Psychologiques de l'Université de Liège.
- Defays, A., Safin, S., Darses, F., Mayeur, A., Ben Rajeb, S., Lecourtois, C., Guena, F. & Leclercq, P. (2012). Invisible computer for collaborative design: evaluation of a multimodal sketch-based environment. *Work*, 41(Supplement 1), 3494-3503.
- Dehbi, S. & Angade, K. (2019). Du positionnement épistémologique à la méthode de recherche : quelle démarche pour la recherche en science de gestion ? *Revue Economie, Gestion et Société*, 1(20).
- Delgado, J. M. D., Oyedele, L., Demian, P., & Beach, T. (2020). A research agenda for augmented and virtual reality in architecture, engineering and construction. *Advanced Engineering Informatics*, 45, 101122.
- Demaret, J.-N., & Leclercq, P. (2011). An adaptative multi-agent system for architectural sketch interpretations.
- Demaret, J.-N., & Leclercq, P. (2012). Génération automatique d'un modèle de bâtiment à partir d'un croquis. *Actes du 5ème séminaire de Conception Architecturale Numérique*.
- Descola, P. (2010). Cognition, perception and worlding. *Interdisciplinary science reviews*, 35(3-4), 334-340.
- Descola, P. (2013). *Beyond nature and culture*. University of Chicago Press.
- Deshayes, P. (2012). Le secteur du bâtiment face aux enjeux du développement durable : logiques d'innovation et/ou problématiques du changement. *Innovations*, 37, 219-236.
- Détienne, F. (2007). A Multidimensional Framework for Analysing Collaborative Design: Emergence and Balance of Roles. *perspectives*, 18(1), 1-20.
- Détienne, F. (2021). Collaboration. In Brangier, E., & Valléry, G. *Ergonomie: 150 notions clés*. Dunod.
- Détienne, F., Martin, G., & Lavigne, E. (2005). Viewpoints in co-design: a field study in concurrent engineering. *Design Studies*, 26, 215-241.
- Ding, C., & Liu, L. (2016). A survey of sketch based modeling systems. *Frontiers of Computer Science*, 10, 985-999.
- Dorst, K. H., & Cross, N. (2001). Creativity in the design process: Co-evolution of problem-solution. *Design Studies*, 22(5), 425-437. doi:10.1016/S0142-694X(01)00009-6

- Doutriaux, E. (2018). Matérialités instables, Temporalités complexes. Stimulantes schizophrénies numériques. *Les Cahiers de la recherche architecturale urbaine et paysagère*, (3).
- Dubberly, H., Baker, G., Reposar, R., Crane, A., Colman, E., Franus, N., & Yopez, C. (2004). How do you design ? A Compendium of Models.

E - F - G - H

- Eckert, C., & Boujut, J. F. (2003). The role of objects in design co-operation: communication through physical or virtual objects. *Computer Supported Cooperative Work*, 12(2), 145-151.
- Ehrlenspiel, K. (1995). Integrierte Produktentwicklung—Methoden für Prozessorganisation, Produkterstellung und Konstruktion. Hanser, Munich
- Ellis, C., Wainer, J. (1994). *A conceptual model of groupware*. Chapel Hill, NC
- Elsen, C. (2011). *La médiation par les objets en design industriel, perspectives pour l'ingénierie de conception*. PhD Thesis, University of Liège, Belgium
- Elsen, C., Darses, F. & Leclercq, P. (2010). Evolution des pratiques de conception: une approche ergonomique compréhensive des objets médiateurs. *ERGO-IA '10*, Biarritz, France.
- Elsen, C. & Leclercq, P. (2007). Le croquis synthé-numérique. *SCAN '07*, Paris, France.
- Elsen, C. & Leclercq, P. (2008). Sketch power to support collaborative design. CDVE, 5th International Conference on cooperative Design, Visualisation and Engineering. Springer.
- Engeström, Y. (1987). Learning by expanding: an activity theoretical approach to developmental research. Orienta Konsultit Oy, Helsinki.
- Falzon, P. (1997). La construction des connaissances en ergonomie: éléments d'épistémologie. *Actes du XXXIIe Congrès de la SELF*, 641-654.
- Falzon, P. (2004). *Ergonomie*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Falzon, P. (2005). Ergonomie, conception et développement. In : *Conférence introductive, 40ème Congrès de la SELF*, 2005.
- Ferber J. (1995). Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective. Interéditions Collection IIA Informatique Intelligence artificielle, 522 p.
- Freitas, G., Pinho, M. S., Silveira, M. S. and Maurer, F. (2020). A systematic review of rapid prototyping tools for augmented reality. In *2020 22nd Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)* (pp. 199-209). IEEE.
- Frison, A. K., Forster, Y., Wintersberger, P., Geisel, V. and Riener, A. (2020). Where we come from and where we are going: A systematic review of human factors research in driving automation. *Applied Sciences*, 10(24), 8914.

