
La matérialisation en conception architecturale numérique. Intégration d'un continuum conception-fabrication en conception paramétrique

Auteur : Collin, Jacques

Promoteur(s) : Elsen, Catherine

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine

Année académique : 2016-2017

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/2501>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

LA MATÉRIALISATION EN CONCEPTION ARCHITECTURALE NUMÉRIQUE

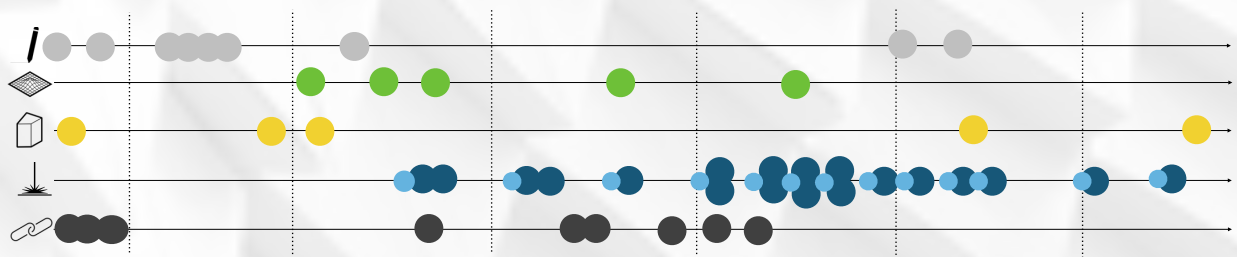
Intégration d'un continuum numérique de la conception à la fabrication en conception paramétrique

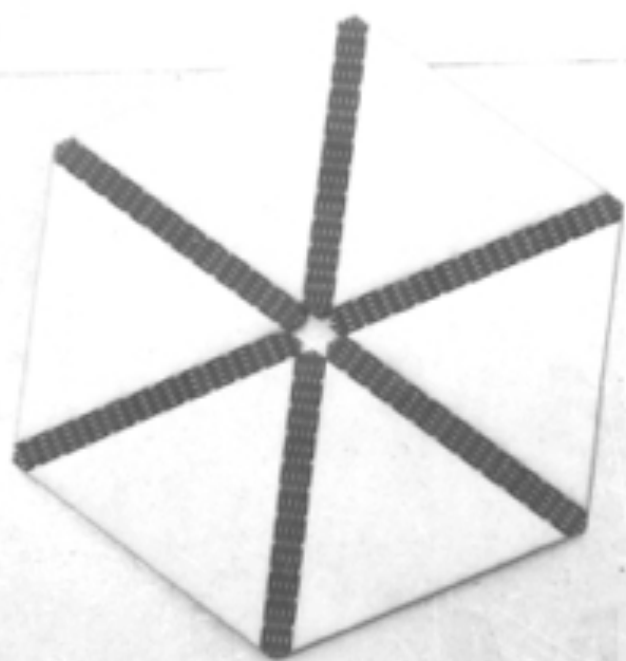
Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de master
Ingénieur Civil-Architecte
par Jacques COLLIN

Promotrice : Catherine Elsen

Jury: Mohamed-Anis Gallas – Sylvie Jancart – Pierre Leclercq

Président du jury: Pierre Leclercq





Lap MONS

RÉSUMÉ

Ce travail a pour objectif d'analyser l'usage de la maquette physique dans un processus de conception architecturale numérique. Il s'inscrit dans un contexte de recherche actuel qui vise à explorer les mutations engendrées par le numérique sur l'activité de conception architecturale.

Plus précisément, il s'intéresse à l'interaction des concepteurs entre les modèles numériques conçus et la manière de les matérialiser. Ce travail de recherche tient compte à la fois de la maquette physique traditionnelle de l'architecte et des nouvelles technologies de fabrication assistées par ordinateur mis à disposition des concepteurs aujourd'hui.

La réflexion porte sur les différentes exploitations des outils de conception et matérialisation dans un contexte numérique ainsi que l'identification des rôles assurés par modèles physiques. La démarche intègre une évaluation du ressenti du concepteur sur sa propre activité.

En pratique, la méthodologie mise en place repose sur l'observation in situ et l'enquête par questionnaire.

L'étude se base d'une part, sur une observation de sept jours réalisée au workshop « Matérialités Numériques » organisé à l'université de Mons en partenariat avec l'université de Liège. S'ajoute à ce premier terrain d'étude, l'analyse du workshop « Conception Fabrication Digitale » organisé à l'école nationale supérieure d'architecture de Nancy.

D'autre part, une enquête par questionnaire auprès des étudiants participants à ces deux workshops a été menée en complément de l'observation in-situ.

Ces deux terrains d'étude permettent ainsi une variété de résultats intéressants.

Les résultats obtenus mettent en évidence différents niveaux d'intégration du numérique dans la matérialisation et mettent en lumière certaines limites à l'intégration des outils de fabrication digitale. Par ailleurs, les résultats démontrent un usage particulier de la maquette physique et re-positionnent l'importance de son rôle dans le contexte numérique actuel.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu, le Docteur Catherine Elsen, promotrice de mon travail de fin d'études pour son suivi régulier, sa disponibilité et ses nombreux conseils judicieux.

Je souhaiterais ensuite remercier le Docteur Mohamed-Anis Gallas de l'Université de Mons et membre de mon jury, pour les opportunités qu'il m'a offertes, pour l'investissement et le temps qu'il a consacrés dans ce travail.

Je tiens également à remercier le Professeur Sylvie Jancart et le Professeur Pierre Leclercq, tous deux professeurs à l'université de Liège et membres de mon jury, pour leurs conseils avisés.

Je remercie Adeline Stals, doctorante à la faculté d'architecture de Liège pour son aide dans la récolte des données et sa disponibilité.

Je remercie aussi le Professeur Frédéric Delvaux de l'Université de Liège ainsi que Romuald Bianchi, informaticien de la faculté d'architecture de Liège, pour leur collaboration lors de l'observation sur le terrain d'étude.

Je tiens à remercier enfin, les 18 étudiants ayant participé au workshop « Matérialités Numériques » à Mons pour leur accueil et leur collaboration ainsi que les 13 étudiants du workshop « Conception Fabrication Digitale » de Nancy ayant accepté de répondre au questionnaire.

TABLE DES MATIÈRES

Table des figures.....	1
Table des tableaux	4
Avant-propos.....	1
Introduction	2
Contexte et enjeux	2
Objet de la recherche	5
Structure du travail.....	5
État de l'art.....	7
1. Les usages du numérique en architecture	7
1.1. Contexte d'apparition de l'informatique en architecture	7
1.2. Les visions du numérique en architecture aujourd'hui.....	8
1.3. La notion de « non-standard »	10
1.4. L'architecture paramétrique, une plus grande maîtrise du non-standard.....	13
2. La fabrication digitale: vers un continuum conception-fabrication?.....	18
2.1. Fabrication Digitale: définitions et notions liées	18
2.2. Les technologies associées à ces deux notions	20
2.3. CAD/CAM: « Design to production ».....	24
3. Le processus de conception en architecture et ingénierie.....	27
3.1. La conception	27
3.2. Les modèles de processus de conception	28
4. La matérialisation en conception.....	32
4.1. Maquette physique et prototype: définitions.....	32
4.2. La maquette architecturale: un outil aux rôles multiples	33
4.3. Les rôles du prototype en design industriel.....	35
4.4. Les typologies de maquettes et prototypes.....	37
5. La matérialisation numérique en conception architecturale	40
5.1. Un retour à la matière	40
5.2. L'amorce d'un continuum conception-fabrication par la méthode DDF (Digital Design Fabrication)	40
5.3. Le prototypage rapide vers une conception plus constructible?	42
6. Résumé	44
7. Question de recherche	45
Méthodologie	47
1. La théorie de l'observation.....	47

1.1. Définitions	47
1.2. L'ethnographie	48
1.3. Pourquoi l'observation?	49
1.3. La méthodologie de l'observation	50
2. L'enquête par questionnaire.....	53
2.1. Définitions et buts	53
2.1. Méthodologie du questionnaire	53
3. Méthode mise en place	55
3.1. La préparation	55
3.2. La réalisation	60
Traitement des données.....	64
1. Traitement des données d'observation	64
1.1. Tri des données	64
1.2. Transcription	65
1.3. Exploitation des données	66
2. Traitement des données du questionnaire.....	67
Résultats	71
1. Présentation des équipes de conception et des projets réalisés.....	71
1.1. Matérialités Numériques _Mons	71
1.2. Conception Fabrication Digitale _Nancy	73
2. La maquette physique: support de la modélisation paramétrique.....	76
2.1. La maquette physique de référence	76
2.1. Le croquis d'aide à la modélisation.....	77
2.3. La simulation numérique, la vérification physique.....	80
3. Un continuum conception-fabrication numérique observé mais limité	83
3.1. Un continuum numérique de matérialisation observé.....	83
3.2. Un dis-continuum observé: cas du groupe M1	86
3.3. Un continuum détourné: cas du groupe M2	88
4. Deux utilisations du prototypage rapide	90
4.1. Un prototypage rapide intégré	90
4.2. Un prototypage rapide non-intégré	92
4.3. Résumé des rôles des prototypes.....	96
5. Du point de vue du concepteur	100
5.1. Identification de l'échantillon sondé	100
5.3. Les concepteurs en phase esquisse	102
5.4. Les concepteurs en phase de modélisation et matérialisation.....	105
5.5. Retour sur l'expérience du concepteur	107
5.6. Innovation et constructibilité	109

Discussion	114
1. Un continuum numérique entre conception et matérialisation peut-il avoir lieu à l'échelle de la maquette?	114
1.1. L'influence du cadre pédagogique sur la recherche.....	114
1.2. Trois niveaux d'intégration du numérique dans la matérialisation	115
2. Quels sont les freins à l'intégration du prototypage rapide dans le continuum numérique conception-fabrication?	117
2.1. La maîtrise de la modélisation paramétrique, la clé du continuum numérique?	117
2.2. La relativité de la notion de « rapidité » dans prototypage rapide	118
2.3. L'échelle, une limite du prototypage rapide?	118
2.4. Le lâcher prise des concepteurs	119
3. La maquette physique joue t-elle un rôle spécifique dans un processus de conception architecturale numérique?	120
3.1. Un nouveau rôle du prototype	120
3.2. Le retour à la matérialité?	123
3.3. Prototypage rapide en architecture source de réussite et d'innovation?	124
4. Limites de la méthodologie	125
4.1. Limites du questionnaire	125
4.2. Limites de l'observation	126
Conclusion	128
Bibliographie	130
Annexes	137

TABLE DES FIGURES

Figure 1: Stade olympique de Pékin (beijingbirdsnest).....	3
Figure 2: Musée Pompidou de Metz (marianne-international.fr).	3
Figure 3: Sketchpad (Sutherland, 1963).....	7
Figure 4: Tomographie d'un tronc d'arbre (Menges, 2017).....	9
Figure 5: Wood Chip Barn. (designandmake.aaschool.ac.uk).	9
Figure 6: Maquette funiculaire de Gaudi (Wendland, 2000).....	10
Figure 7: Maquette « soap skins » (Archidaily, Mars 2015).	10
Figure 8: Maquette d'une coque (Chilton, 2000).....	10
Figure 9: Pont Basento, Italie. (Wikipedia, 2016).....	11
Figure 10: « Spline » ou cerce (Wikipédia).	11
Figure 11: Courbe de Bézier cubique ($P_0, \dots, P_3$) (Wikipédia).....	11
Figure 12: Surface NURBS.	12
Figure 13: Musée Guggenheim à Bilbao par Franck Ghéry (libertaddigital.com, 2017)	12
Figure 14: Terminal du Port international de Yokohama par Foreign Office Architects(archdaily.com).	12
Figure 15: Modélisation paramétrique de la Sagrada Familia de Barcelone sur le logiciel CADD5 (Burry, Burry & Faulí, 2001).	14
Figure 16: Exemple d'un modèle paramétrique réalisé sur Grasshopper.	14
Figure 17: Comparaison d'un script réalisé sous deux logiciels différents(de Boissieu, 2010).	15
Figure 18: « The Unimate » : le premier bras robotisé utilisé dans l'industrie (Kilian, 2017).	19
Figure 19: Découpe au laser au FabLab de Mons (à gauche). Découpe au plasma (Rempen 1999 cité par Kolarevic (2001)).	21
Figure 20: « Carrara Robotics »(Hyperbody)(http://www.robarch2016.org).	21
Figure 21: Préparation d'un assemblage à l'aide d'un fraiseuse actionnée par une bras à 7 axes pour la réalisation d'un pavillon (La Magna & al., 2013) dans RobArch 2013.	22
Figure 22: Trois exemples de technologies existantes en impression 3D (http://3dinsider.com).	22
Figure 23: Projet expérimental MMYST présenté lors du RobArch 2016. (kickstarter.com).....	23
Figure 24: The Deceptive Ease of Folding:The Industrialisation of a Prototypical Product (Ebnother, 2013). ..	23
Figure 25: La pavillon français à l'exposition universelle de Milan. (designtoproduction.com).....	24
Figure 26: Schéma résumé de la section.	26
Figure 27: Les phases de conception selon Pahl et Beitz(1984).	28
Figure 28: Le modèle Shigley (Ward & al. 1995)	29
Figure 29: Modèle du processus de conception proposé par Zeisel (1981)	30
Figure 30: Modèle de processus de conception architecturale selon Conan (1990).....	30
Figure 31: Graphique illustrant un paradoxe en conception (Ullman 2003, p.19).....	31
Figure 32: Modèle du rôle du prototype (Houde & Hill, 1997, p.3)	36
Figure 33: Prototype intégré sur le triangle (Houde & Hill, 1997, p.3).....	36
Figure 34: Variété prototypes produits par les concepteurs (Houde & Hill, 1997, p.3).....	36
Figure 35: 90 prototypes différents explorant les variations de forme (Sass & Oxman, 2006).....	41
Figure 36: Typologies de prototypes réalisés par la méthode DDF (Sass & Oxman, 2006)	42
Figure 37: 5 assemblages réalisés par la méthode DDF (Sass & Oxman, 2006)	43

Figure 38: Modèle de matérialisation par découpe laser (Sass, 2006).....	43
Figure 39: Schéma de situation de la recherche	44
Figure 40: Affiche de présentation du workshop (par M-A. Gallas, 2017).....	55
Figure 41: Planning du workshop.....	56
Figure 43: Etudiants et encadrants du Workshop Matérialités Numériques	56
Figure 42: FabLab de Mons.....	56
Figure 44: La chapelle de Bélian à Mons	57
Figure 45: Arrêt sur image dans une vidéo filmant le groupe M3.....	61
Figure 46: Interface du questionnaire en ligne sur « Google Forms »	62
Figure 47: Exemple de présentation des réponses obtenues par l'échelle de Likert	68
Figure 48: Réponses obtenues à Mons à la question A.....	72
Figure 49: Réponses obtenues à Mons à la question B.....	72
Figure 50: Maquette finale du groupe M1	72
Figure 51: Maquette finale du groupe M2	73
Figure 52: Maquette finale du groupe M3	73
Figure 53: Maquette finale du groupe M4	73
Figure 54: Réponses obtenues à Nancy à la question A.....	74
Figure 55: Réponses obtenues à Nancy à la question B.....	74
Figure 56: Maquette finale du groupe N1.....	75
Figure 57: Maquette finale du groupe N2.....	75
Figure 58: Maquette finale du groupe N3.....	75
Figure 59: Maquette finale du groupe N4.....	75
Figure 60: Evolution du modèle numérique en fonction de la maquette physique	76
Figure 61: Maquette physique initiale réalisée par le groupe M3	77
Figure 62: Photographies illustrant l'utilisation de la maquette de référence en support de la modélisation paramétrique.....	77
Figure 63: Utilisation du croquis en support de la modélisation paramétrique par le groupe M1.	77
Figure 64: Photographies illustrant l'utilisation du croquis en support de la modélisation paramétrique par le groupe M3.	78
Figure 65: Photographies de quelques croquis du groupe M3.	78
Figure 66: Schéma d'analyse du processus de conception du groupe M3	78
Figure 67: Photographies illustrant l'utilisation du croquis en support de la modélisation paramétrique par les équipes de Nancy (de gauche à droite: N1, N2, N3, N4)	79
Figure 68: Application du « plug-in » Kangaroo dans le modèle Grasshopper du groupe M3	80
Figure 69: Photographies illustrant la simulation de la déformation dans Grasshopper par le groupe M1(à gauche) et M3 (à droite)	80
Figure 70: photographie illustrant la vérification physique de la déformation par le groupe M1 (à gauche) et M3 (à droite)	81
Figure 71: Simulation de la déformation maximale dans Grasshopper par le groupe M3.....	81
Figure 72: photographies de la matérialisation des toiles à partir des données de Grasshopper	84
Figure 73: schéma résumé du processus de conception du groupe M3.....	84
Figure 74: schéma résumant l'utilisation des différents outils dans processus de conception du groupe N1 .	85
Figure 75: schéma résumant l'utilisation des différents outils dans processus de conception du groupe N2 .	85
Figure 76: schéma résumant l'utilisation des différents outils dans processus de conception du groupe N3 .	85