- Gaffney, H., Mansell, W. and Tai, S. (2019). Conversational agents in the treatment of mental health problems: mixed-method systematic review. *JMIR mental health*, 6(10), e14166
- Ganah, A., & Lea, G. (2021). A global analysis of BIM standards across the globe: A critical review. *Journal Of Project Management Practice (JPMP)*, 1(1), 52-60.
- Gaudilliere, N. (2022). Automatiser l'architecture? Savoir-faire et calculabilité dans la pratique des courants computationnels en architecture (1965-2020). Thèse de doctorat, Université de Paris Est, France.
- Gerckens, C. (2021). *L'acceptabilité de la réalité augmentée dans la communication architecturale*. (Unpublished master's thesis). Université de Liège, Liège, Belgique. Retrieved from <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/11463>
- Gero, J. S. (1990). Design prototypes: a knowledge representation schema for design. *AI Magazine*, 11(4), 26–36.
- Gero, J. S., & Kannengiesser, U. (2008). An ontological account of Donald Schön's reflection in designing. *International Journal of Design Sciences and Technologies*, 15(2), 77– 90.
- Gero, J. S., & Milovanovic, J. (2020). A framework for studying design thinking through measuring designers' minds, bodies and brains. *Design Science*, 6.
- Gibson, J. J. (1977). The theory of affordances. In R. Shaw & J. Bransford (Éds.), *Perceiving, acting, and knowing*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 67-83.
- Gibson, J. J. (1979). The ecological approach to visual perception. Boston: Houghton Mifflin. DOI : [10.4324/9781315740218](https://doi.org/10.4324/9781315740218)
- Glaser, B.G., & Strauss, A.L. (1967). *The Discovery of Grounded Theory: Strategies for Qualitative Research*. Chicago, IL : Aldine.
- Goel, V. (1995). *Sketches of Thought*. Cambridge: Bradford MIT Press.
- Goulet, F., & Vinck, D. (2012). L'innovation par retrait. Contribution à une sociologie du détachement. *Revue française de sociologie*, (2), 195-224.
- Goulet, F., & Vinck, D. (Eds.). (2022). *Faire sans, faire avec moins: Les nouveaux horizons de l'innovation*. Presses des Mines via OpenEdition.
- 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.
- Guéneau, J. (2019). Le métier d'architecte et le BIM. Nouvelles répartitions des tâches et des responsabilités dans les métiers de la création. *Techniques & Culture. Revue semestrielle d'anthropologie des techniques*.
- Guillemette, F. (2006). L'approche de la Grounded Theory; pour innover? Recherches qualitatives, 26(1), 32–50. <https://doi.org/10.7202/1085397ar>

- Greeno, J. G. (1997). On claims that answer the wrong questions. *Educational Researcher*, 26(1), 5-17.
- Grégori N., & Fixmer P. (2013). Ce que l'effaçage dit de la trace. In: *Intellectica. Revue de l'Association pour la Recherche Cognitive*, n°59, 2013/1. De la trace à la connaissance à l'ère du Web. pp. 243-265.
- Gregori, N., Fixmer, P., & Brassac, C. (2011). La 'subtilité' du traçage: Effaçage de traces sur un dispositif numérique de conception architecturale.
- Haj Ayed, N., & Dorta, T. (2021). L'agentivité des systèmes immersifs de réalité virtuelle en situation de codesign: étude comparative entre le Hyve-3D et un environnement traditionnel. *Sciences du Design*, (1), 27-41.
- Henning, E., Van Rensburg, W., & Smit, B. (2004). Theoretical frameworks. *Finding your way in qualitative research. Pretoria: Van Schaik Publishers.*
- Hijazi, A., & Omar, H. (2017). Level of detail specifications, standards and file-format challenges in infrastructure projects for BIM level three. *WIT Transactions on The Built Environment*, 169, 143-154.
- Hoc, J.-M. (1996). [Review of *Cognitive systems engineering*, by J. Rasmussen, A. M. Pejtersen, & L. P. Goodstein]. *Le Travail Humain*, 59(3), 299-301. <http://www.jstor.org/stable/40660004>
- Hochscheid, É., & Halin, G. (2018). L'adoption du BIM dans les agences d'architecture en France. *SCAN18 - Immersion et Émersion.*
- Huang, W., & Zheng, H. (2018). Architectural drawings recognition and generation through machine learning. In *Proceedings of the 38th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*, Mexico City, Mexico (pp. 18-20).
- Hutchins, E. (1995). *Cognition in the Wild*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.

I - J - K - L

- Jamagne, P. (1991). Combien Project. Progress report DTP3. ISOM, a software to design dimensioning and functional organization of inner spaces. Rapport LEMA-ULg.
- Joachim, G. (2016). L'apprentissage des conversations de conception architecturale. Analyse exploratoire des pratiques discursives et graphiques médiées par ordinateur, thèse de doctorat en architecture, Université de Liège.
- Joachim, G., Safin, S., & Roosen, M. (2012). Les représentations externes en collaboration créative. Etude d'un cas de réunions de conception architecturale. Séminaire de Conception Architecturale Numérique - SCAN. Nancy: Presses Universitaires de Nancy.
- Juchmes, R., & Leclercq, P. (2001). Le concept d'interface absente en ingénierie de la conception. In *Nîmes-TIC'01 "Is the Man-System relation complex?"*. 127-134.