Figure 77: schéma résumé de l'utilisation des différents outils dans processus de conception du groupe N486	
Figure 78: Utilisation des outils au cours du processus de conception par le groupe M1	87
Figure 79: Photographie illustrant la décomposition de la toile	87
Figure 80: Schéma récapitulatif du processus de conception du groupe M1.....	87
Figure 81: Photographies des assemblages réalisés par le groupe M2.....	88
Figure 82: Capture d'écran du modèle paramétrique réalisé par le groupe M2	89
Figure 83: Capture d'écran du modèle modèle Sketchup du groupe M2.....	89
Figure 84: Photographie illustrant le modèle 3D de la pièce du mécanisme	89
Figure 85: Photographie des 42 faces imprimées.....	89
Figure 86: Photographie de la maquette finale au 1:10e.....	89
Figure 87: Schéma résumé du processus de conception du groupe M2	89
Figure 88: Ligne du temps représentant le processus de conception du groupe N4.....	91
Figure 89: Algorithme Grasshopper élaboré par le groupe N4 pour intégrer la matérialisation (Groupe N4)	92
Figure 90: Prototype testant l'assemblage en charnière.....	92
Figure 91: schéma d'explication de la technologie par soustraction de matière réalisé par un encadrant	93
Figure 92: A gauche, référence de motifs au format DXF, à droite vidéo youtube utilisant la technologie.....	93
Figure 93: Ligne du temps représentant le processus de conception du groupe M4.....	94
Figure 95: Séquence typique du prototypage rapide dans le groupe M4	95
Figure 96: Préparation de la découpe par le groupe M4sur Autocad	95
Figure 97: Réponses obtenues à Mons et à Nancy aux questions 1 et 2 du questionnaire	102
Figure 98: Réponses obtenues à la question 3/ du questionnaire à Mons et à Nancy	103
Figure 99: Réponses obtenues à la question 4/ du questionnaire à Mons et à Nancy	104
Figure 100: Réponses obtenues à la question 12 du questionnaire à Mons et à Nancy	105
Figure 101 Proportion des réponses fournies à la question 1 du questionnaire par les participants au workshop de Mons	106
Figure 102: Proportion des réponses fournies à la question 13 du questionnaire par les participants au workshop de Nancy.....	106
Figure 103: Réponses obtenues à la question 14 du questionnaire à Mons et à Nancy	106
Figure 104: Réponses obtenues à la question 20 du questionnaire à Mons et à Nancy	108
Figure 105: Graphiques d'évolution du niveau d'innovation selon les participants au workshop de Mons ...	110
Figure 106: Graphique d'évolution du niveau d'innovation selon les participants au workshop de Nancy....	110
Figure 107: Graphiques d'évolution du niveau de constructibilité selon les participants au workshop de Mons	111
Figure 108: Graphiques d'évolution du niveau de constructibilité selon les participants au workshop CFD.	112
Figure 109: schéma d'intégration de niveau 1 du numérique en matérialisation	116
Figure 110: schéma d'intégration de niveau 2 du numérique en matérialisation	116
Figure 111: schéma d'intégration de niveau 3 du numérique en matérialisation	116
Figure 112: Prototypes réalisés en impression 3D	118
Figure 113: photographies de quelques étapes de la matérialisation finale.....	119
Figure 113: Proposition d'un modèle du rôle du prototype en conception architecturale numérique.....	122
Figure 114: Prototypes effectués par le groupe M4 positionnés sur le pyramide des rôles	122

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1: Les étapes importantes du processus de conception. (Mougenot, 2008).	29
Tableau 2: Modèle du processus de conception proposé par Cross (2000).	29
Tableau 3: Modèle du processus de conception architecturale proposé par Prost (1992)	30
Tableau 4: Exemple présentant la méthode pour obtenir un classement global des réponses obtenues.	69
Tableau 5: Réponses obtenues à Mons à la question A dans chaque groupe	72
Tableau 6: Réponses obtenues à Mons à la question B dans chaque groupe	72
Tableau 7: Réponses obtenues à Nancy à la question A dans chaque groupe.....	74
Tableau 8: Réponses obtenues à Nancy à la question B dans chaque groupe.....	74
Tableau 9: synthèse des versions d'artefacts élaborées par le groupe M3	83
Tableau 10: synthèse des versions d'artefacts élaborées par le groupe M1.....	86
Tableau 11: Synthèse des versions d'artefacts réalisés	88
Tableau 12: synthèse des versions d'artefacts réalisées	90
Tableau 13: synthèse des versions d'artefacts utilisés.....	92
Tableau 14: Liste des maquettes physiques traditionnelles réalisées par le groupe M4	96
Tableau 15: Liste descriptive des prototypes réalisés par le groupe M4	98
Tableau 16: Récapitulatif des rôles joués par chaque prototype réalisés au sein des équipes de conception	99
Tableau 17: Récapitulatif des outils utilisés par 13 étudiants du workshop de Mons	101
Tableau 18: Récapitulatif des outils utilisés par 10 étudiants du workshop CFD	101
Tableau 19: Classement des outils qui favorisent le plus la créativité des participants à Mons et à Nancy ...	107
Tableau 20: Tableau récapitulatif des contraintes exprimées par les concepteurs à Nancy et à Mons	108
Tableau 21: Classement des rôles obtenus	120

AVANT-PROPOS

Le travail de fin d'étude proposé ici, conclut le parcours réalisé durant cinq années de formation à l'école d'ingénieur des Mines d'Alès puis à l'Université de Liège, à la faculté des sciences appliquées en Ingénieur civil - Architecte

Ce parcours hybride permis par la formation Ingénieur-Architecte proposée à l'Université de Liège, cherchant à réconcilier l'ingénierie et l'architecture, est la concrétisation d'une vision pluridisciplinaire de l'architecture.

A l'image de ce parcours, le travail de recherche présenté ici s'inscrit dans cette même démarche visant à rapprocher l'ingénieur et l'architecte.

La matérialisation en conception architecturale numérique est le sujet de ce travail de recherche. Les enjeux techniques et scientifiques soulevés par ce sujet sont nombreux, complexes et remettent en question la manière de concevoir et de construire aujourd'hui.

Le choix de ce sujet est lié à plusieurs étapes clés de ma formation. Tout d'abord, le cours de Modélisation Architecturale Numérique m'a permis de découvrir de nouveaux outils numériques comme la modélisation paramétrique et la fabrication digitale. L'intégration de ces outils dans le processus de conception m'a ouvert sur d'autres manières de concevoir et de matérialiser les formes et les espaces. Cela s'est ensuite répercuté sur certains de mes projets.

Aujourd'hui, ces nouveaux outils s'intègrent progressivement dans les bureaux d'architecture et dans l'enseignement.

Ce travail de recherche réalisé dans un cadre universitaire, est une façon d'observer ces mutations et d'analyser un phénomène actuel qui touche l'activité de conception des architectes.

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Contexte et enjeux

Les enjeux du numérique en conception architecturale

L'importance du numérique pour l'architecture n'est plus à démontrer. Il est aujourd'hui difficile d'imaginer l'architecture sans considérer l'outil informatique. Bien que le dessin à la main et la maquette physique traditionnelle soient deux outils de conception et d'expression intemporels de l'architecte, l'ère digitale a d'ores et déjà bouleversé la manière de concevoir les artefacts architecturaux et génère encore des transformations profondes dans le métier de l'architecte.

En effet, depuis quelques décennies, les outils de l'architecte évoluent à un rythme effréné et parfois difficile à suivre pour certaines agences. Les possibilités offertes par le numérique sont multiples et variées. Conscients de cet enjeu, certains gouvernements prennent des mesures nationales à l'image du « plan de transition numérique du bâtiment » engagé en France en 2015, ayant pour but de déployer le numérique dans le secteur du bâtiment. Le BIM¹ est au coeur de ces changements mais d'autres outils numériques liés au processus de conception architecturale se déploient progressivement et engendrent de nouvelles manières de concevoir l'architecture. Ces outils ont par exemple ouvert de nouveaux champs morphologiques. On assiste en effet depuis quelques années au développement de formes de bâtiments parfois complexes, dites non-standards.

La modélisation paramétrique fait partie des outils numériques qui ont permis aux concepteurs automobiles et aéronautiques d'abord, puis aux architectes ensuite, d'accéder facilement à des formes aléatoires, fluides, libres, non conventionnelles dites « non-standard ». Cette manière de concevoir, basée sur une interdépendance de paramètres associés selon des règles définies par le concepteur, permet de faire varier des formes à tout moment et d'en explorer de nouvelles.

Aujourd'hui, l'application du paramétrique à l'architecture se diffuse progressivement et commence à être enseignée dans les universités. On constate cependant que cet outil reste encore très peu utilisé dans les petites et moyennes agences d'architecture. En Belgique par exemple, selon l'enquête menée par Stals, Elsen et Jancart (2017), 51,5% des agences d'architecture ayant participé, n'ont jamais entendu parler du terme « modèle paramétrique ».

Le numérique en architecture est un sujet qui fait encore débat mais selon Antoine Picon (2010, p.8), « la question n'est plus de savoir si le numérique est une bonne ou une mauvaise chose pour l'architecture; il s'agit plutôt de comprendre vers quoi elle s'oriente sous son influence ».

¹BIM: Building Information Modeling

Le numérique: ennemie de la tectonique?

« Il y a quelque-chose de paradoxal dans le fait que l'ordinateur contribue, comme on pouvait s'y attendre, à articuler étroitement conception et réalisation, et qu'il laisse se recréer simultanément une distance souvent frappante entre l'image du projet et la réalité des techniques constructives » Picon (2010, p.129).

La notion de « tectonique » empruntée à Frampton (1985) correspond à « la structure traduite en terme architecturaux, c'est à dire à la structure en tant qu'elle contribue à la définition de l'espace » (Picon, 2010 p.127). L'ordinateur alors qu'il intégrait progressivement certaines pratiques architecturales, semblait promettre une plus grande cohérence entre conception architecturale et décisions structurelles. Cependant, on constate ces dernières années que « toute une série de réalisations phares témoignent d'une dissociation frappante entre la forme et la tectonique » (Picon, 2010, p.128).

L'une des conséquences du développement de l'outil numérique est la conception de bâtiments aux géométries parfois complexes. Certains ingénieurs tels que Cecil Balmond exploitent les données numériques pour repousser la tectonique. L'exemple de la structure du stade olympique de Pékin (Figure 1), conçue par Herzog et de Meuron en collaboration avec Balmond, illustre la volonté d'un détachement de la tectonique par la création d'une structure visuellement aléatoire à l'image d'un nid d'oiseau.



Figure 1: Stade olympique de Pékin ([beijingbirdsnest](http://beijingbirdsnest.com))



Figure 2: Musée Pompidou de Metz (marianne-international.fr)

Ces formes « libres » se regroupent sous le terme de « non-standard » défini par le fait de s'écarter des règles admises communément (Bagneris, 2009). Cependant, lorsqu'on envisage ces formes dites « non-standard » d'un point de vue de la réalité constructive, il est difficile de faire émerger un compromis idéal (Bagneris, 2009). L'exemple de la structure du Musée Pompidou à Metz (Figure 2), initialement confiée au bureau d'étude Arup, une référence mondiale dans l'ingénierie, a finalement été reprise par le bureau d'étude Terrel. Quant à la réalisation de ce type de structures, elle n'est pas possible par toutes les entreprises. N'ayant pas trouvé l'entreprise adéquate en France pour la fabriquer, l'architecte l'a finalement confiée à une entreprise Allemande. Cette construction comptabilise trois ans de retard et un budget presque doublé (Bagneris, 2009).

Cet aspect du numérique orientant le concepteur vers des morphologies innovantes mais qui repoussent les limites constructives, nous amène à remettre en question la relation traditionnelle entre l'ingénieur et l'architecte (Picon, 2005). En effet, la maîtrise de ce type d'architecture passe par une continuité du numérique, de la conception à la réalisation.

Cette approche ne considère pas l'outil numérique comme un ennemi de la tectonique mais plutôt comme l'allié permettant de faire le lien entre les étapes d'un projet.

La fabrication digitale, vers un continuum conception-fabrication?

L'architecture se redéfinit aujourd'hui comme elle s'est redéfinie à la Renaissance (Picon, 2010). Des liens se créent entre l'architecture, la science et la technique autour du numérique. Un continuum conception-fabrication permis par le numérique se développe actuellement à plusieurs niveaux du projet architectural et s'établit par le développement de la fabrication digitale.

« L'ordinateur apparaît comme le centre à partir duquel se distribue toute une série de machines à contrôle numérique, imprimantes 3D, découpeuses laser, fraiseuses et graveurs destinés à permettre une élaboration de prototypes et une fabrication rapide » (Picon, 2010, p.166).

Le terme « fabrication digitale » réunit donc les différentes manières de transformer un modèle numérique en un objet physique. Il peut se définir par un processus de fabrication d'un objet à partir d'une machine contrôlée par un ordinateur. Mitchell et McCullough affirmaient déjà en 1995 que l'intégration des technologies de fabrication « CAM² » aux outils de conceptions « CAD³ » redéfinissait les relations entre conception et production. La fabrication digitale remet un challenge historique en architecture au goût du jour: la relation entre l'architecture et ses moyens de construction. Encore peu développée dans le monde du bâtiment (Stehling, Scheurer & Roulier, 2014), elle permet aujourd'hui de concrétiser de manière efficace et rationnelle des formes complexes générées par l'outil numérique. La notion de « mass-customisation » employée pour définir une fabrication d'éléments uniques en série, revisite la notion de « pré-fabrication ». Le concept du « non-standard » s'applique alors à la forme globale mais aussi à la diversité et la complexité des pièces à réaliser pour la fabrication.

Alors que l'ordinateur impose progressivement l'image et la visualisation dans les habitudes des architectes, ce travail de recherche s'inscrit dans cet aspect du numérique cherchant à intégrer un continuum conception-fabrication par le numérique. Le continuum conception-fabrication vise à exploiter les données numériques pour matérialiser ces formes difficilement réalisables avec les techniques traditionnelles. Il permet d'une certaine manière de renouer avec une conception par la matière.

Quand on sait l'importance de la matière sur le processus de conception (Modeen, 2005; Pallasmaa 2005) et quand on constate l'accès aisé aux formes non-standards par l'utilisation de l'ordinateur très tôt dans le processus de conception, l'intégration d'un continuum conception-fabrication à l'échelle de la maquette constitue un potentiel réel pour la conception. L'étude de la matérialisation en conception numérique est le sujet de ce travail.

² Computer-Aided Manufacturing

³ Computer-Aided Design

Objet de la recherche

Ce mémoire s'intéresse de manière générale au rôle de la maquette physique en conception architecturale numérique, et plus particulièrement aux procédés de matérialisation de celle-ci.

Le premier objectif de ce travail est d'identifier la ou les manières d'utiliser la maquette physique dans un processus de conception architecturale numérique.

Le second objectif est d'identifier et de définir le continuum conception-fabrication à l'échelle de la maquette de conception.

Le troisième objectif est d'analyser l'intégration de la fabrication digitale dans le processus de conception et d'explorer les apports et les limites engendrés sur le processus.

Enfin, la démarche intègre le ressenti du concepteur vis à vis de cette nouvelle manière de concevoir l'architecture.

Structure du travail

Le travail se structure en cinq étapes.

I. État de l'art

La revue de la littérature présente dans un premier temps les grandes théories du numérique dans la conception architecturale. D'autre part, il définit plus précisément la notion de fabrication digitale, présente ses origines et ses utilisations possibles en architecture. Il permet par ailleurs de se positionner par rapport aux recherches effectuées sur le processus de conception en général, et plus particulièrement sur la matérialisation en conception architecturale.

II. Méthodologie

La méthodologie mise en place se compose de deux parties:

- ▶ Premièrement, il s'agit de passer en revue la littérature concernant les techniques de récolte de données utilisées, à savoir l'observation en situation et le questionnaire.
- ▶ Deuxièmement, la méthode mise en place et la présentation du terrain d'observation sont explicitées

III. Traitement des données et analyse

Ce chapitre explique la méthode utilisée pour re-transcrire et analyser la quantité importante de données récoltées lors de l'observation in-situ.