- Jumches, R., Leclercq, P. & Azar, S. (2004). A Multi-agent system for the interpretation of architecture sketches. In SBM (pp. 53-61).
- Kauffman, J. C. (1996). *L'entretien compréhensif*. Paris : Nathan.
- Kassem, M., & Succar, B. (2017). Macro BIM adoption: Comparative market analysis. *Automation in construction*, 81, 286-299.
- Kensek, K. (2015). Manuel BIM – Théorie et applications (T. Tatin, Trans.). Paris: Eyrolles. (Original work published 2014).
- Kim, J., & Maher, M. L. (2021). Evaluating the Effect of Co-Creative Systems on Design Ideation. In *ICCC* (pp. 440-443).
- Kirsh, D. (2010). Thinking with external representations. *AI & Society*, 25(4), 441-454.
- Knoll, S.W., & Horton, G. (2011). The Impact of Stimuli Characteristics on the Ideation Process: An Evaluation of the Change of Perspective Analogy. In Editor (Eds.): Book The Impact of Stimuli Characteristics on the Ideation Process: An Evaluation of the Change of Perspective Analogy. , edn., pp. 1-10
- Knyazeva, Natalia & Larin, Vladislav. (2019). Modeling of non-standard geometry of energy-efficient building facades. E3S Web of Conferences. 91. 05024. 10.1051/e3sconf/20199105024.
- Lallemand, C., & Gronier, G. (2015). éthodes de design UX: 30 méthodes fondamentales pour concevoir et évaluer les systèmes interactifs. Paris: Eyrolles.
- Latiffi, A., Brahim, J., Mohd, S. & Fathi, M. S. (2015). Building Information Modeling (BIM): Exploring Level of Development (LOD) in Construction Projects. *Applied Mechanics and Materials* 773 (1): 933-937.
- Latour, B. (2006). Changer de société. Refaire de la sociologie, Paris, La Découverte.
- Latour, B., Yaneva, A. (2008). Le point de vue de la théorie de l'acteur-réseau sur l'architecture, dans (R. Geiser), Explorations in Architecture : Teaching, Design, Research, Basel, Boston, Berlin, Birkhauser, p. 80-89.
- Lebahar, J.-C. (1983). *Le dessin d'architecte : simulation graphique et réduction d'incertitude*, Marseille, Parenthèses, 134p.
- Leclercq, P. (1994). Environnement de conception architecturale pré-intégrée. Eléments d'une plateforme d'assistance basée sur une représentation sémantique, doctoral thesis, Faculty of Applied Sciences, LEMA, Liège University, Belgium.
- Leclercq, P. (2005). Le concept d'esquisse augmentée. Paper presented at the *SCAN'05 : Séminaire de Conception Architecturale Numérique*.
- Leclercq, P., & Heylighen, A. (2002). *5,8 Analogies per hour. A designer's view on analogical reasoning*. Paper presented at the AID'02 Artificial intelligence in design.
- Leclercq, P., & Juchmes, R. (2002). The absent interface in design engineering. *AI EDAM*, 16(3), 219-227.

- Leclercq, P., Juchmes, R., & Safin, S. (2014). Du crayon au stylo numérique: influences des IHM à stylo et des interprétations numériques sur l'activité graphique en tâches de conception. *Journal d'Interaction Personne-Système*, 2.
- Le Coguiéc, É. (2012). *Pour une compréhension de la conception architecturale: étude réflexive de la conception du projet MN 12 et de ses références*. PhD Thesis, Université du Québec, Montréal, Canada.
- Lecourtois, C. (2010). Complexité architecturale et assistance informatique, in Durling, D., *et al.* (eds.), *Design and Complexity - DRS International Conference 2010*, 7-9 July, Montreal, Canada.
- Lee, G., & Borrmann, A. (2020). BIM policy and management. *Construction management and economics*, 38(5), 413-419.
- Lee, S., Feng, D., Grimm, C. and Gooch, B. (2008), A Sketch-Based User Interface for Reconstructing Architectural Drawings. *Computer Graphics Forum*, 27: 81-90. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2007.01098.x>
- Lejeune, C. (2019). Manuel d'analyse qualitative. De Boeck Supérieur.
- Le Moigne, J.-L. (1995). Le constructivisme, t. I: Les fondements; t. II: Les épistémologies: Communication et Complexité. ESF, Paris.
- Leont'ev, A. (1974). The Problem of Activity. *Psychology Soviet Psychology*, 4-30.
- Leont'ev, A. (1981). The problem of activity in psychology. *Leontiev A. N. The problem of activity in psychology. The concept of activity in Soviet psychology /*.
- Leplat, J. (1997). Regards sur l'activité en situation de travail. Paris: Presses universitaires de France.
- Levan, S. K. (2016) Management et collaboration BIM. Collection Blanche BTP.
- Li, P., Zheng, S., Si, H., & Xu, K. (2019). Critical challenges for BIM adoption in small and medium-sized enterprises: evidence from China. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1-14.
- Liao, HT., Chang, TW. & LAI, IC. (2010). Storytelling: computational approach for convergent thinking.
- LIST, Luxembourg Institute of Science & Technologie (2015). Récupéré sur la méthode BIMetric : <http://bimetric.list.lu/> (dernière consultation le 03/11/2022)
- Liu, F., Deng, X., Lai, Y. K., Liu, Y. J., Ma, C., & Wang, H. (2019). Sketchgan: Joint sketch completion and recognition with generative adversarial network. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 5830-5839).
- Lubart, T. I., Mouchiroud, C., Tordjman, S., & Zenasni, F. (2003). *Psychologie de la créativité*. Paris : Armand Colin.

M - N - O - P - Q

- McCall, R., Vlahos, E., & Zabel, J. (2001). *Conceptual design as hypersketching*. Paper presented at the CAAD Futures 2001 : Computer aided architectural design futures 2001.
- Madden, A. D. (2000). A definition of information. In *Aslib Proceedings* (Vol. 52, No. 9, pp. 343-349). MCB UP Ltd.
- Martin, G., Détienne, F., & Lavigne, E. (2001). Analysing viewpoints in design through the argumentation process. *Proceedings of Interact 2001*, Tokyo, Japan.
- Milovanovic, J. (2019). Exploration de la pédagogie du studio de projet d'architecture: Effet de l'écosystème de représentations du projet sur la situation de la session critique (Doctoral dissertation, École centrale de Nantes).
- Naville, C., & Ben Rajeb, S. (2016). La recherche action collaborative: une nouvelle approche pour l'intégration du BIM. *Academic Journal of Civil Engineering*, 34(1), 25-32.
- Nespoli, O. G., Hurst, A., & Gero, J. S. (2021). Exploring tutor-student interactions in a novel virtual design studio. *Design Studies*, 75, 101019.
- Noghabaei, M., Heydarian, A., Balali, V., & Han, K. (2020). Trend Analysis on Adoption of Virtual and Augmented Reality in the Architecture, Engineering, and Construction Industry. *Data*, 5(1), 26.
- Notowidigdo, M. J. (2004). *User-directed sketch interpretation* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- Norouzi, M., Chàfer, M., Cabeza, L. F., Jiménez, L., & Boer, D. (2021). Circular economy in the building and construction sector: A scientific evolution analysis. *Journal of Building Engineering*, 44, 102704.
- NSCSC, Nova Scotia Construction Sector Council, Industrial Commercial Institutional (2010). Functional Information Technology Phase 1: Detailed Analysis, préparé par le Construction Engineering and Management Group de l'Université du Nouveau Brunswick
- Pahl, G., Badke-Schaub, P., & Frankenberger, E. (1999). Resume of 12 years interdisciplinary empirical studies of engineering design in Germany. *Design Studies*, 20, 481-494.
- Paillé, P. (1994). L'analyse par théorisation ancrée. *Cahiers de recherche sociologique*, (23), 147-181. <https://doi.org/10.7202/1002253ar>
- Pannetier, M. (2020). Travail de Fin d'Etudes : Construction d'une aide à l'expression de la demande du candidat bâtisseur et à sa prise en compte dans la conception architecturale. (Unpublished master's thesis). Université de Liège, Liège, Belgique. Retrieved from <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/10721>
- Patrascu, M., & Hémont, F. (2019). Propagation du collaboratif comme idéologie: le cas du processus d'institution du BIM. *Communication et organisation*, 71-90.
- Pedrinis, F. Représentations et Dynamique de la Ville Virtuelle. (Representations and Dynamics of the Virtual City). Ph.D. Thesis, Lumière University Lyon 2, Lyon, France, 2017.