IV. Résultats

La traduction des processus de conception observés sous forme de ligne de temps est présentée dans cette section. Elle présente les différentes interactions entre le modèle physique et numérique, les continuum conception-fabrication observés ainsi que l'intégration des outils de fabrication digitale.

V. Discussions

Enfin, cette partie a pour but d'une part de confronter les résultats obtenus avec les questions de recherches formulées et, d'autre part, de présenter les limites rencontrées et de discuter la méthodologie employée.

Conclusion

ETAT DE L'ART

MÉTHODOLOGIE

TRAITEMENT DES DONNÉES

RÉSULTATS

DISCUSSION

ÉTAT DE L'ART

1. Les usages du numérique en architecture

1.1. Contexte d'apparition de l'informatique en architecture

L'intégration de l'informatique à la conception architecturale a d'abord débuté par l'utilisation de logiciels d'analyse des formes urbaines puis des logiciels de programmation architecturale (Couwenbergh, 2015). L'ordinateur est apparu dans les agences d'architecture en même temps que l'arrivée des ordinateurs domestiques PC ou Macintosh dans les années 90 (Picon, 2013). Il était essentiellement utilisé pour le traitement de texte et la comptabilité. Son utilisation pour la conception n'était pas encore envisagée (Picon, 2010, 2013).

Pourtant la première utilisation de l'ordinateur en tant qu'outil de conception avancé, remonte à 1963, lors d'une démonstration de Ivan Sutherland sur le logiciel Sketchpad (Figure 3) (Davis, 2013).



Figure 3: Sketchpad (Sutherland, 1963).

Ensuite, des logiciels de DAO⁴ ont permis aux architectes d'abandonner progressivement les planches à dessins et au bénéfice de plans directement dessinés à l'ordinateur. Entre les années 1960 et 1980, nombreux étaient ceux qui assuraient que le DAO n'était pas une solution pour améliorer la conception architecturale mais pourtant, le DAO s'est très fortement répandu au cours des années 90. On parle aujourd'hui de CAO⁵ ou CAD⁶ en anglais, qui permet de créer des modèles en trois dimensions (3D) et qui contiennent de plus en plus d'informations. Dans cette mouvance, les maquettes BIM (Building Information Modelling) sont en plein essor aujourd'hui.

Selon Antoine Picon (2010), l'ordinateur est devenu concepteur en 1994. A cette époque Bernard Tschumi accompagné de Greg Lynn, expérimente des principes de programmation architecturale dynamique dans le « Paperless Studio » (Fillion, 1999). L'usage des techniques informatiques pour concevoir ont été mises en application par des architectes tel que Franck Ghery, lui permettant de s'exprimer singulièrement et d'explorer des formes « non-standards ».

⁴ DAO: Dessin assisté par ordinateur

⁵ CAO: Conception assistée par ordinateur

⁶ CAD: Computer Aided Design

1.2. Les visions du numérique en architecture aujourd'hui

Aujourd'hui les usages du numérique en architecture se diversifient. De nombreux travaux de recherche explorent les possibilités apportées par l'outil informatique à la conception architecturale. Il a été démontré que ce dernier a déjà permis aux concepteurs d'explorer de nouvelles formes, et de nouvelles méthodes, mais « il a laissé le cœur de la démarche architecturale encore très dépendante de l'intuition du concepteur » (Picon, 2010, p.94).

Cette section présente les théories et les pratiques du numérique en architecture. Elle distingue tout d'abord deux approches opposées: « la computation et la computerization » puis décrit quelques pratiques des l'approche computationnelle.

« Computation » // « Computerization »

La littérature distingue deux approches différentes du numérique en architecture. La première est la « manière restrictive » qui utilise l'outil informatique comme un soutien puissant du dessin à la main de l'architecte (Stals, Elsen & Jancart, 2016). Cette manière d'utiliser l'outil informatique a permis aux agences d'architecture de produire plus rapidement et de manière plus économique (Terzidis, 2003). Selon Terzidis (2003; p.6) cette approche, qu'il nomme « computerization », associe d'anciens concepts dans un nouveau contexte. Autrement dit, l'outil informatique sert essentiellement d'outil de représentation au service du concepteur. Dans cette manière d'envisager l'outil informatique, Terzidis fait l'hypothèse que le concepteur domine la machine. Selon lui, cette méthode contraint le concepteur à rester dans la sphère du compréhensible.

La seconde vision, celle défendue entre autres par Kostas Terzidis (2003), est basée sur un cadre théorique plus original dans lequel les outils numériques « ne sont pas vus comme des outils pour explorer ce qui est connu, mais une porte d'entrée vers l'inconnu. Il ne sert pas seulement à explorer des concepts formels, il sert aussi à découvrir de nouveaux concepts. » (Terzidis, 2003, p.3). Cette méthode appelée « computational approach » est perçue par certains architectes comme sources de créations « non humaines ». Cependant, Terzidis affirme que l'exploration formelle par « computation » n'éradique pas l'imagination du concepteur mais repousse ses limites. Il présente cette approche par le schéma présenté dans la figure 11 ci-dessous.

Picon nuance la théorie de Terzidis et estime que la généralisation de l'informatique « a permis aux architectes d'étendre leur investigations formelles [...] et de la décrire rigoureusement au moyen de l'ordinateur ». (2010, p.70),

L'approche computationnelle comprend de nombreux concepts tels que la morphogenèse, le pliage, la cinétique ou encore la logique algorithmique. La conception computationnelle est aujourd'hui mise en pratique et permet l'exploration de nombreuses autres manières de générer des formes.

L'approche computationnelle

Au sein de l'ICD (Institute for Computational Design) à l'université de Stuttgart en Allemagne, l'équipe d'Achim Menges utilise les informations du matériau, notamment le bois, pour générer la forme de l'espace conçu. Partant du constat que le matériau n'est

que très rarement le moteur générant la forme, ces chercheurs orientent leur recherche sur ce thème (Menges, 2012). Oxman et Oxman (2010) nomment cette manière de concevoir: « la conception performative ».

L'un de leurs récents travaux de recherche consiste à analyser des variations naturelles du bois par tomographie, méthode utilisée en imagerie médicale. Cette technique permet la visualisation de la structure interne d'un tronc d'arbre et ainsi concevoir en ayant une connaissance très précise des matériaux (Figure 4).



Figure 4: Tomographie d'un tronc d'arbre (Menges, 2017).

D'autres approches de ce type se développent et se concrétisent aujourd'hui à l'image des étudiants de l'Architectural Association School of Architecture de Londres. Ces étudiants et chercheurs associent les techniques artisanales du bois et les technologies numériques de fabrication digitale en pleine forêt pour réaliser des structures et des bâtiments atypiques (Maniaque, 2017; Self, 2017).

Le projet « Wood Chip Barn » par exemple, est l'alliance des technologies numériques et de la nature au service de l'architecture. L'expérience consiste à utiliser les formes naturelles de tronc d'arbre par l'utilisation d'un scanner photogrammétrique. La position de chaque tronc sur la forme initiale est définie par un algorithme qui tient compte des caractéristiques structurelles de chacun. La pré-fabrication est ensuite réalisée par un robot 6 axes avant l'assemblage des différentes parties (Self, 2017) (Figure 5).

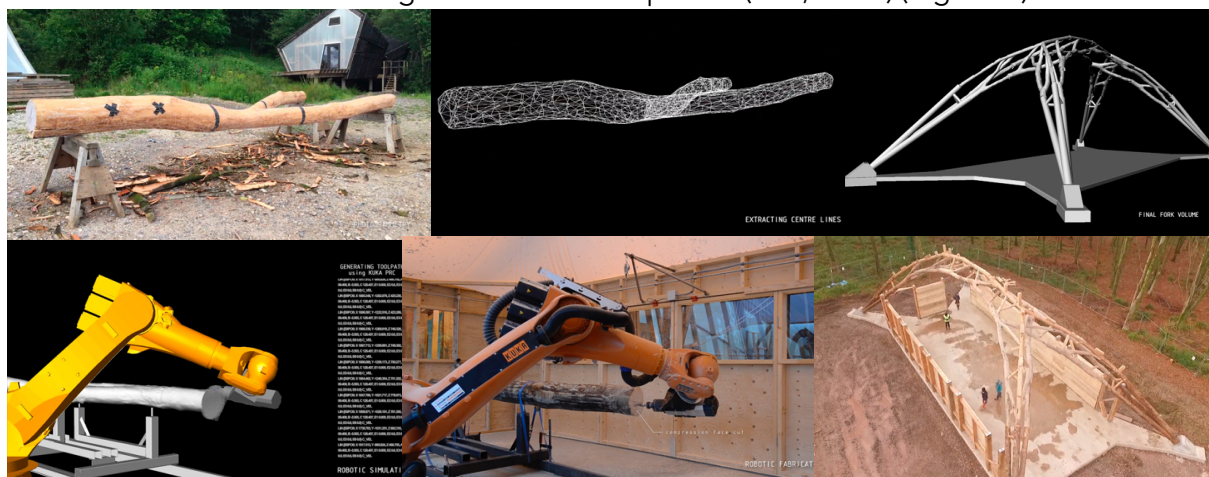


Figure 5: Wood Chip Barn. (designandmake.aaschool.ac.uk).

L'approche « computationnelle » pousse l'utilisation du numérique de manière assez extrême là où l'approche restrictive bride quelque peu la création. Dans les deux cas, l'utilisation de l'ordinateur permet un accès facilité à des formes singulières et uniques dites « non-standard ». La section suivante s'attache à décrire cette notion en particulier.

1.3. La notion de « non-standard »

Un héritage des avant-gardes.

Le terme « standard » est par définition caractérisé par le respect de règles normatives (Bagneris, 2009). En architecture, cette notion est apparue notamment avec les théories de Le Corbusier sur la standardisation de l'habitat et le courant du modernisme basé sur le rationalisme et le fonctionnalisme. Par opposition, le terme « non-standard » définit une conception architecturale ne respectant pas « les règles communément admises (Bagneris, 2009). Cette manière d'aborder l'architecture a été initiée, entre autres, par les travaux avant-gardistes et expérimentaux de Antoni Gaudi, Heinz Isler ou Frei Otto (Stals & al., 2016).

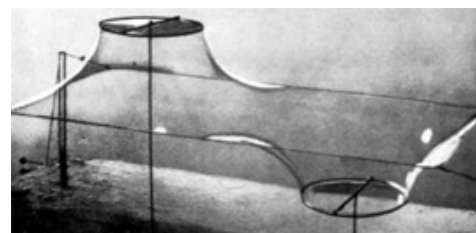
Gaudi, dans une rupture complète avec les formes euclidiennes de l'époque, invente les formes funiculaires (Wendland, 2000). Il propose des formes auto-générées sous la contrainte de la gravité, matérialisée par des sacs de sable (Figure 6). Ainsi Gaudi utilise et modifie la maquette physique, tout en gardant une connexion avec la contrainte physique. En ce sens, il est le pionnier de l'architecture paramétrique, et du processus d'auto-génération des formes (Stals, Elsen, Jancart & Delvaux, 2015; Derfour, 2016). En revanche, cette manière de concevoir, impliquait la présence permanente de l'architecte sur le chantier pour l'exécution des tâches. Dans ce sens, Gaudi fût victime d'un manque de codification et de description de son travail. (Wendland, 2000).

Figure 6: Maquette funiculaire de Gaudi (Wendland, 2000).



Frei Otto est considéré comme le pionnier de la réalisation de structures tendues. Pour réaliser ses tests, il utilise et invente les « soap skins », littéralement « peau de savon » (Figure 7). En effet, le film de savon génère la surface minimale à l'intérieur d'un cadre (Bagneris, 2009). La maquette utilisée est alors dynamique, et la forme est auto-générée naturellement. Il appliquera la théorie des surfaces minimales à la conception du toit du stade Olympique de Munich.

Figure 7: Maquette « soap skins » (Archidaily, Mars 2015).



Heinz Isler, ingénieur structure, généralise le funiculaire à une surface entière et invente les structures en coques, notamment en béton armé (Bagneris, 2009). Il approchait chaque structure en rejetant les formules mathématiques et en s'appuyant sur des modèles physiques (Figure 8), considérait que la meilleure manière d'étudier une forme en 3 dimensions, était de la matérialiser par une maquette plutôt que de la voir à l'écran (Chilton, 2000). L'une de

Figure 8: Maquette d'une coque (Chilton, 2000).



ses méthodes consistait à humidifier un tissu et profiter du temps hivernal pour le geler et obtenir une coque rigide (Bagnéris, 2009).

Enfin, **Sergio Musmeci**, ingénieur civil italien fait partie des précurseurs des formes non-standard en architecture selon Barbisan (2013). L'une de ses réalisations marquantes est le pont Basento en Italie, construit en 1976 (Figure 9). Sans ordinateur, il parvient à générer une forme hors du commun, dans laquelle la matière (le béton armé) travaille uniquement en compression.

Figure 9: Pont Basento, Italie. (Wikipedia, 2016).



Ces exemples ne représentent pas une liste exhaustive des premières réalisations « non-standard » mais ont marqué l'histoire de l'architecture, et influencé d'autres mouvements architecturaux tels que le bio-mimétisme dans les années 1970 et le dé-constructivisme à partir des années 1980.

L'architecture non-standard se caractérise par des géométries repoussant généralement les lignes droites au profit de formes dites non-euclidiennes. Ces géométries ont pu être maîtrisées grâce à l'avancée des mathématiques.

Les mathématiques: maître de la courbe.

Pierre Bézier, Ingénieur de l'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers écrit en 1987 : « jusqu'à une date récente, les dessins de pièces mécaniques ne donnaient pas une description complète de l'objet qu'ils étaient censés représenter » (Bézier, 1987, p.1). Or, il se rend compte que pour utiliser les machines à commande numérique qui se développent à cette époque, « il devenait indispensable de disposer d'une définition complète et précise de toutes les surfaces à réaliser » (Bézier, 1987, p.1).

En effet, c'est dans l'entreprise automobile Renault qu'il se rend compte du « flou artistique » des méthodes utilisées en carrosserie: « on ne demandait à personne d'avoir des connaissances mathématiques, exception faite des dessinateurs, qui étaient de vrais acrobates de la descriptive; leurs instruments étaient des gabarits, des pistolets, des lattes flexibles, des compas à pointes sèches et des réglets gradués. » (Rabut, 2002, p.496). La figure 10, représente une « spline » qui se traduit en français par « latte » utilisée par ces dessinateurs non-standard de l'époque pré-numérique.



Figure 10: « Spline » ou cerce (Wikipédia).

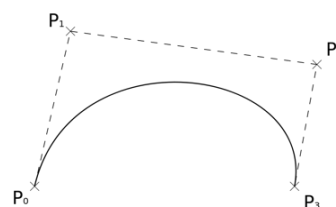


Figure 11: Courbe de Bézier cubique ($P_0, \dots, P_3$) (Wikipédia)

En réaction à ces constats, Bézier invente donc une manière de définir précisément et simplement les courbes qui donnera lieu à la courbe de Bézier en 1962 (figure 11). Le but ultime est de pouvoir intégrer ces données à une machine à commande numérique et découper des pièces précisément.

Selon Pottman (2012), l'évolution numérique actuelle a été permise par l'avancée des mathématiques et notamment le succès de la Spline. En effet, l'arrivée des NURBS⁷ (Figure 12) utilisables sur des logiciels comme Rhino ou Maya représente une avancée technologique importante et mise en application dans la conception industrielle. Elles permettent selon Mitchell (cité par Terzidis, 2003), de ne plus se limiter aux lignes, aux arcs, aux plans ou aux cylindres de la géométrie euclidienne mais de créer des courbes et des surfaces plus atypiques.

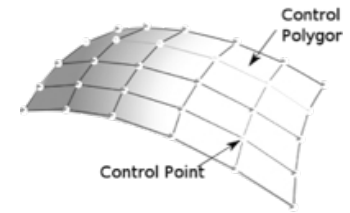


Figure 12: Surface NURBS.

L'essor du « non-standard »

On assiste depuis quelques décennies au développement de ces nouvelles morphologies basées sur la « transition douce », la continuité, les volumes lisses et organiques, la souplesse, le pliage, la curvilinearité, etc....(Picon, 2010). Cette nouvelle manière d'envisager l'architecture est portée par les théories de Greg Lynn (1993), fondées sur « une transformation en douceur permettant une intégration intensive des différences au sein d'un système à la fois continu et hétérogène ».

C'est ce dernier qui utilise le terme « BLOb », acronyme de Binary Large Object, désignant un format de fichier contenant la description géométrique d'un objet, pour caractériser ces architectures fluides. Les formes fluides existaient déjà dans le domaine de l'art visuel, de l'aéronautique et l'automobile pour répondre à des enjeux techniques ou esthétiques (Bagneris, 2009). En 2003, le centre Pompidou à Paris a accueilli « l'exposition des architectures non-standards ». Depuis, ce nouveau phénomène s'est beaucoup théorisé et fait partie du « digital design ».

Mitchell (2005), estime que les bâtiments sont maintenant conçus, documentés, fabriqués et assemblés avec l'assistance de l'ordinateur. Selon lui, ces architectures se caractérisent par un haut niveau de complexité. Le musée Guggenheim à Bilbao (Figure 13) réalisé par Franck Ghéry et inauguré en 1997 est l'une des premières représentations marquantes des nouvelles directions formelles et des nouvelles méthodes de conceptions. On parle d'ailleurs « d'effet Guggenheim ».



Figure 13: Musée Guggenheim à Bilbao par Franck Ghéry (libertaddigital.com, 2017)

Plus tard d'autres bâtiments dans cet esprit d'« hyper-continuité » (Oxman, 2005, p.235) ont été réalisés. Ils se caractérisent par une topographie complexe, impossible à concevoir à l'époque de la conception sans ordinateurs (Oxman, 2005). Parmi eux, le Terminal du port International de Yokohama conçu par le bureau Foreign Office Architects (FOA) inauguré en 2002, illustre cette notion (Figure 14).



Figure 14: Terminal du Port international de Yokohama par Foreign Office Architects(archdaily.com).

⁷ Non-Uniform Rational B-Spline

1.4. L'architecture paramétrique, une plus grande maîtrise du non-standard.

Le défi soulevé par l'architecture non-standard consiste à conserver ces formes innovantes en trouvant le lien avec la technique et l'ingénierie. La modélisation paramétrique semble orienter le processus de conception vers cette plus grande cohérence.

Cette section a pour but d'expliquer l'origine de l'architecture paramétrique et d'en expliquer les grands concepts.

Origines et évolution de l'architecture paramétrique

La pensée algorithmique et paramétrique

L'architecture paramétrique est souvent associée à la pensée algorithmique défendue par Terzidis (2006), regroupées sous le terme « paramétricisme » (Schumacher, 2009; Leach, 2014). L'origine du mot « algorithme » vient du mathématicien persan Al Khwarizmi qui a introduit en occident la numération décimale. En mathématiques, un algorithme est défini comme une procédure précise de traitement de données initiales: les « in-puts », qui mène au résultat voulu, les « out-put » (Markov, 1954; Weissten, 1999). Dans son livre, Tedeschi (2014) compare un algorithme avec une recette de cuisine. L'algorithme est en fin de compte une décomposition d'un processus en sous-étapes où il faut respecter les indications précisément pour parvenir au résultat souhaité. Ces indications sont en fait les paramètres de l'algorithme que l'on peut faire varier pour obtenir un résultat différent.

Le « paramètre » est une notion qui touche de nombreux domaines en mathématiques. Le « paramètre » est défini comme une variable pouvant recevoir une valeur constante comprise dans un domaine défini (Bouvier, George & Le Lionnais, 1979). Il est notamment utilisé dans des systèmes d'équations paramétriques permettant la représentation de droites, de courbes, de surfaces.

La prise en compte de paramètres en architecture a en fait toujours existé car l'architecte s'adapte à une multitude de paramètres (Aish & Woodburry, 2005; Geber, 2007).

Cependant, selon Davis (2013), l'origine de l'architecture paramétrique remonte à l'époque de Gaudi ou Otto puisqu'ils utilisent tous deux des paramètres (physiques) pour concevoir. Luigi Morretti est le premier à utiliser le terme « architecture paramétrique » lorsqu'il organise en 1960 l'exposition du même nom. Il considère que la structure d'une forme se compose d'un groupe de relations (Moretti, Bucci & Mulazzani, 2000).

Les outils du paramétrique

Le paramétrique en tant qu'outil numérique est apparu en 1970 avec le modèleur paramétrique « Euclid » est développé par la société Matra Datavision en France (Weisberg, 2008). Ce logiciel est utilisé à des fins militaires notamment par l'entreprise Dassault Systèmes, constructeur aéronautique français.

En 1988, un logiciel dédié à la conception paramétrique se développe. Il s'agit de Pro/ENGINEER développé par « Parametric Technology Corporation » (Davis, 2013). Ce logiciel

a débuté par la conception d'engins agricoles pour la marque John Deere puis s'est développé grâce à la conception d'engins de travaux publics pour la marque Caterpillar.

Dans les années 1990, Mark Burry et son équipe font l'usage du logiciel CADD5 pour modéliser une partie de la Sagrada Família de Barcelone sur le logiciel CADD5 (Burry, Burry & Faulí, 2001).

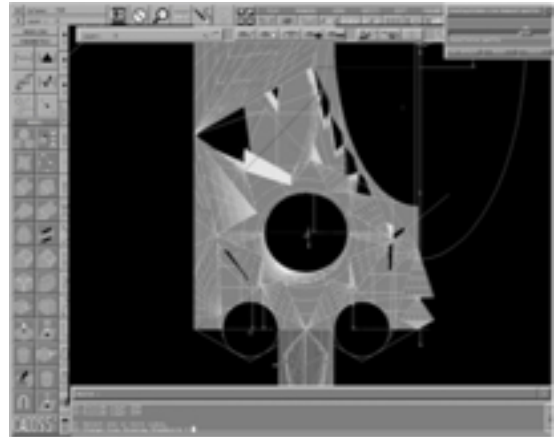


Figure 15: Modélisation paramétrique de la Sagrada Família de Barcelone sur le logiciel CADD5 (Burry, Burry & Faulí, 2001).

En 2004, le logiciel CATIA, acronyme de « Computer Aided Three-dimensional Interactive Application », développé par Dassault Systèmes en 1981, est adapté à l'architecture par Gherly Technologies par l'ajout d'une interface dédiée à la conception architecturale. Le logiciel devient Digital Project (Hochscheid, 2012), (Davis, 2013, p.38). Ce logiciel servira ensuite à la conception de bâtiments emblématiques tels que la fondation Louis Vuitton à Paris.

En 2007, de nouveaux logiciels paramétriques font leur apparition. Le logiciel Rhino 3D ajoute l'extension Grasshopper et Bentley Systems crée Générative Component (Devaux, 2016). Ces nouveaux logiciels proposent une interface graphique permettant une prise en main plus aisée, améliorant ainsi l'accès à ce type d'outil.

Cette accessibilité à la modélisation paramétrique permise par ces nouveaux logiciels, engendre aujourd'hui une diffusion de cet outil dans les agences d'architecture et les universités. En effet, l'architecture paramétrique est aujourd'hui enseignée dans les écoles d'architecture et les universités, et s'intègre progressivement aux projets des étudiants. La figure 16 ci-dessous est un exemple de modélisation paramétrique réalisée sur le logiciel Grasshopper dans le cadre du cours de SDC (Studio Digital Collaboratif) proposée à l'université de Liège et à l'école d'architecture de Nancy.

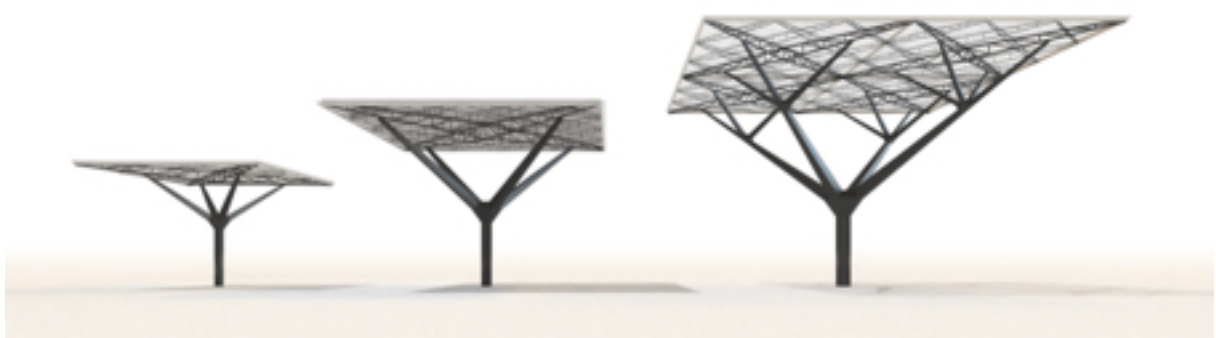


Figure 16: Exemple d'un modèle paramétrique réalisé sur Grasshopper.

Les théories du paramétrique

Les recherches effectuées sur l'architecture paramétriques sont récentes mais plusieurs courants de pensées se distinguent dans la littérature. Cette section s'intéresse en particulier à une théorie qui fait débat au sein de la communauté des architectes, liée aux compétences informatiques demandées aux concepteurs pour utiliser ces logiciels. Puis elle présente les potentiels apportés par cet outil.

En architecture, l'utilisation pure du langage informatique pour générer des formes a permis « l'utilisation de l'ordinateur au-delà de ses limites ordinaires » (Picon, 2010, p.96). Terzidis (2006) estime que la pensée architecturale pourra s'émanciper par le « recours plus systématique à la programmation de scripts ». Selon lui, l'architecte doit aussi être informaticien. Cette théorie soulève un certain nombre de questions et de réactions au sein de la communauté des architectes. En effet, aujourd'hui peu d'architectes sont capables de passer par des lignes de codes pour modéliser un bâtiment, bien que le niveau informatique des étudiants en architecture et des architectes ne fait que croître (Picon, 2010). Afin de rendre accessible la pensée algorithmique au plus grand nombre, des interfaces graphiques ont été ajoutées aux logiciels. C'est de cette manière que fonctionnent les logiciels de modélisation paramétrique tel que Grasshopper ou Générative Component.

Par ailleurs, Leach (2014, p.4) fait la distinction entre la conception algorithmique et la conception paramétrique. « Les techniques algorithmiques sont basées sur l'utilisation de ligne de codes tandis que la technique paramétrique est basée sur la manipulation de la forme »⁸. En revanche, il devient nécessaire dans la pratique de savoir utiliser le langage informatique pour la manipulation de logiciels tels que Grasshopper qui présente des interfaces graphiques (Schumacher, 2009). De Boissieu dans sa thèse, illustre cette différence en comparant le script nécessaire dans DesignScript (logiciel développé par Autodesk) et les composants nécessaires dans Grasshopper pour obtenir une forme équivalente (Figure 17).



Figure 17: Comparaison d'un script réalisé sous deux logiciels différents (de Boissieu, 2010).

Ainsi, les deux notions ne sont pas dissociables l'une de l'autre mais, la modélisation paramétrique se veut plus accessible aux personnes ayant des compétences basiques en informatique. C'est pourquoi la diffusion de cet outil progresse au sein des agences d'architectures et des universités.

⁸ Traduction de « Algorithmic techniques are based on the use of code. Parametric techniques are based on the manipulation of form. »

Yessios (2003) rappelle qu'initialement la notion de « paramétrique » faisait référence à une équation paramétrique en mathématiques, alors qu'aujourd'hui elle est utilisée pour définir la possibilité de modifier un objet une fois créé. Sa définition rejoint donc celle proposée par de Boissieu (2010): « Un modèle paramétrique n'a pas de forme ou de contenu figé, il peut être modifié à tout moment à partir des variables indépendantes, appelées paramètres, qui le définissent » (2010, p.5). Par cette définition on comprend que la modélisation paramétrique permet de nombreuses variantes à différentes phases du processus de conception et devient un outil puissant pour la conception architecturale (Woodbury, 2010).

Alors que ces définitions se focalisent sur la flexibilité et la souplesse qu'engendre la modélisation paramétrique sur le processus de conception, certains considèrent l'architecture paramétrique comme un mouvement à part entière. Par ailleurs d'autres travaux s'intéressent à son rôle cognitif.

La considération du paramétrique comme un mouvement à part entière, est défendue par Patrik Schumacher, personnage caractéristique de l'application du paramétrique en architecture. Architecte connu pour ses réalisations au côté de Zaha Hadid, Schumacher propose un nouveau style qu'il appelle le « paramétricisme » en consonance aux mouvements tels que le « modernisme ». Sa théorie consiste à considérer chaque forme « paramétriquement » malléable (Schumacher, 2009).

Des recherches sur le rôle cognitif de cette approche paramétrique sur le concepteur ont été menées par Aish et Woodbury (2005) et Woodbury (2010). Leurs travaux démontrent que la modélisation paramétrique implique pour le concepteur la prise en considération de séquences et relations entre différents paramètres pour créer le projet.

Oxman et Gu (2015), théorisent cette méthodologie et la nomment « parametric design thinking » en se basant sur les théories de Woodbury (2010). Cette manière de concevoir est appréciée chez certains concepteurs qui sont ainsi obligés de considérer chaque relation géométrique.

1.4.1. En pratique

De plus en plus d'architectes et d'étudiants en architecture, expérimentent la modélisation paramétrique dans leurs projets, conscients des avantages qu'elle peut apporter. Ces pratiques restent cependant très peu répandues et limitées, en France tout comme en Belgique (de Boissieu, 2010); (Stals, Elsen, Jancart, 2017).

Contrairement à la théorie défendue par Terzidis selon laquelle le concepteur doit se laisser guider par des algorithmes pour que l'architecture s'émancipe, l'analyse de Yu, Gu, Ostwald et Gero (2015) démontre que la pratique des architectes est différente. Leur travail révèle en effet que les architectes observés en situation de conception paramétrique se laissent peu guider par le modèle paramétrique, mais plutôt par leur expérience en architecture. Les efforts investis dans la modélisation paramétrique augmentent progressivement au fil du processus de conception. Ils constatent par ailleurs que plus le concepteur a des compétences dans l'utilisation du logiciel, plus vite il a recourt à cet outil.

Bourbonnais (2014) remarque d'autre part dans son observation que le concepteur, bien qu'il puisse « lâcher prise » et laisser faire l'ordinateur, il reste maître de la solution choisie et entre dans un processus itératif qu'il maîtrise (Stals & al., 2016). En revanche, par rapport à un modelleur classique, l'utilisateur a accès à deux représentations de son modèle. En effet, il a accès à la représentation « explicite » correspondant à la forme géométrique, mais aussi à la représentation « implicite » correspondant au script. Cette particularité du modèle paramétrique « est plus en phase avec un processus créatif autorisant aussi l'application de stratégies incertaines » (Couwenbergh, 2015, p.3).

Ainsi, la modélisation paramétrique s'inscrit dans une démarche favorisant le processus de génération de la forme tout en permettant à l'utilisateur de garder le contrôle sur la forme elle-même (Stals & al., 2016).

Cette première partie de l'état de l'art a permis de comprendre l'un des aspects du numérique aujourd'hui en architecture: sa tendance à l'orienter vers des formes « non-standard » et parfois complexes qui défient les limites de la construction. Cette première partie met en lumière les ruptures permises par le développement des mathématiques et l'informatique sur l'architecture. Cependant, une autre manière d'envisager le numérique en architecture vise à exploiter les données numériques au service d'une architecture innovante mais plus en accord avec la réalité de la construction.

La seconde partie de l'état de l'art concerne l'exploitation des données numériques pour la matérialisation, et la concrétisation de ces formes complexes par l'utilisation des machines à commande numérique. Cette partie permettra une présentation détaillée de la fabrication digitale.

2. La fabrication digitale: vers un continuum conception-fabrication?

Cette section se compose de deux parties. La première est destinée à définir la notion de fabrication digitale et de montrer qu'elle englobe deux notions différentes par leur échelle: le prototypage rapide et la notion de « CAD/CAM⁹ ». Le premier terme concerne la matérialisation dans les phases de conception et le second concerne le continuum de conception fabrication permis par les données numériques à l'échelle de la construction du bâtiment.

La seconde partie se focalise sur cette seconde notion, et plus particulièrement sur les potentialités offertes par le continuum conception-fabrication à l'échelle de la construction.

2.1. Fabrication Digitale: définitions et notions liées

La Fabrication digitale

Certains travaux de recherche en cours utilisent les notions de fabrication digitale, prototypage rapide, CAD/CAM de manière assez générale et ambiguë sans vraiment les définir. La revue de littérature permet d'éclaircir ces notions.

Le premier constat est que la notion de « fabrication digitale » ou « fabrication numérique » englobe aujourd'hui deux notions différentes: le CAM et le prototypage rapide. Historiquement la notion de « fabrication digitale » est née dans le milieu industriel automobile et de l'aéronautique. Progressivement, et par une utilisation différente, la notion de prototypage rapide est apparue.