- Pereira, M. A. (1999). My Reflective Practice as Research. *Teaching in Higher Education*, 4(3), 339–354. <https://doi.org/10.1080/1356251990040303>
- Perisic, M. M., Martinec, T., Storga, M., & Gero, J. S. (2019). A computational study of the effect of experience on problem/solution space exploration in teams. In *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design* (Vol. 1, No. 1, pp. 11-20). Cambridge University Press.
- Picon, A. (2010). *Culture numérique et architecture: une introduction* (p. 224). Editions Birkhäuser.
- Poirier, E. A., Frénette, S., Carignan, V., Paris, H., & Forgues, D., (2018). Accroître la performance de la filière québécoise de la construction par le virage numérique: Étude sur le déploiement des outils et des pratiques de la modélisation des données du bâtiment au Québec [en ligne]. BIM Québec. Disponible à l'adresse : <https://espace2.etsmtl.ca/id/eprint/20928/>
- Poirier, E. A., Staub-French, S., & Forgues, D. (2015). Measuring the impact of BIM on labor productivity in a small specialty contracting enterprise through action-research. *Automation in construction*, 58, 74-84.
- Poirier, E. A., Forgues, D., & Staub-French, S. (2017). Understanding the impact of BIM on collaboration: a Canadian case study. *Building research & information*, 45(6), 681-695.
- Queré, L. (1997) La situation toujours négligée ? *Réseaux*, 85. Paris : CNET.
- Queré, L. (2015). *Retour sur l'agentivité des objets*. In *Exposé à la Journée d'étude du groupe Sciences et Technologies de l'IMM* (9 mars 2015). Institut Marcel Mauss - CEMS, Paris.

R - S - T - U

- Rabardel, P. (1995). Les hommes et les technologies; approche cognitive des instruments contemporains. Armand colin.
- Rabardel P., Beguin P. (2000). Concevoir pour les activités instrumentées, *Revue d'Intelligence Artificielle*, vol.14, p. 35-54.
- Rahhal, A., Ben Rajeb, S., & Leclercq, P. (2020). Caractérisation de l'information dans une collaboration BIM.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, (3), 257-266.
- Rasmussen, J. (1985). The role of hierarchical knowledge representation in decision making and system management. *IEEE Trans. Systems Man Cybernet.* SMC-15, 234}243.
- Rasmussen, J. (1990a). A model for the design of computer integrated manufacturing systems: identification of information requirements of decision makers. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 5(1), 5-16.

- Rasmussen, J. (1990b). *Mental models and the control of action in complex environments*. Paper presented at the Selected papers of the 6th Interdisciplinary Workshop on Informatics and Psychology: Mental Models and Human-Computer Interaction 1.
- Rasmussen, J., Pejtersen, A. M. & Goodstein, L. P. (1994). *Cognitive systems engineering*. John Wiley and Sons.
- Reinig, B. A., & Briggs, R. O. (2012, January). Toward Better Solutions: An Analysis of the Ideation Literature in Light of Bounded Ideation Theory. In *2012 45th Hawaii International Conference on System Sciences* (pp. 159-168). IEEE.
- Reis, J., Amorim, M., Melão, N., & Matos, P. (2018). Digital Transformation: A Literature Review and Guidelines for Future Research. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, (745), 411-421.
- Riek, L. D. (2012). Wizard of oz studies in hri: a systematic review and new reporting guidelines. *Journal of Human-Robot Interaction*, 1(1), 119-136.
- Rietz, F., Sutherland, A., Bensch, S., Wermter, S. & Hellström, T. (2021). WoZ4U: An Open-Source Wizard-of-Oz Interface for Easy, Efficient and Robust HRI Experiments. *Frontiers in Robotics and AI*, 8.
- Rogalski, J. (2004). La didactique professionnelle: une alternative aux approches de «cognition située» et «cognitiviste» en psychologie des acquisitions. *Activités*, 1(1-2).
- Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). Facilitators of BIM adoption and implementation. *BIM Handbook; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA*, 323-363.
- Safin, S. (2011). *Processus d'externalisation graphique dans les activités cognitives complexes :le cas de l'esquisse numérique en conception architecturale individuelle et collective*. PhD Thesis, University of Liège, Belgium.
- Safin, S., Delfosse, V. and Leclercq, P. (2010). Mixed-reality prototypes to support early creative design. In E. Dubois, P. Gray and L. Nigay (Eds). *The Engineering of Mixed Reality Systems*, London, Springer.
- Safin, S., Juchmes, R., & Leclercq, P. (2008). Du crayon au stylo numérique: influences des interprétations numériques sur l'activité graphique en tâches de conception. In *Proceedings of the 20th Conference on l'Interaction Homme-Machine* (pp. 191-198).
- 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).
- Safin, S., Maitrallin, M., Fruchard, B., & Lecolinet, E. (2021). Appropriation and memorisation processes of gestural shortcuts on trackpad: Longitudinal study of users' strategies and impact of visuo-semantic aid. In *Actes de la 32e conférence francophone sur l'Interaction Humain-Machine (IHM'20.21)* (pp. 14-1). ACM.
- Scaife, M., & Rogers, Y. (1996). External cognition: How do graphical representations work? *International Journal Of Human-Computer Studies*, 45, 185-213.