CAM: Computer Aided Manufacturing

Comme Pierre Bézier l'avait remarqué, la marge de progression pour améliorer la qualité des carrosseries des voitures Renault était grande (précision, défauts, etc...). Cette exigence de qualité et cette aspiration au « zéro défaut » que l'industrie automobile et aéronautique se force d'atteindre depuis des années ont amené les ingénieurs à inventer les machines capables produire de précisément à la place de l'homme. Dans les années 1950, l'ordinateur apparaît dans l'industrie et est utilisé en priorité par l'administration (Rabut, 2002). En 1955, les premières machines-outils à commande numérique font leur apparition. Dans l'entreprise Renault, Bézier raconte qu'« au début, c'était pour effectuer de point en point des perçages, des taraudages et des alésages ; plus tard on est passé au fraisage suivant des droites, puis des arcs de cercle. » (cité par Rabut, 2002, p.496). C'est le début de la fabrication assistée par ordinateur que l'on nomme aujourd'hui « fabrication digitale ».

Le premier bras-robot utilisé dans l'industrie a été créé par Unimate (Figure 18) en 1962 et installé dans une usine de General Motors aux Etats-Unis. Au total, 8500 robots de ce type seront vendus (Moran, 2007).

⁹ CAM: Computer Aided Manufacturing

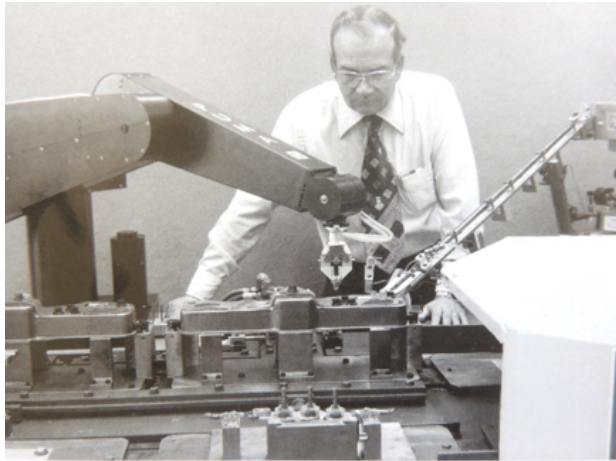


Figure 18: « The Unimate » : le premier bras robotisé utilisé dans l'industrie (Kilian, 2017).

Sundar, Selwyn et Elanchezhian (2005) définissent la fabrication assistée par ordinateur (CAM) comme l'utilisation de l'ordinateur pour planifier, gérer et contrôler les opérations de fabrication d'une usine. Ils ajoutent que contrairement à une utilisation de l'ordinateur pour concevoir, on l'utilise ici pour fabriquer. L'outil industriel permettant la fabrication contrôlée par ordinateur est souvent associé à l'acronyme CNC (Computer Numerically Controlled): on parle alors de Robot CNC.

Ces technologies ne cessent d'évoluer et les machines CNC font leur apparition dans le monde de la construction et sur des chantiers expérimentaux. En 2010, l'association internationale « Robotic Fabrication in architecture, art and design » est créée par Sigrid Brell-Cokcan and Johannes Braumannet de l'université technologique de Vienne. Ils proposent des travaux expérimentaux utilisant des machines à commande numérique. De même les conférences internationales FABRICATE, créées en 2011, abordent les travaux de recherche sur l'intégration du thème de la Fabrication Digitale aux métiers de la conception.

L'usage de machine à commande numérique pour construire a été détourné plus tard pour concevoir et matérialiser des formes complexes rapidement, c'est le prototypage rapide.

Le prototypage rapide

Le terme **prototypage rapide**, traduction de « rapid prototyping », a parfois des sens légèrement différents dans la littérature. Kolarevic (2001, p.272), explique que cette notion est souvent associée aux technologies de fabrication additives que l'on connaît surtout sous le nom d'imprimantes 3D. Cependant, il précise plus tard (2003) que le prototypage rapide fait partie du champ de la fabrication digitale mais que son application est réservée à la phase conception, tandis que le CAM est employé pour définir une production et construction assistée par ordinateur (Kolarevic, 2003).

L'origine du terme « prototypage rapide » remonte aux années 1980, avec la commercialisation des premières imprimantes 3D SLA fabriquées par 3D Sytems (Ryder & al., 2002). Streich (1991) l'introduit ensuite à l'architecture comme une méthode de traduction des modèles 3D réalisés par les logiciels CAD en modèles physiques par l'utilisation de la stéréolithographie, technologie présentée dans la section suivante. Le développement de cet outil a été développé dans un contexte où la création de modèle

3D par l'informatique devenait de plus en plus facile, laissant de côté la maquette physique.

Dubois, Aoussat et Duchamp (2014, p.5) définissent le prototypage rapide par « un ensemble d'outils qui, agencés entre eux, permettent d'aboutir à des objets de **représentation intermédiaire** de la conception de produits : les modèles numériques (au sens géométrie du modèle), les maquettes, les prototypes et les pré-séries ».

Inventé dans les années 1980 dans le design industriel, le prototypage rapide était utilisé à ses débuts pour communiquer avec un client à propos d'un concept. Il intègre trois composantes:

- **Le temps:** l'un des objectif principal du prototypage « rapide » est de concevoir et produire des produits plus rapidement,
- **Le coût:** le second objectif de cet outil est de favoriser la matérialisation sans investir dans un outillage trop coûteux mais permettant d'explorer des variantes du produit en cours de conception,
- **La complexité des formes:** certaines machines opérants par ajout de matière, permettent la réalisation de formes très complexes (l'inclusion, la cavité, etc. ...) impossible à réaliser par des procédés soustractifs.

Les modèles réalisés ont pour objectif de vérifier, et valider les fonctions que doit remplir le produit (Dubois, Aoussat et Duchamp, 2014)

Les technologies associées au prototypage rapide sont des versions miniatures de celles trouvées dans l'industrie. Les grandes familles de technologies sont présentées dans la section suivante.

2.2. Les technologies associées à ces deux notions

Le prototypage rapide regroupe aujourd'hui trois technologies principales selon Sass et Oxman (2006):

- La découpe 2D
- Les technologies soustractives
- Les technologies additives

Chacune de ces machines est une version réduite de celles utilisées pour des échelles réelles de production industrielle. Kolarevic (2001) considère quant à lui, quatre typologies de techniques de fabrication digitale dans l'industrie. Il ajoute au trois catégories précédentes la technologie formative.

Les quatre typologies de techniques sont encore d'actualité aujourd'hui, mais chaque typologie a été largement complétée. Il existe maintenant des applications multiples de ces méthodes qui restent néanmoins expérimentales. Ces nouvelles applications vont de pair avec des matériaux toujours plus sophistiqués.

La liste des outils cités ci-dessous ne représente pas une liste exhaustive de toutes les technologies qui existent, mais des applications courantes et remarquables.



1/ La découpe 2D.

Cette technologie est très utilisée par les architectes ou designers (Sass & Oxman, 2006) et permet de découper des épaisseurs de bois, plexiglass, allant jusqu'à 55mm (Trotec, 2017). En prototypage rapide deux types de techniques sont utilisées: la découpe vinyle ou la découpe laser. La découpe vinyle est surtout utilisée pour des épaisseurs de matériaux fines tandis que la découpe laser permet une découpe de plus grande épaisseur (Figure 19). Plusieurs technologies de découpe existent à l'échelle industrielle: le plasma, laser, jet d'eau (Kolarevic, 2001). Ces outils de découpe se déplaçaient auparavant selon deux axes. Un exemple d'utilisation est la découpe au plasma des supports en acier utilisés pour les murs maçonnerie des Zollhoff Towers de Frank Gehry à Dusseldorf (Figure 19)

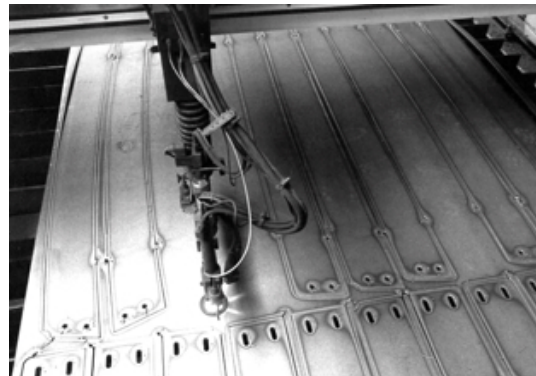
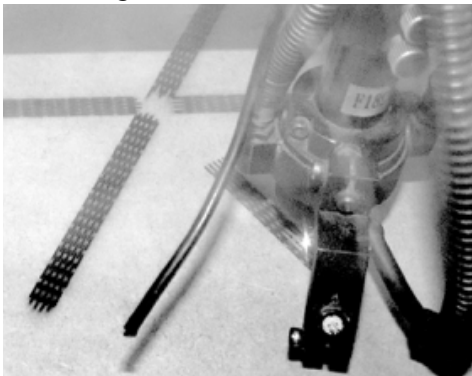


Figure 19: Découpe au laser au FabLab de Mons (à gauche). Découpe au plasma (Rempen 1999 cité par Kolarevic (2001).

Aujourd'hui, il existe des robots capables de découper selon plusieurs directions (Figure 20).



Figure 20: « Carrara Robotics »(Hyperbody)(<http://www.robarch2016.org>).



2/ **Les méthodes soustractives** que l'on pourrait assimiler au travail du sculpteur, consiste à soustraire un volume de matière à un volume initial en utilisant une fraiseuse multi-axes. Les premières expériences utilisant les fraiseuses CNC pour fabriquer des maquettes ont été menées en 1970 en Angleterre. Au début des années 1990, la technique est exploitée pour la découpe des pierres de la cathédrale de New-York et la Sagrada Familia en Espagne (Mitchell et McCullough, 1995). La première utilisation par un procédé CAD/CAM revient à Frank Ghéry dans le projet Disney Concert Hall où les panneaux de pierre ont été fraisés en Italie puis envoyés à Los Angeles. Le même procédé sera utilisé pour le musée Guggenheim de Bilbao (Kolarevic, 2001).

Aujourd'hui, cette méthode est souvent associée à un bras robotisé du type KUKA¹⁰ (Figure 21) autorisant une découpe dans toutes les directions.



Figure 21: Préparation d'un assemblage à l'aide d'un fraiseuse actionnée par une bras à 7 axes pour la réalisation d'un pavillon (La Magna & al., 2013) dans RobArch 2013.



3/ Les méthodes additives. Aujourd'hui, trois techniques différentes sont couramment utilisées en prototypage rapide. Elles sont illustrées par la figure 22:

- Par dépôt de matière, ou « Fused Deposition Modeling » (FDM). Cette technique consiste à faire fondre un filament de matière plastique, le déposer couche par couche. Le filament se solidifie en refroidissant.
- Par photopolymérisation, ou « Stéréolithographie » (SLA). Cette technique est basée sur la solidification d'un matériau polymère lorsqu'il est exposé à la lumière.
- Par liage de poudre ou Selective Laser Sintering (SLS). Cette technique utilise un faisceau laser pour faire fondre de la matière couche par couche.

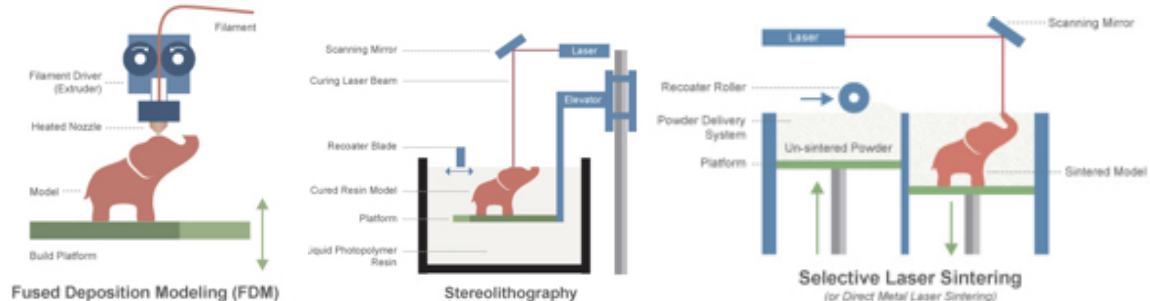


Figure 22: Trois exemples de technologies existantes en impression 3D (<http://3dinsider.com>).

¹⁰ KUKA: entreprise allemande spécialisée dans les robots industriels

Les méthodes additives industrielles comprennent les mêmes procédés utilisés pour le prototypage rapide mais avec des matériaux de constructions réels. Aujourd'hui la méthode additive à grande échelle progresse. Des travaux expérimentaux testent de nouveaux matériaux à l'image du projet MMYST (Figure 23). Le projet consiste à réaliser un abri imprimé en 3D par un Kuka 6 axes R10KR1100 en « Lava skin » (mousse légère expansible naturelle)

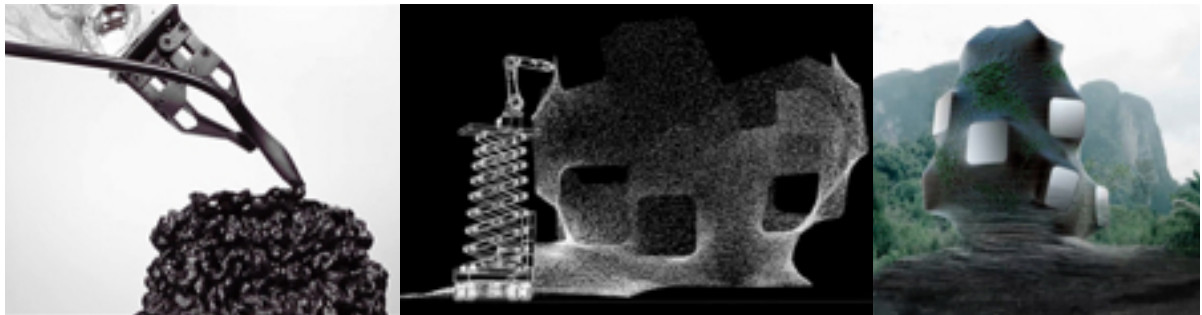


Figure 23: Projet expérimental MMYST présenté lors du RobArch 2016. (kickstarter.com).

4/ **La méthode formative** est basée sur l'application de forces mécaniques, de chauffage ou autres procédés pour déformer la matière (Figure 24).

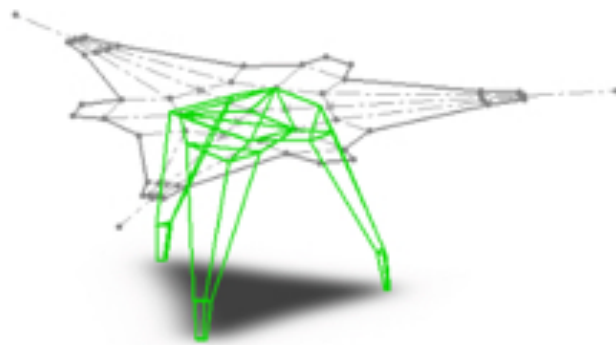


Figure 24: The Deceptive Ease of Folding: The Industrialisation of a Prototypical Product (Ebnother, 2013).

La fabrication digitale regroupe finalement deux notions liées à l'échelle de fabrication. On parle de prototypage rapide lorsqu'il s'agit d'une fabrication pendant la conception et de CAM lorsqu'il s'agit d'une fabrication à l'échelle industrielle. Les outils du prototypage rapide utilisés communément sont des modèles réduits des machines utilisées dans l'industrie exploitant des matériaux adaptés. Cependant, on assiste aujourd'hui à une réunification de ces deux notions. En effet, certaines universités, laboratoires de recherche ou agences d'architecture commencent à s'équiper de robots que l'on trouve dans l'industrie pour réaliser leur prototype. Dans ce sens, le continuum conception-fabrication se trouve bien amorcé.

2.3. CAD/CAM: « Design to production »

Le nouveau « structuralisme »

L'ère du numérique touche aujourd'hui la profession ainsi que toute l'industrie du bâtiment. Kolarevic (2003, p.2) estime qu'« un nouveau continuum numérique, un lien direct entre la conception et la construction est établi à travers les technologies numériques. »¹¹. Ce continuum renforce les liens entre la matière, la structure et la forme.

Cette théorie rejoint celle de Oxman et Oxman (2010) qui considèrent que l'ingénierie architecturale est caractérisée traditionnellement par la séquence « Forme - Structure - Matière » mais qu'elle évolue aujourd'hui. Ils constatent, qu'au cours de ces dix dernières années, le rôle de la matière et de la structure dans l'expression formelle s'est renforcé. **Il en résulte une autre relation entre la maquette formelle de l'architecte et les techniques de fabrication des ingénieurs** (Oxman & Oxman, 2010). Constatant ces évolutions, ils prônent un nouveau mode de produire l'architecture qu'ils nomment le « new structuralism », basé sur une très forte collaboration entre l'ingénieur et l'architecte dès les premières phases du processus de conception.