- Scaletsky, C. (2003). Rôle des références dans la conception initiale en architecture: Contribution au développement d'un Système Ouvert de Références au Projet d'Architecture—le système «kaléidoscope»– (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL).
- Schelings, C. (2021). Renouveau des approches participatives pour la fabrique de la Smart City. Doctoral thesis, Université de Liège.
- Schön, D. A. (1983). *The reflective practitioner: how professionals think in action*. NY : Basic Books.
- Schön, D. A. (1987). *Educating the reflective practitioner* (Jossey-Bass Publishers). San Fransisco.
- Schön, D. A., Wiggins, G. (1992). Kinds of seeing and their functions in designing. *Design Studies*, 13(2), 135-156.
- 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*.
- Sergeevich, G. A., Aleksandrovich, Z. S., Andreevich, L. R., & Vasilevich, P. S. (2019). The introduction of BIM technologies in construction. *AlfaBuild*, 11(4), 70-81.
- Sezgin, T. M., & Davis, R. (2007). Sketch interpretation using multiscale models of temporal patterns. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 27(1), 28-37.
- Suchman, L. (1987). *Plans and situated actions : the problem of human-machine communication*. Cambridge University Press
- Shin, M. H., Jung, J. H., & Kim, H. Y. (2022). Quantitative and Qualitative Analysis of Applying Building Information Modeling (BIM) for Infrastructure Design Process. *Buildings*, 12(9), 1476.
- Simon, H.A. (1969). *The Science of the Artificial*. Cambridge, MA: MIT Press
- Simondon, G. (1989). *Du mode d'existence des objets techniques*, Paris, Aubier.
- Singapore BIM Guide(2013) http://www.corenet.gov.sg/integrated_submission/bim/bim_guide.html, (dernière consultation 03/01/2019).
- Stahovich, T. F. (1996). *SketchIT: A sketch interpretation tool for conceptual mechanical design*. USA: PhD thesis
- Stals, A. (2019). *Pratiques numériques émergentes en conception architecturale dans les bureaux de petite taille: perceptions et usages de la modélisation paramétrique*. Belgique: Thèse de doctorat en Art de bâtir et Urbanisme de l'université de Liège.
- Star, S. L. (1989). The structure of ill-structured solutions: Boundary objects and heterogeneous distributed problem solving. In *Distributed artificial intelligence* (pp. 37-54). Morgan Kaufmann.
- Staub-French, S. E. (2011). *Building Information Modeling (BIM) 'Best Practices' Project Report*. Récupéré sur bim-civil.sites.olt.ubc.ca/files/2014/06/BIMBestPractices2011.pdf

- Strauss, A.L., & Corbin, J. (1994). Grounded theory methodology: An overview. Dans Denzin, N. K. & Lincoln, Y. S. (Eds.), *Handbook of Qualitative Research* (pp.273-285). Thousand Oaks, CA : Sage.
- Sternberg, R. J. (2006). The nature of creativity. *Creativity research journal*, 18(1), 87-98.
- Succar, B., (2010). Building information modelling maturity matrix. In : *Handbook of research on building information modeling and construction informatics: Concepts and technologies*. IGI Global. pp. 65–103. ISBN 978-1-60566-928-1.
- Svetel, I., Jarić, M., & Budimir, N. (2014). BIM: Promises and reality. *Spatium*, 34-38.
- Tan, T., Chen, K., Xue, F., & Lu, W. (2019). Barriers to Building Information Modeling (BIM) implementation in China's prefabricated construction: An interpretive structural modeling (ISM) approach. *Journal of Cleaner Production*, 219, 949-959.
- Tichkiewitch, S. (2010). Method and Tools for the Effective Knowledge Management in Product Life Cycle. 20th CIRP Design Conference. Nantes, France.
- Thietart, R. A. (1999). Coll., (1999). *Méthodes de recherche en management*, 535.

V - W - X - Y - Z

- Valveny, E., Martí, E. (2000). Deformable Template Matching within a Bayesian Framework for Hand-Written Graphic Symbol Recognition. In: Chhabra, A.K., Dori, D. (eds) *Graphics Recognition Recent Advances*. GREC 1999. Lecture Notes in Computer Science, vol 1941. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-40953-X_16
- Van Berlo, L., Bomhof, F. (2014). Creating the dutch national bim levels of development, in *Computing in Civil and Building Engineering*, pp. 129–136.
- Vicente, K. J., & Rasmussen, J. (1990). The Ecology of Human-Machine Systems II: Mediating 'Direct Perception' in Complex Work Domains. *Ecological Psychology*, 2(3), 207 - 249.
- Vinck, D. & A. Jeantet (1995). Mediating and Commissioning Objects in the Sociotechnical Process of Product Design: A Conceptual Approach. In D. MacLean, P. Saviotti and D. Vinck (eds.): *Management and New Technology: Design, Networks and Strategy*. COST Social Science Series, Bruxelles.
- Visser, W. (1999). Etudes en ergonomie cognitive sur la réutilisation en conception: quelles leçons pour le raisonnement à partir de cas? *Revue d'Intelligence Artificielle, N° spécial "Raisonnement à partir de cas"*, 13, 129-154.
- Visser, W. (2001). *Conception individuelle et collective. Approche de l'ergonomie cognitive*. Le Chesnay, France: INRIA - Institut national de la Recherche en Informatique et Automatique.
- Visser, W. (2006). *The cognitive artifacts of designing*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