En retour, une nouvelle génération d'entreprises conscientes des opportunités créées par ces mutations ont vu le jour ces dernières années. Un exemple est l'entreprise *designtoproduction* créée par Fabian Scheurer à Zurich qui transforme les concepts en bâtiments réels (Kolarevic & Klinger 2013). Leur slogan « we master complexity¹² » traduit l'enjeu et le challenge que représente la réalisation de nouvelles formes « non-standard ». La figure 25 illustre, l'une de leur dernière réalisation: le pavillon français à l'exposition universelle de Milan (2015) conçu par le bureau d'architecture XTU et *designtoproduction*.



Figure 25: La pavillon français à l'exposition universelle de Milan. (designtoproduction.com).

¹¹ Traduction de l'anglais : « A new digital continuum, a direct link from design through to construction is established through digital technologies.

¹² « Nous maîtrisons la complexité »

Oxman et Oxman (2010) ajoutent que l'entreprise *designtoproduction* a été précurseur dans l'utilisation de la description numérique de la tectonique comme appui de la fabrication et de la construction. Le processus de fabrication et de construction s'appuie sur les données « tectoniques » numériques. Le processus inverse, utilisant les données du matériau pour concevoir le projet existe aussi et rejoint les travaux d'Achim Menges et de « conception performative » (Oxman & Oxman, 2010) cité plus haut.

Les enjeux de la fabrication digitale

La revue de la littérature permet d'explorer les bénéfices de la fabrication digitale sur l'industrie de la construction. Un des bénéfices est le transfert rapide de l'information entre le concepteur et le constructeur. Selon Cramer (cité par Kolarevic 2003), le processus de construction devient plus efficace. Selon ses estimations, la construction des bâtiments pourrait devenir jusqu'à 40% plus efficace avec l'aide d'informations et de coordinations digitales. A l'extrême, Girard (2014) souligne que si l'on conçoit et fabrique l'architecture comme on le fait pour une pièce mécanique, sans aucun défaut, l'architecture et son utilité seraient complètement remises en question dans (Couwenbergh, 2015).

Menges, Schwinn et Krieg (2017) font remarquer que la numérisation de la fabrication dans l'industrie du bois a des répercussions économiques, techniques et des effets sur la collaboration entre les différentes disciplines de la profession. Techniquement, la fabrication digitale permet la réalisation d'assemblages complexes du type « queue d'aronde » de manière efficace. Cela offre des nouvelles possibilités pour des constructions contemporaines en bois. Un autre bénéfice est la plus grande précision de la fabrication ce qui a un impact positif sur le temps de construction sur site.

Enfin, Kundra (1993) explique qu'un des avantages de la fabrication digitale est la possibilité de produire des pièces identiques en très grande quantité, rapidement et précisément, en diminuant le coût de production. Aujourd'hui, les techniques de fabrication permettent une production en série d'éléments uniques aussi facilement que des éléments standards: c'est la notion de « mass-customisation » (Kolarevic, 2001).

Aujourd'hui, la préfabrication est considérée comme un gage de qualité et de timing respecté, notamment dans le cas de formes complexes (Menges & al., 2017). L'utilisation de la modélisation paramétrique faisant varier les formes selon des paramètres s'intègre dans cette logique de « mass customisation ».

Ainsi cette seconde section de l'état de l'art permet de faire le point sur la notion de fabrication digitale et les enjeux qu'elle soulève aujourd'hui à l'échelle de la construction. Elle met en évidence une utilisation des outils de fabrication numérique différente à l'échelle de la production et à l'échelle de la conception (Figure 26). Cependant, on constate que les outils et les notions ont tendance à parfois se confondre. On constate l'amorçage d'un continuum numérique entre conception et fabrication.

De manière à comprendre ce continuum conception-fabrication, il paraît nécessaire de s'intéresser à la matérialisation dans la phase de conception. La section suivante se focalise sur la phase de conception et plus particulièrement sur la matérialisation dans un processus de conception numérique. Elle s'intéresse donc au champ du prototypage rapide.

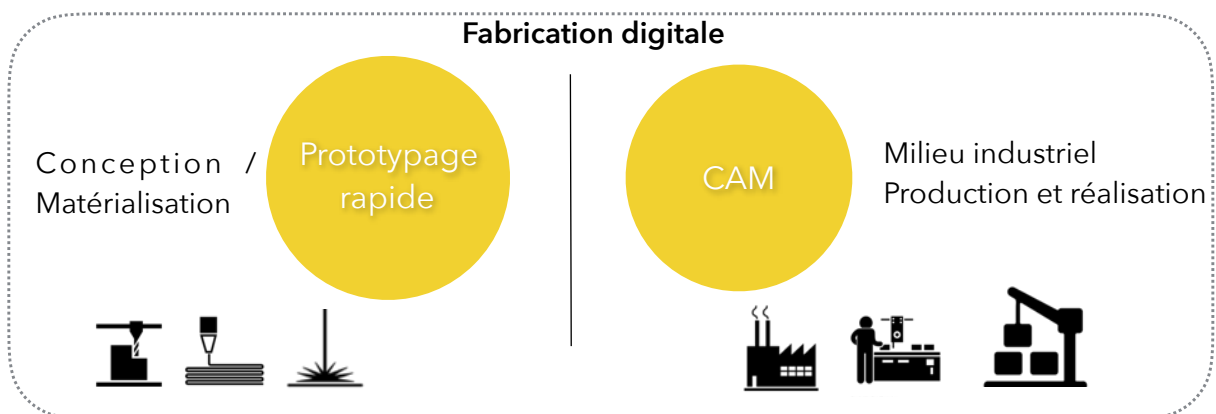


Figure 26: Schéma résumé de la section.

3. Le processus de conception en architecture et ingénierie

Après avoir exploré les enjeux et les impacts du numérique et de la fabrication digitale sur l'architecture et la manière de construire d'une manière générale, intéressons nous plus particulièrement à son influence sur le processus de conception. Pour identifier et explorer les impacts de ces nouveaux outils sur le processus de conception architecturale, il est tout d'abord nécessaire de comprendre ce qu'est le processus de conception en architecture et ingénierie. Cette partie propose dans un premier temps une définition large de la notion de conception, et présente ensuite quelques modèles rencontrés dans la littérature. Enfin, le terme « fabrication » touche par définition la matérialisation dans le processus de conception. Cette partie se termine donc par une présentation de matérialisation dans le processus de conception.

3.1. La conception

Définitions

On peut définir la conception comme un « processus dirigé qui n'existe pas encore » (Borillo & Goulette, 2002, p.51). La conception est une action qui mène à quelque chose de nouveau (Silvestri, 2009). En anglais, l'équivalence du processus de conception est le mot « design » qui n'a pas de traduction directe en français.

Le champ de recherche associé au processus de conception s'est accéléré avec l'arrivée du numérique qui a parfois perturbé les habitudes des concepteurs. Les premiers travaux de recherche sur l'activité de conception reviennent à Herbert Simon (1916-2001). Il décrit la « conception comme un système complexe qui vise à résoudre un problème mal-défini » (Simon, 1969, cité par Mougenot, 2008, p.27). Schön (1983) décrit l'activité de conception comme une conversation du concepteur avec lui même. Les travaux de recherche sur le processus de conception ont été en grande partie initiés par ces deux théoriciens. Aujourd'hui, la recherche associe la psychologie et l'informatique à l'ingénierie ou l'architecture (Mougenot, 2008).

La conception en architecture et design industriel

La conception en architecture et en ingénierie est spécifique en comparaison avec une conception artistique par exemple. Silvestri (2009) énumère leurs trois caractéristiques:

Matérialité

L'une des caractéristiques importantes de la conception en architecture et ingénierie est la réalisation d'un ou plusieurs artefacts, réalisés physiquement par des instruments. L'échelle pose alors des problèmes physiques et mécaniques spécifiques. Jean Charles Lebahar (2007, introduction), dans son livre « La conception en design industriel et en architecture », décrit l'activité de conception comme « la construction et la communication d'un modèle d'artefact ne résultant pas de la réplique d'un modèle existant ». Il définit les artefacts par des « objets artificiels, depuis les mots employés pour désigner les choses ou

communiquer ses pensées, jusqu'aux ordinateurs portables, en passant par le peigne, la peinture qui protège les murs de la maison, cette maison elle-même,... » (p. 15).

Besoins et contraintes

La seconde spécificité est la prise en compte d'un ensemble de contraintes très nombreuses. Cette caractéristique la différencie de la conception des « beaux arts » qui fait plutôt naître une idée.

Qualités formelles et spatiales

Enfin, le processus de conception en architecture ou en ingénierie doit répondre à certaines contraintes: une qualité formelle (morphologie) et une qualité spatiale en respectant les contraintes.

3.2. Les modèles de processus de conception

La conception en architecture est un processus itératif créatif qui doit répondre à une multitude de contraintes en assurant une qualité morphologique et spatiale. Certaines recherches estiment le processus de conception comme un processus de résolution de problèmes, dans lequel la solution prédéfinie n'existe pas (Silvestri, 2009).

Les modèles de processus de conception sont apparus via le design industriel. En effet, le milieu industriel a pris conscience assez rapidement de l'importance de la maîtrise de leur processus de conception de manière à respecter les contraintes définies dans le cahier des charges (budget, qualité, esthétique, fonctionnalité,...). Des recherches ont ensuite été menées pour intégrer l'innovation dans ces processus de conception dans les années 1990 (Mougenot, 2008). La recherche effectuée sur le processus de conception repose donc au départ sur des enjeux économiques, mais elle fournit par ailleurs des outils et méthodes aux concepteurs.

Des modèles de référence

Les processus de conception dans les bureaux d'études de conception de produit correspondent le plus souvent au modèle devenu une référence proposé par Pahl et Beitz (1984). Ils proposent quatre étapes avant d'aboutir à l'artéfact, représentées sur la figure 27 ci-dessous.

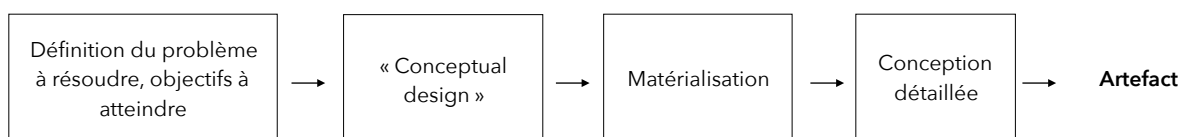


Figure 27: Les phases de conception selon Pahl et Beitz(1984).

Howard, Culley et Dekoninck (2008) proposent une comparaison des modèles de conception élaborés entre 1967 et 2006. Des 22 modèles proposés, on peut retenir les étapes communes d'un modèle à l'autre rassemblées dans le tableau 1 (Mougenot, 2008):

1	2	3	4	5	6
Analyse du besoin	Planification de la tâche	Conception générale	Définition de l'architecture du produit	Conception détaillée	Développement et production

Tableau 1: Les étapes importantes du processus de conception. (Mougenot, 2008).

Cross (2000, p.30), propose un processus de conception simple en quatre étapes, défini dans le tableau 2 ci-dessous:

1	2	3	4
Exploration	Génération	Evaluation	Communication

Tableau 2: Modèle du processus de conception proposé par Cross (2000).

Selon Ward, Liker, Cristiano et Sobek (1995), le modèle conventionnel dans le processus de conception en ingénierie repose sur le modèle de Shigley (Figure 28). Ce modèle se base sur une séquence d'étapes successives dans laquelle le concepteur commence par comprendre un problème pour ensuite synthétiser une solution. Cette solution est analysée et évaluée puis mise de côté pour en trouver une autre.

Cette première série de modèles présentés montre que le processus de conception a d'abord été envisagé comme un processus très linéaire. Les modèles élaborés plus tard, présentent le processus de conception d'une manière beaucoup moins séquencée, mais basées sur des boucles d'itérations.

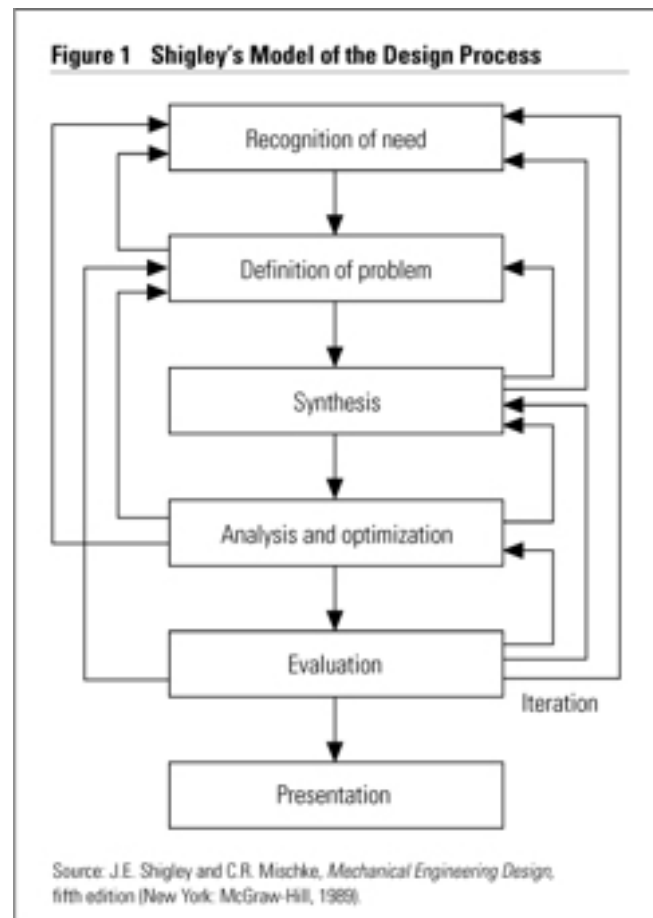


Figure 28: Le modèle Shigley (Ward & al. 1995)

Un processus séquentiel et itératif

Le processus de conception spatiale est selon Silvestri (2009) est un processus séquentiel et itératif. Il est séquentiel car de grandes étapes divisent le processus (premières idées, définition, détails). Il est aussi « itératif, récursif, constitué de boucles successives d'analyse, synthèse et évaluation » (Silvestri, 2009, p.33). De cette manière, le processus avance en fixant des solutions partielles aux sous-problèmes. Cette approche est résumée par le modèle de Zeisel (1981) (Figure 29) qui utilise la spirale pour modéliser un processus itératif et qui converge vers la solution finale.

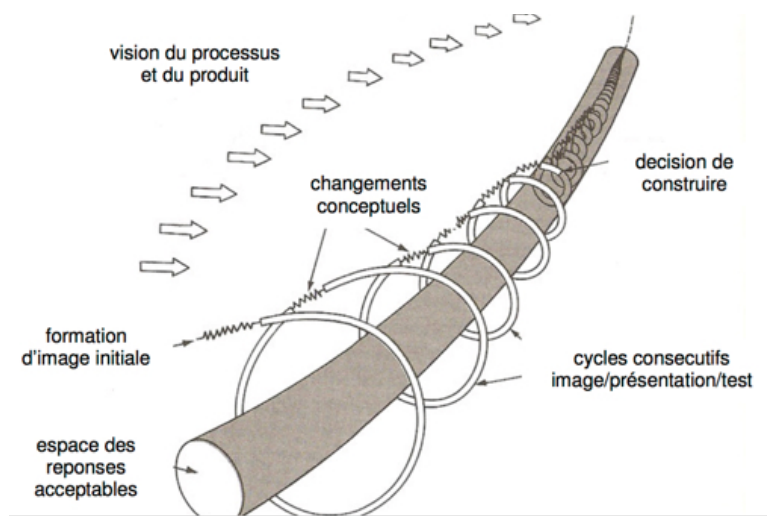


Figure 29: Modèle du processus de conception proposé par Zeisel (1981)

Plus récemment, Ulmann (2003) propose un processus de conception de systèmes mécaniques en spirale, inspiré de Zeisel, dans lequel le concept commence au centre et les premiers prototypes sont créés très tôt dans le processus. Ils vont subir une simulation et être évalués par le client. Suite à cette évaluation, les objectifs vont être ré-orientés pour aboutir à un second prototype, jusqu'à obtenir le prototype final. Cette approche est caractérisée par son aspect itératif.