- Visser, W. (2009). La conception: de la résolution de problèmes à la construction de représentations. *Le travail humain*, 72(1), 61-78.
- Vygotskij, L. (1978). *Mind and Society*. Cambridge: Harvard University Press.
- Wang, X., Chen, X., & Zha, Z. (2018). Sketchpointnet: A compact network for robust sketch recognition. In *2018 25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)* (pp. 2994-2998). IEEE.
- Ward, T. (2001). Creative Cognition, Conceptual Combination, and the Creative Writing of Stephen R. Donaldson. *American Psychologist*, 56(4).
- Yang, Q., Cranshaw, J., Amershi, S., Iqbal, S. T. & Teevan, J. (2019). Sketching nlp: A case study of exploring the right things to design with language intelligence. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-12).
- Yates, J. (2002). Towards a Theory of Agentive Drift; Or a Particular Fondness for Oranges circa 1597, *Parallax*, 8(1), 47-58.
- Yesilbek, K. T. and Sezgin, M. (2021). On training sketch recognizers for new domains. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 2142-2149).
- Zacklad M., *et al.* (2006). Processus d'annotation dans les documents pour l'action : textualité et médiation de la coopération, In: R. T. Pédaque (Ed.), *La redocumentarisation du monde*, Toulouse : Cepaduès.
- Zhang, J. (1997). The nature of external representations in problem solving. *Cognitive science*, 21(2), 179-217
- Zhang, J., & Norman, D. (1994). Representations in distributed cognitive tasks. *Cognitive science*, 18, 87-122.

Table des figures et tables

Figure 1. Plan du manuscrit de thèse.	18
Figure 2. Articulation des théories et concepts structurants de notre recherche.	21
Figure 3. Modèles du processus de conception (d'après Blessing, 1995, in Elsen, 2011, p. 45).	23
Figure 4. Schématisation comparative des deux approches théoriques décrivant un processus de conception, l'engineering design approach en haut et la cognitive design approche en bas (Calixte, 2021, pp. 26-27).	30
Table 1. Synthèse des deux approches propres au processus de conception (Calixte, 2021, p. 28)	31
Figure 5. Etapes du projet architectural (d'après Safin, 2011, p. 20).	32
Figure 6. Vue globale du processus de conception architecturale.	33
Figure 7. Facteurs impactant l'idéation (notamment d'après Sternberg, 2006 ; Briggs & Reinig, 2010).	34
Figure 8. Diagramme schématisant un raisonnement analogique (basé sur Leclercq & Heylighen, 2002).	36
Figure 9. Documents encadrant le travail et les pratiques dans les projets BIM (basé sur Hochscheid, 2018)	38
Figure 10. Exemple de la progression des LODs pour un mur de façade.	39
Figure 11. Niveaux de maturité des usages BIM (basé sur Succar, 2010)	41
Figure 12. Courbe d'effort du BIM tout au long du cycle de vie du bâtiment, sur base du graphique de MacLeamy (Dautremont et al., 2020).	43
Figure 13. Pyramide de l'activité selon Leplat (1997).	50
Figure 14. Triangle de l'activité médiatisée.	50
Figure 15. Notions d'objet médiateur et d'instrument, basé sur Engeström (1987), Rabardel & Beguin (2000).	51
Figure 16. Schéma illustratif de la multiplicité des outils, représentations produites et moyens.	53
Figure 17. Notions d'objet médiateur, d'instrument, de Moyen, basé respectivement sur Engeström (1987), Rabardel & Beguin (2000) et Calixte, Baudoux, Ben Rajeb & Leclercq (2019a), ainsi que celle de média.	54
Table 2. Synthèse de la classification des médias en 11 typologies de Self (et al., 2009).	55
Figure 18. Exemples d'activités concrètes illustrant chacune des 8 typologies de moyen de conception (Baudoux et al., 2019).	56
Figure 19. Exemples de documents concrets illustrant chacune des 7 typologies de représentation externe (Baudoux et al., 2019).	60
Figure 20. Progression pour un projet fictif entre esquisse conceptuelle, croquis synthétique et plan net.	61
Figure 21. Exemple fictif d'illustration des traces résultant d'une activité de mise au net.	62
Figure 22. Synthèse chronologique des grandes phases d'émergence des outils numériques de conception pointées par Hochscheid (2018) et Picon (2010).	67
Figure 23. Exemples d'autres outils numériques ou méthodologiques de conception développés en laboratoires.	68
Table 3. Synthèse des avantages et inconvénients du dessin à main levée et du dessin assisté par ordinateur (Self, 2009 ; Elsen, 2011 ; Safin, 2011 ; Defays et al., 2012 ; Le Coguiec, 2012).	71
Figure 24. Schéma comparatif des approches symbolique et connexionniste.	73
Figure 25. Schématisation des sous-questions de recherche par thématique.	79
Figure 26. Articulation des différentes expériences menées pour répondre aux sous-questions de recherche.	80