Michel Conan (1990), plaçant l'architecture entre l'art et l'ingénierie, décrit le processus de conception architecturale comme une démarche heuristique. Le concepteur énonce le problème P_n ce qui l'amène à proposer une hypothèse H_n , puis à créer un moyen de vérifier l'écart expérimental E_{en} entre la prévision de l'hypothèse et la réalité observée. Le concepteur énonce alors un problème P_{n+1} (Figure 30).

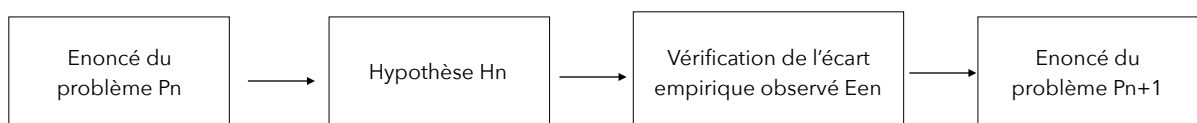


Figure 30: Modèle de processus de conception architecturale selon Conan (1990)

Robert Prost (1992) propose quant à lui, un modèle en quatre étapes majeures résumées dans le tableau 3 ci-dessous:

1	2	3	4
La formulation du problème posé par le projet architectural	La résolution du problème = proposition d'une solution architecturale	La concrétisation de la solution = matérialisation de la proposition	L'appropriation de la solution = dernière étape du processus

Tableau 3: Modèle du processus de conception architecturale proposé par Prost (1992)

Les travaux de Prost et Conan démontrent que la conception architecturale est une activité qui consiste à définir et à résoudre des problèmes multiples. Pour réduire la complexité liée à la prise en compte de paramètres très nombreux, l'architecte formule un « concept », ou un parti architectural lui permettant d'organiser sa conception autour d'un axe guide et fondateur (Prost, 1992).

On remarque donc par cette première analyse, que le processus de conception a évolué au cours de l'histoire et évolue encore aujourd'hui. Ces processus envisagés au départ de manière majoritairement séquentiels sont maintenant présentés comme des processus itératifs, visant à trouver la réponse à chaque problème un par un pour aboutir à la solution finale. Le processus itératif, d'abord utilisé dans le design industriel se caractérise donc par des boucles successives tournant autour d'un axe guide: le parti architectural. Ces boucles se réalisent en interaction avec les « matériels de la situation ainsi que sur une interaction continue entre le concepteur et les dessins et schémas qu'il produit » (Silvestri, 2009, p.33).

Bien qu'il soit itératif, le processus de conception se divise tout de même en quatre grandes étapes selon Cross (2000). Certains travaux démontrent l'importance de la première phase dite « exploratoire » sur la suite du processus, c'est l'objet de la section suivante.

L'importance des premières phases de conception

Hägglman, Honda et Yang (2013), rappellent que les décisions prises dans les premières phases de conception ont des impacts conséquents sur la conception finale. Mougnot (2008) d'autre part, met en avant l'influence des premières phases et notamment la phase exploratoire sur la suite du processus. Ullman (2003) explique en effet que plus le concepteur progresse dans le processus de conception, plus ses connaissances permettent de répondre au problème que pose la conception, mais moins sa liberté d'action sera grande (Figure 31). Le concepteur, en ayant fait certains choix, se trouve moins libre qu'au début du processus. Il met ainsi en évidence, d'une part l'importance de la première phase du processus de conception sur la suite et d'autre part, l'importance d'une bonne connaissance du problème posé dès le début du processus.

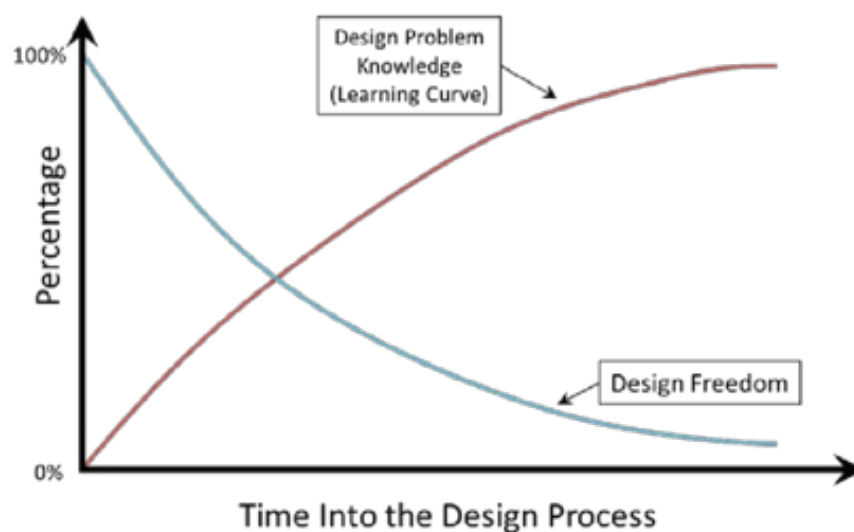


Figure 31: Graphique illustrant un paradoxe en conception (Ullman 2003, p.19)

4. La matérialisation en conception

Avant de lier les maquettes physiques avec les nouvelles technologies permettant de les fabriquer, il paraît judicieux de définir cette notion ainsi que la notion de prototype empruntée au design industriel.

4.1. Maquette physique et prototype: définitions

La maquette physique et le prototype sont deux notions employées en architecture et en design industriel pour désigner une représentation externe.

Deux représentations externes en conception

Arielli (cité par Silvestri, 2009), explique qu'une représentation est la description d'un concept, ou d'une situation qui met en évidence ses traits marquants. Pour réaliser cette description, on utilise l'artefact qui joue un rôle déterminant dans le processus (Saffin, Leclercq & Decortis, 2007). L'artefact est un moyen de représentation d'une idée conçue dans l'esprit du concepteur. Prost (1992) insiste sur le fait qu'un processus de conception amène à une solution acceptable par une interaction entre des représentations mentales et externes.

L'artefact peut prendre différentes formes. Par exemple, dans les premières phases du processus, l'esquisse à la main reste encore un outil très utilisé en conception architecturale (Saffin, Leclercq & Decortis, 2007), et de nombreuses recherches sur l'esquisse en architecture ont déjà été réalisées. Bien que l'utilisation de l'esquisse fasse parti des outils mis à disposition du concepteur dans les expériences menées, ce travail se focalise sur le rôle de la maquette physique en conception architecturale numérique.

Ces deux notions présentent cependant quelques nuances.

La maquette physique architecturale

La maquette physique est une terminologie plutôt employée en architecture. C'est par définition un artefact utilisé par l'architecte. La réalisation de maquettes est une manière d'externaliser la pensée de manière concrète et de fournir des informations au concepteur, sans interprétations (Zhang et Norman, 1994). Loyer (1974) ajoute qu'elle est un moyen de dépasser les limites de la représentation en plan. La limite de la représentation en 2D est aussi soulevée par Silvestri (2009, p.42) expliquant que « la caractéristique spécifique des maquettes par rapport au dessin est, effectivement, la plastique, c'est-à-dire l'effective tridimensionnalité matérielle, qui permet d'unifier les différentes vues bidimensionnelles (les images) dans une seule représentation » (Silvestri, 2009, p.42)

Le prototype

Etymologiquement le mot « prototype » est composé de deux parties. Le préfixe « proto- » venant du grec ancien « protos » signifie « premier » et « -type » venant du latin « typus » signifiant « modèle/image ».

Ce terme utilisé au départ dans le milieu industriel, se définit comme le premier modèle réel d'un objet qui sera modifié avant d'être produit en série. Il s'agit donc d'une représentation intermédiaire qui est amenée à être modifiée.

Selon Yang (2005), le prototype est une manière de concrétiser une idée et un moyen de l'exprimer aux autres. Un prototype peut prendre la forme d'un dessin, d'une visualisation numérique, d'un programme informatique, ou encore d'une maquette physique. En effet, Dana Cuff (1992) rappelle qu'un prototype n'est qu'une manière parmi tant d'autres pour le concepteur de réaliser une conception mentale.

.....

Enfin, maquette physique et prototype sont deux notions utilisées en conception pour définir une représentation externe physique. Une nuance les distingue tous les deux: le prototype a la spécificité par sa définition, d'être une représentation intermédiaire avant la fabrication en série. On peut considérer que c'est un type de maquette physique utilisé dans le milieu industriel.

Dans la suite de ce travail, le mot prototype servira à définir une représentation physique intermédiaire fabriquée traditionnellement ou à l'aide des machines. Les sections suivantes ont pour but de présenter les bénéfices de ces deux notions dans leur domaine respectif.

.....

4.2. La maquette architecturale: un outil aux rôles multiples

La maquette physique architecturale avec le dessin sont deux outils fondamentaux et traditionnels pour la conception spatiale et architecturale (Silvestri, 2009). Cette section détaille les différents rôles joués par la maquette physique dans le processus de conception de l'architecte. La littérature montre qu'il s'agit tout d'abord d'un outil de communication efficace et rappelle que concevoir en fabriquant a aussi des bénéfices sur la conception. Par ailleurs, la littérature aborde l'importance de la matière dans le processus de conception.

Un outil de communication

Une caractéristique particulière de la maquette physique, rendue possible par sa tridimensionnalité, est une expression de l'espace facilement compréhensible par une personne sans compétences en architecture. Pendant des générations, elle a servi d'intermédiaire entre des conceptions complexes et les ouvriers du bâtiment. Michelangelo s'est servi de la maquette physique en tant qu'outil de communication pour décrire les techniques de construction et les formes des espaces internes avec le client et les maçons (Millon, 1994 cité par Sass & Oxman, 2005). Palladio au 16^e siècle utilisait aussi des maquettes intermédiaires en bois à l'échelle 1:1 pour expliquer le bâtiment aux maçons (Burns, 1991).

La maquette physique est souvent utilisée en supplément du dessin, car elle est plus révélatrice du design conçu et facilite la compréhension pour le client. En effet, Loyer (1974, p.57) rappelle que « la plupart des gens ne savent pas lire un plan d'architecture ou une coupe car il s'agit de représentation théoriques ». De plus, certaines géométries sont plus facilement lisibles en maquette physique qu'avec d'autres moyens (Gibson, Kvan & Wai Ming, 2002). Elle permet aussi dans les premières phases de conception de communiquer au sein d'une même équipe de concepteurs.

La maquette physique est donc un outil de communication traditionnel pour l'architecte. La littérature s'intéresse surtout à son rôle d'outil d'aide à la conception. La section suivante porte sur le bénéfice de la fabrication.

Un outil de conception par la fabrication et la simulation

Kolb (1984) défend un apprentissage par l'expérience. Concrétiser des idées par la matière oblige le concepteur à passer par des phases d'expérimentations actives et des phases d'observations passives. Cette vision rejoint celle de Gibson et al. (2002) qui expliquent qu'en assemblant des éléments en trois dimensions cela permet au concepteur de comprendre la conséquence spatiale de ses dessins en 2D. De plus, ils ajoutent que la maquette physique peut-être fabriquée de manière à pouvoir la désassembler dans le but de révéler les éléments et les espaces intérieurs qu'elle contient. Enfin, la maquette physique peut être soumise à des tests physiques de manière à évaluer la structure, l'acoustique, la ventilation, la lumière, etc. ... (Gibson & al. ,2002). L'apprentissage de l'architecture par la réalisation physique a débuté dans les années 1920 dans des écoles célèbres telles que le Bauhaus (Maniaque, 2017).

Un outil de conception par la matière

Notant qu'aujourd'hui l'architecture a tendance à donner trop d'importance à la vue, certains rappellent l'importance de la matière pour le processus de conception. Modeen (2005) par exemple, fait le constat qu'actuellement l'informatique et le CAD ont un impact fort sur les pratiques en architecture. Il rappelle que la perception des différents sens joue un rôle important sur la conception. L'étude qu'il a menée montre que les correspondances cognitives entre les gestes, l'image, le son et les symboles nous aident à construire une intuition. De manière évidente, la maquette physique possède un potentiel tactile que la maquette numérique ne peut donner.

D'autre part, « le travail sur ordinateur inhibe la création car il fait appelle à moins de sensations. L'ordinateur crée une distance entre le créateur et l'objet » (Pallasmaa, 2005, p. 13). Or, il a été prouvé que plus les sens sont sollicités meilleure est la perception d'un espace. De même, Jacques Herzog estime que «lorsqu'on voit depuis le début des images virtuelles, on ne peut pas savoir quel sera le rapport avec la réalité physique. Dans ce sens, les maquettes sont encore des témoignages d'une compréhension archaïque du corps et de la réalité» (Herzog, 2004).

La peur de l'éloignement entre l'architecte et la matière avait déjà été évoquée par A.Loos en 1910 dénonçant la perte de la matérialité. De même, Le Corbusier (1930) exprimait sa réticence à l'égard du dessin et dénonçait le côté séduisant du papier. Enfin, Pallasmaa (2005, p.43) dénonce « le privilège accordé au sens de la vue sur les autres corps ».

On constate donc que la maquette physique en architecture est depuis longtemps reconnue comme un outil indispensable pour une conception de qualité. On constate aussi que des réticences ou des obstacles à son utilisation ont existé par le passé, et s'accroissent encore aujourd'hui par le développement de l'informatique. Ces obstacles sont détaillés dans la section suivante.

Limites de la maquette physique

Loyer (1974) attribue certaines limites à la maquette d'architecture. En effet, il explique que la maquette physique s'attache essentiellement aux volumes et non aux espaces. Il note en effet qu'aux échelles courantes des maquettes, elles permettent aisément de vérifier la

cohérence des volumes, mais permet difficilement de se rendre compte des espaces intérieurs ou extérieurs. Il est en effet impossible d'y pénétrer et de percevoir l'espace. Il conseille de se fier à l'expérience. Un autre défaut de la maquette physique d'architecture soulevé par Loyer (1974) est sa tendance à fausser notre vision à l'échelle humaine au sens où nous la regardons par le haut, d'un point de vue aérien.

Par ailleurs, la maquette physique reste un outil chronophage ce qui freine souvent son utilisation. Certains concepteurs en architecture ne se laissent pas le temps de travailler à l'aide de maquette, excepté lorsqu'elles sont simples à réaliser (Gibson & al. 2002).

La maquette est donc avant tout un outil de conception au service de l'architecte pour externaliser des concepts mentaux physiquement. Elle incite l'utilisation de la matière et oblige le concepteur à fabriquer ce qu'il dessine. On peut maintenant s'intéresser aux recherches effectuées dans le design industriel sur la notion de prototype.

4.3. Les rôles du prototype en design industriel

Après avoir présenté les rôles joués par la maquette physique en architecture, il est intéressant d'étudier les recherches effectuées sur la notion de prototype dans le processus de conception. Cette section porte donc un regard sur le prototype dans le champ du design industriel, champ pour lequel les travaux de recherche concernant cette notion sont essentiellement effectués.

Les bénéfices du prototypage sur la conception

Yang (2005) montre que le processus de construction d'un prototype physique permet la conception de solutions que les autres moyens de représentation ne permettent pas. En effet, un dessin 2D ou un modèle 3D n'apporte pas la même information au concepteur. Par exemple, le concepteur coupant une plaque de métal, obtiendra des informations qu'il n'aurait pas obtenu sur un modèle numérique 3D. En manipulant la matière, et en la testant physiquement, le concepteur peut s'orienter vers des choix de conception qu'il n'aurait pas envisager sans la matière (Yang, 2005).

De plus, Yang (2005) explique que les concepteurs utilisant une conception par maquette physique, proposaient plus d'idées fonctionnelles et faisables que ceux utilisant le uniquement le dessin (Viswanathan & Linsey, 2012). Notons que cette classification est basée sur une conception en milieu industrielle, dont l'objectif est de produire en série.

En conception industrielle, l'entreprise japonaise Toyota a adopté un modèle de conception qui s'écarte du modèle séquentiel et qui paraissait au départ incohérent aux yeux des autres entreprises. Cette stratégie itérative s'est avérée finalement payante. En effet, leur stratégie de développement présente plusieurs paradoxes. Elle est basée sur une prise de décision tardive et une exploration d'un maximum de concept en produisant un nombre excessif de prototypes. Ward et al. (1995) nomment cette stratégie « second Toyota's paradox ». En comparaison avec d'autres constructeurs automobiles japonais, Toyota réalise 10 à 50 prototypes du pot d'échappement de leurs futures voitures contre une moyenne d'un prototype pour les autres compagnies (Ward & al., 1995). Leur

stratégie permet de développer des véhicules de meilleure qualité plus rapidement, et à moindre coût en comparaison avec leurs concurrents japonais (Liker & Morgan, 2006).

De même, l'approche de fabrication proposée par l'entreprise américaine IDEO, basée sur le slogan « fail early to succeed sooner » a été largement adoptée par les industries comme stratégie dans les premières phases du processus de conception (Häggman & al., 2013). En effet, Häggman et al. (2013) rappellent qu'identifier et résoudre les problèmes d'un projet le plus tôt possible permet de gagner temps et argent.