Figure 27. Tableau de comparaison de différentes postures de recherche courantes en Architecture (basé sur Johnson, s.d., s.t.).	85
Figure 28. Schématisation de notre cheminement méthodologique de thèse.	86
Figure 29. Schématisation des modes de raisonnement en recherche (basé sur Thiétart, 1999).	87
Figure 30. Articulation des différents cours composant le processus observé, sur base de (Calixte & Rahhal, 2019).	94
Figure 31. Exemple de livrables communiqués à la fin de la phase d'avant-projet sommaire (Baudoux & Leclercq, 2022a).	95
Table 4. Ensemble des composants BIM attendus (BIMForum, 2018).	96
Table 5. Représentation des différentes informations issues pour chaque type d'éléments attendus (Baudoux & Leclercq, 2022a).	98
Figure 32. Proportion d'usage des différents types de représentation dans les livrables (Baudoux & Leclercq, 2022a).	99
Figure 33. Modélisation de la transition actuelle (Baudoux et al., 2022).	102
Figure 34. Illustration des modèles produits par EsQUISE, à gauche, et NEMo, à droite (site web du LUCID-ULiège).	106
Figure 35. Illustration de l'interface d'EsQUISE (Safin, Leclercq & Decortis, 2007, p.11).	106
Figure 36. Structure procédurale du prototype EsQUISE (Juchmes & Leclercq, 2001, p. 130).	107
Figure 37. Modélisation du principe de transition alternative proposé (Baudoux et al., 2022).	108
Figure 38. Traces graphiques du projet témoin, réalisées par le concepteur de l'expérience zéro discutée au chapitre 8.	110
Figure 39. Classes-mères de composants d'esquisses architecturales (détaillées au départ de Leclercq, 1994).	111
Figure 40. Diagramme NIAM représentant les différents éléments de l'esquisse architecturale (Leclercq, 1994, p. 201).	112
Figure 41. Représentations obtenues durant la transition pour le projet témoin, ici pour le rez-de-chaussée, reprenant le modèle 3D géométrique sommaire, le plan CAD et le modèle sémantique instancié (ici non-exhaustif dans les relations entre instances pour des raisons de compréhension visuelle) (Baudoux et al., 2022).	113
Figure 42. Modèle sémantique instancié, ici avec les éléments architecturaux et d'environnement.	114
Figure 43. Modèle sémantique instancié, additionné des éléments constructifs.	115
Figure 44. Modèle sémantique instancié, additionné des éléments d'équipement.	116
Figure 45. Calendrier du processus de conception intégrée de l'Atelier IV de Master Ir. arch. ULiège.	123
Figure 46. Illustration des deux types de conception et de leur répartition dans le temps (Baudoux & Leclercq, 2023a).	124
Figure 47. Configuration spatiale de l'observation in-situ : à gauche en présentiel, à droite en distantiel.	126
Figure 48. Extrait de grille d'observation d'une réunion de revue de projet (Acteurs 2, revue n°11) d'après (Baudoux & Leclercq, 2021, p.5).	126
Figure 49. Schématisation des classes de transformation de Visser.	130
Figure 50. Classification des typologies d'information, de Moyen, de représentation et de transformation avec la progression du niveau d'abstraction et du niveau de modification (Baudoux & Leclercq, 2021, 2022b, 2023)	131
Figure 51. Caractérisation du processus de conception intégrée (équipe A2) d'après (Baudoux & Leclercq, 2021, p.6).	133
Figure 52. Mise en évidence des décalages d'abstraction entre information et objet médiateur (équipe A2).	134
Figure 53. Extrait de grille d'observation d'une réunion de revue de projet (Acteurs 2, revue n°11, lignes 4 à 6) d'après (Baudoux & Leclercq, 2021, p.5).	134
TRANSITION SEMANTIQUE DE L'IDEATION AU BIM	256

Figure 54. Caractérisation des activités de conception longue dans un processus de conception intégrée (équipe A2). Pourcentage d'occurrence des décalages de niveau d'abstraction sur chaque séquence et en moyenne sur l'ensemble du processus d'après (Baudoux & Leclercq, 2021, p.7)	135
Figure 55. Fluctuation du niveau d'abstraction des informations successives (équipe A2).	136
Figure 56. Fluctuation des moyens et représentations successivement mobilisées (équipe A2).	136
Figure 57. Croisement d'usage des médias et occurrence sur l'entièreté du processus (Baudoux & Leclercq, 2021) - usages récurrents.	137
Figure 58. Croisements d'usage des médias et occurrence sur l'entièreté du processus (Baudoux & Leclercq, 2021) - usages inattendus.	138
Figure 59. Occurrences d'usages surprenants des médias sur chaque séquence.	139
Figure 60. Environnement de revue collective et bureau virtuel avec le logiciel SketSha (Baudoux & Leclercq, 2022b, p. 4).	144
Figure 61. Espace expérimental et point de vue des caméras (Baudoux & Leclercq, 2022b, p. 5).	144
Figure 62. Classification des typologies d'information, de Moyen, et de représentation avec la progression du niveau d'abstraction (Baudoux & Leclercq, 2022b, p. 6)	145
Figure 63. Illustration de la description d'une nouvelle information en conception épisodique.	146
Figure 64. Caractérisation des séquences de conception épisodique observées pour les équipes 2, 3 et 5 (Baudoux & Leclercq, 2022b, p. 8).	147
Figure 65. Illustration des proportions d'usage des différents moyens et représentations pour les 32 premiers épisodes de conception, toute équipe confondue (Baudoux & Leclercq, 2022b, p. 9).	148
Figure 66. Proportion d'usage des différents croisements Information-Moyen et Information-Représentation, tout au long du processus, toute équipe confondue, en conception épisodique (Baudoux & Leclercq, 2022b, p. 10).	149
Figure 67. Proportion d'usage des différents croisements Information-Moyen et Information-Réprésentation, tout au long du processus, toutes équipes confondues, en conception de longue durée.	149
Figure 68. Occurrence de croisement entre les typologies de chaque information énoncée et de sa suivante, toute équipe confondue et sur la totalité des moments de conception épisodique observée (Baudoux & Leclercq, 2022b).	151
Table 6. Pourcentage des informations supportées par la trace graphique (Baudoux & Leclercq, 2022b, p. 13).	152
Figure 69. Usability Lab du LUCID-Ulège (Baudoux & Leclercq, 2023c)	160
Table 7. Caractéristiques de la population de sujets concepteurs étudiée (Baudoux & Leclercq, 2023c).	161
Figure 70. Structure générale de l'expérience (Baudoux & Leclercq, 2023c).	162
Figure 71. Propositions architecturales individuelles des différents sujets concepteurs - esquisses finales d'input.	162
Figure 72. Organisation spatiale et technique de l'expérience - salle de conception (Baudoux & Leclercq, 2023c)	163
Figure 73. Organisation spatiale et technique de l'expérience - salle de modélisation (Baudoux & Leclercq, 2023c)	164
Figure 74. Organisation spatiale et technique de l'expérience - vue globale (Baudoux & Leclercq, 2023c)	165
Figure 75. Feuille de route de l'expérience - préparation du protocole.	166
Figure 76. Schématisation des données injectées et récoltées au travers de cette expérience.	167
Figure 77. Modélisation globale de l'activité de conception instrumentée en Magicien d'Oz, à titre d'exemple pour le sujet 1.	171
Table 8. Codage des variables étudiées.	172
Figure 78. Modélisation détaillée de l'activité de conception instrumentée en Magicien d'Oz, à titre d'exemple pour le sujet 7.	173

Figure 79. Exemple d'un schéma de comportement à la réception des visuels, plus tard appelé pattern, pour le sujet 6 à la minute 10'40.	173
Table 9. Illustration de l'identification d'un comportement caractéristique sur base du codage de l'activité du sujet 6 en minute 10'40	174
Figure 80. Questions de recherche sous-tendant l'analyse des activités de conception instrumentées en Magicien d'Oz.	175
Figure 81. Arbre de mobilisation des représentations générées par l'Interpréteur.	175
Figure 82. Passage de la représentation de l'arbre décisionnel aux schémas de patterns - exemple de non-usage chez le sujet 7.	176
Figure 83. Passage de la représentation de l'arbre décisionnel aux schémas de patterns - exemple de dialogue homme-machine chez le sujet 9.	177
Figure 84. Passage de la représentation de l'arbre décisionnel aux schémas de patterns - exemple d'usage du visuel chez le sujet 6.	177
Figure 85. Classes et occurrences de patterns (l'occurrence est indiquée dans la pastille).	178
Figure 86. Exemple de pattern relatif au dialogue homme-machine, pour le sujet 9 à la minute 41 (à gauche) et avec impact sur le projet conçu, pour le sujet 6 à la minute 51'40 (à droite).	179
Table 10. Répartition des 109 activités déclenchant la consultation des représentations générées.	180
Figure 87. Succession chronologique des patterns apparaissant tout au long des processus de l'ensemble des sujets.	181
Figure 88. Répartition temporelle des patterns analysés .	182
Figure 89. Comparaison des comportements des sujets 6 et 9.	183
Figure 90. Analyses graphiques et quantitatives réalisées ici individuellement pour les images d'inspiration (en violet).	184
Figure 91. Analyses graphiques et quantitatives réalisées ici individuellement pour les images de projection de rendu (en bleu).	185
Figure 92. Session de conception et cartes de mission (Cours d'APC 2022).	189
Figure 93. Extraits d'images d'inspiration fournies aux concepteurs (à gauche, inspirations papier fournies uniquement en démarrant l'expérience – à droite, images générées par le Magicien d'Oz et fournies via écran en temps réel pendant l'expérience).	190
Figure 94. Schéma de l'espace expérimental pour l'étude comparative des stimuli d'analogie.	191
Figure 95. Grille d'observation des analogies émergeant lors des activités de conception.	191
Table 11. Critères de codage des données (extrait du protocole du cours d'Analyse des Processus de Conception Collaborative de l'Université de Liège).	192
Figure 96. Composition des équipes de concepteurs ayant participé.	194
Figure 97. Processus de conception général en situation non stimulée (équipe de contrôle).	195
Figure 98. Zoom sur les activités de conception dans la période la plus chargée en analogies (phase de « dimensionnement »).	196
Figure 99. Processus de conception général en situation stimulée (Magicien d'Oz).	196
Figure 100. Statistiques sur les analogies réalisées en situation stimulée.	197
Figure 101. Zoom sur les activités de conception dans la période la plus chargée en analogies (phase de « conceptualisation »).	197
Figure 102. Comparaison des analogies en situation de conception stimulée ou non-stimulée.	198
Figure 103. Exemple de diagramme causal obtenu en résultat de l'analyse qualitative ancrée des entretiens - ici dans une analyse de l'activité de danser (d'après Lejeune, 2019).	202

Figure 104. Exemple de composant interprété grâce au contexte.	203
Figure 105. Exemple de composant interprété grâce aux codes architecturaux.	203
Figure 106. Exemple de composant interprété grâce aux associations de forme.	204
Figure 107. Exemple de composant interprété grâce à l'échelle.	204
Figure 108. Exemple de composant interprété grâce aux codes couleurs.	204
Figure 109. Exemple de composant interprété grâce à l'apprentissage.	205
Figure 110. Structure procédurale de la stratégie des lutins modélisateurs.	207
Figure 111. Structure procédurale du prototype EsQUIsE (Juchmes & Leclercq, 2001, p. 130).	207
Figure 112. Combinaisons de Moyen et de représentation constituant des médias, observées dans la conception.	219
Figure 113. Combinaisons de Moyen et de représentation constituant des médias, observées dans la conception.	220
Figure 114. Rappel des différentes études menées : a-Modélisation de la méthode de transition alternative proposée ; b- Dispositif du Magicien d'Oz : le concepteur appuyé par les lutins. ; c-Codage temporel des informations et de l'activité associée.	227
Figure 115. Synthèse des analyses graphiques originales mobilisées dans notre thèse.	229

Annexes



https://drive.google.com/drive/folders/1lgPRUjtcLmoDT_1l7I2yrlgI2Ez1rORq?usp=sharing