Le rôle du prototype pour le concepteur.

Houde et Hill (1997) expliquent que la notion de prototype est communément associée à un outil permettant de représenter les différentes étapes d'une conception et d'explorer les options possibles. Il est souvent caractérisé par sa « résolution », liée au niveau de détail accordé au prototype, et par sa « fidélité », liée à sa correspondance avec le design final. Ils constatent par ailleurs que le prototype est souvent lié à l'outil et la manière de le réaliser, et proposent une autre manière de le caractériser. La définition qu'ils proposent du prototype est « tout moyen d'expression d'une idée de conception, excluant le moyen utilisé pour le réaliser¹³ » (Houde & Hill, 1997, p.3).

Ils proposent un modèle définissant le rôle d'un prototype basé sur trois aspects (Figure 32) :

- « Role », caractérisant la fonction de l'artefact lorsqu'il sera utilisé par l'utilisateur;
- « Look and feel », caractérisant ce que l'utilisateur va ressentir au contact du produit;
- « Implementation », caractérisant la technique utilisée pour que le produit fonctionne;

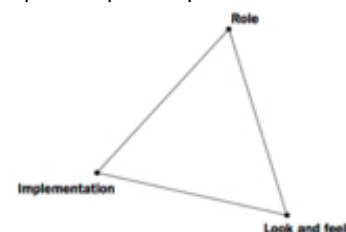


Figure 32: Modèle du rôle du prototype (Houde & Hill, 1997, p.3)

Si le prototype permet d'avoir simultanément un retour sur le rôle, le fonctionnement et l'aspect, ils considèrent qu'il s'agit d'un prototype « intégré » (Figure 33)

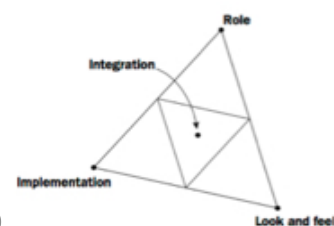


Figure 33: Prototype intégré sur le triangle (Houde & Hill, 1997, p.3)

La recherche consistait à analyser 12 prototypes différents et les placer sur le modèle triangulaire en trois dimensions (Figure 34).

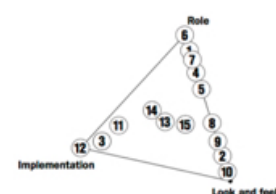


Figure 34: Variété prototypes produits par les concepteurs (Houde & Hill, 1997, p.3)

¹³ Traduction de « any representation of a design idea, regardless of medium. »

Le résultat de leur recherche montre qu'il existe une grande variété de prototypes, aux rôles variés, parfois très différents.

.....

L'enjeu d'une production en série impacte donc les rôles joués par les prototypes. La différence d'échelle de l'objet créé en design industriel et en architecture engendre aussi des enjeux différents. La matière joue un rôle important dans les deux domaines mais l'aspect itératif est assez spécifique au prototype. Des travaux de recherches ont tenté de classifier différentes typologies de maquettes ou de prototypes. Ces catégories sont présentées dans la partie suivante

.....

4.4. Les typologies de maquettes et prototypes

Après avoir présenté les rôles de la maquette et du prototype dans leur champ d'utilisation respectif, cette section détaille des catégorisations des maquettes ou des prototypes rencontrées dans la littérature. Elle commence par présenter celles concernant la maquette puis continue avec les catégories du prototype.

Les catégories de maquettes en architecture

La maquette physique en architecture joue différents rôles. Ryder, Ion, Green, Harrison et Wood (2002) proposent une classification des maquettes physiques en architecture en trois catégories:

- **La maquette de faisabilité:** elle est généralement réalisée en carton ou en mousse et permet de communiquer plus facilement avec le client. Cette maquette donne une idée de la forme globale mais comporte peu de détails.
- **La maquette « planning »** est réalisée pendant l'élaboration des plans, où un niveau de détail est déjà plus élevé mais aucune texture n'est ajoutée.
- **La maquette finale** est la maquette utilisée pour présenter le projet aux clients. Elle inclut la topographie, la texture, etc...

Par ailleurs, Silvestri (2009) propose une classification différente en trois catégories:

- **Les maquettes de communication** permettant de présenter au client le projet.
- **Les maquettes de conception**, utilisées comme outil de travail par le concepteur de manière à percevoir la spatialité.
- **Les maquettes mécaniques** servent à identifier la forme optimale d'un point de vue mécanique. Elles sont en revanche de moins en moins utilisées et remplacées par des modèles numériques (Silvestri, 2009).

La première classification proposée, reflète le processus séquentiel de la conception architecturale mis en évidence précédemment qui se déroule en plusieurs grandes étapes. Les maquettes réalisées sont de plus en plus détaillées lorsque le processus avance.

Alors que dans la première classification l'auteur considère essentiellement la maquette comme un outil de communication, la classification proposée par Silvestri est basée sur les différents rôles joués par les maquettes.

Ces classifications ne font cependant pas clairement référence à notion d'échelle. Or en architecture, l'échelle de la maquette physique a beaucoup d'importance. Les petites échelles évaluent la forme, les échelles moyennes évaluent la spatialité et les grandes échelles étudient les détails (Sass & Oxman, 2006). Cette importance de l'échelle apparaît aussi dans la maquette numérique qui nécessite des données différentes en fonction de l'échelle (Sass & Oxman, 2006).

Les catégories de prototypes en design industriel

Ullman (2003, p.117), ingénieur en conception mécanique, propose une classification différente des prototypes en quatre typologies. Cette classification est liée aux rôles du prototype et à l'étape dans le processus de conception :

- Le type « **proof-of-concept** » est utilisé par le concepteur pour déterminer la direction qu'il doit prendre au **début du processus** de conception pour bien répondre au besoin du client.
- Le type « **proof-of-product** » permet de vérifier que le concept peut se matérialiser et évaluer la faisabilité.
- Le type « **proof-of-process** » permet de vérifier si la géométrie, la manière de produire et le matériau choisi permet d'avoir le résultat escompté.
- Le type « **proof-of-production** » permet de démontrer que le processus complet de fabrication fonctionne de manière efficace.

Les travaux de Sommerville (1995) aboutissent à une classification en trois catégories :

- le prototype « **jetable** » créé au tout début d'un processus, il est souvent grossier et permet de clarifier les attentes d'un projet.
- Le prototype « **évolutionnaire** » qui traverse plusieurs étapes dans le processus.
- Le prototype « **incrémentale** » pour modifier un produit déjà existant.

Les deux classifications présentées ci-dessus, mettent en évidence l'aspect séquentiel du processus de conception dans lequel le prototype devient de plus en plus précis. La première classification proposée par Ullman (2003) décrit les prototypes comme des « preuves », et aborde ainsi un nouveau rôle non mentionné par Houde et Hill (1997). Le prototype peut être considéré comme une preuve que l'objet est matérialisable, faisable. Cette description pourrait s'associer à la « maquette de faisabilité » proposée précédemment par Ryder et al. (2002) mais ceux-ci n'évoquent pas la notion de « preuve ».

Des liens entre la classification de Sommerville (1995) et celles présentées pour la maquette physique peuvent être faits. Le prototype jetable s'apparente à la maquette de faisabilité. La maquette de conception est aussi un prototype « évolutionnaire ».

Les catégories de maquettes sont soit liées à leurs rôles soit à leurs place dans le processus de conception. Les types et les rôles des maquettes évoluent au cours du processus.

La maquette et le prototype sont deux notions proches. Ces deux outils de conception et de communication traditionnel du concepteur aux rôles prouvés et multiples sont utilisés différemment en architecture et en design industriels du fait des enjeux générés par l'échelle et la production en séries. Il existe plusieurs typologies de maquettes ou prototypes que les concepteurs utilisent à différents stades dans le processus de conception.

En revanche dans un contexte où la conception doit se faire toujours plus rapidement et où le numérique favorise la visualisation cet outil a tendance à être mis de côté par les architectes. C'est pourquoi, les processus industriels de matérialisation présentent un intérêt pour l'architecture. Les méthodes utilisées pour la matérialisation des prototypes peuvent s'appliquer aussi bien à l'architecture qu'au design industriel. Le prototypage rapide appliquée à l'architecture présente ainsi tout son intérêt. Des travaux de recherches sur son intégration au processus de conception architecturale ont déjà été effectués et la section suivante a pour but de les présenter.

5. La matérialisation numérique en conception architecturale

Cette section aborde la matérialisation numérique en conception architecturale. Elle a pour objectif d'explorer les travaux déjà réalisés à ce sujet et les résultats présentés.

Les techniques de prototypage rapide sont nombreuses et entrent dans des technologies pointues. Les grandes familles utilisées couramment aujourd'hui ont été présentées à la section (2.2.) de ce mémoire. Les autres techniques ne seront pas abordées dans ce travail. Toutefois Streish (1991), Ryder et al. (2002), ou Gibson et al. (2002) les présentent de manière détaillée.

Les recherches effectuées sur le thème du prototypage rapide, abordent les 3 thèmes ci-dessous :

- La rapidité de matérialisation : un retour à la matière
- Les améliorations potentielles pour « constructibilité »
- L'amorce d'un continuum conception-fabrication par le numérique

5.1. Un retour à la matière

Aujourd'hui la réalisation des maquettes physiques par des outils numériques permet d'une part de matérialiser des formes complexes et d'autre part de servir d'intermédiaire entre la conception et la construction (Sass & Oxman, 2006). Gibson et al. (2002) considèrent le prototypage rapide comme un outil complémentaire à l'usage du numérique permettant des formes complexes. L'objectif principal du prototypage rapide serait, selon eux, de réduire le temps et les compétences nécessaires pour matérialiser une forme, et un moyen d'utiliser les données numériques à toutes les étapes de la conception. Le prototypage rapide peut être ainsi considéré comme un catalyseur de matière au vu de sa rapidité et de son caractère immédiat (Neeley, Lim, Zhu & Yang, 2013).

5.2. L'amorce d'un continuum conception-fabrication par la méthode DDF (Digital Design Fabrication)

Sass et Oxman (2006) proposent une méthode de conception numérique intégrant les technologies du prototypage rapide. Ils partent du constat qu'aujourd'hui la conception/construction par l'outil numérique tombe dans deux catégories. La première est la catégorie de la visualisation, et la production d'image ou de vidéos. La seconde est la catégorie de l'information où les modèles numériques contiennent toutes les informations nécessaires à la construction. Ils font ici référence aux maquettes BIM.

La caractéristique commune de ces deux approches est qu'elles considèrent la construction comme une étape dans le projet d'architecture et non comme le résultat. La méthode DDF (Digital Design Fabrication) proposée par Sass et Oxman (2006) implique l'utilisation des outils numériques et de la matière très tôt dans le processus, tout en

gardant une flexibilité au changement suite à une évaluation visuelle et un test de performance. L'approche envisagée intègre trois composantes:

- atteindre une conception plus flexible que la conception traditionnelle (notamment par l'utilisation de la modélisation paramétrique);
- exploiter la précision permise par les modèles numériques;
- intégrer des connaissances sur les techniques de construction.

La méthode DDF fusionne deux séquences du processus (la modélisation 3D et la fabrication) en une seule. Cette méthode engendre une multitude de prototypes pouvant être construits à un niveau de détail élevé. Elle permet, d'autre part, d'explorer numériquement et physiquement des formes parfois très complexes (Figure 35). Enfin, elle fournit une multitude de solutions possibles prenant en compte, même très tôt dans le processus de conception, la structure et la construction. Cette méthode exploite donc les bénéfices du prototypage et explore une multitude de solutions par la matière.

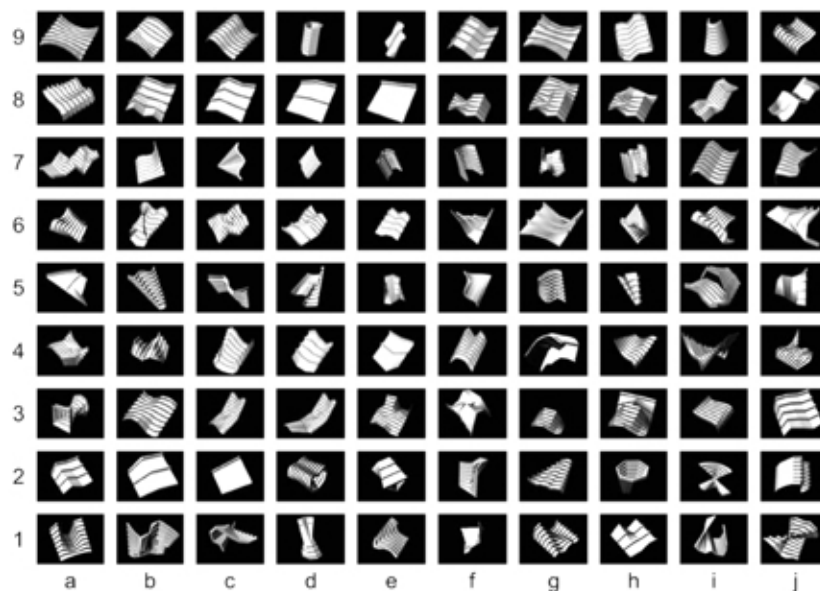


Figure 35: 90 prototypes différents explorant les variations de forme (Sass & Oxman, 2006)

Cet exemple de méthode d'intégration du prototypage rapide en conception architecturale aspire tout comme les autres méthodes présentent dans la littérature, à générer une continuité progressive entre les étapes du projet architectural à travers un continuum numérique de la conception à la matérialisation puis à la construction réelle.

5.3. Le prototypage rapide vers une conception plus constructible?

Sass et Oxman (2006) considèrent que la conception-fabrication numérique augmente la probabilité de concevoir une architecture plus constructible à tout niveau de complexité. Ils montrent notamment que le prototypage rapide permet de lier très tôt dans le processus de conception, le concepteur avec la matière, le modèle géométrique et les machines. Cette manière de travailler implique la prise en considération des caractéristiques du matériau et des contraintes de la machine, en phase initiale du processus (Couwenberg, 2015). L'interaction précoce du concepteur avec ces contraintes l'inscrit dans un environnement proche du monde de la construction (Sass & Oxman, 2006). La méthode DDF propose une étape intermédiaire entre l'étape conceptuelle et le BIM. Cette étape est nommée DIM (Design Information Models). Les maquettes DIM sont des maquettes réalisées en prototypage rapide et composées d'éléments assemblés à plusieurs échelles.

La maquette DIM est associée au champ du prototypage rapide, et la maquette BIM est associée au champ de la construction.

Selon Sass et Oxman (2006), la méthode DDF produit deux typologies d'artefacts. Le prototype monobloc et le prototype contraint par les méthodes de construction du monde réel de la construction. Les premières maquettes, de petites échelles, sont imprimées pour la forme globale extérieure, autrement dit l'enveloppe, et moins pour l'espace intérieur ou pour les assemblages. La seconde typologie de prototype contient un niveau de détail beaucoup plus élevé et des informations sur la manière de construire (Figure 36). Cette deuxième famille de prototypes nécessite aussi un niveau de détail élevé dans le modèle paramétrique ce qui prend beaucoup plus de temps. Il permet cependant une évaluation plus riche du processus de construction, des détails, des assemblages, et des espaces intérieurs (Sass & Oxman, 2006).

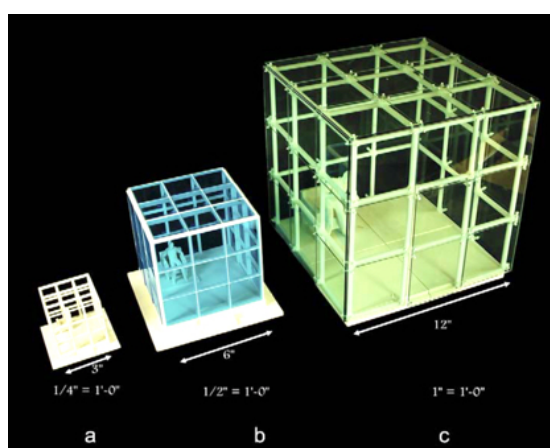


Figure 36: Typologies de prototypes réalisés par la méthode DDF (Sass & Oxman, 2006)

La seconde famille de prototypes générés par la méthode DDF engendre une prise en compte de la « constructibilité ». Dans cette seconde famille de prototypes, la matérialisation est réalisée par l'assemblage d'une multitude d'éléments différents à l'image d'un bâtiment réel. Le prototype C présenté dans la figure 36 ci-dessus, a

nécessité 5 types d'assemblages différents qui ont été modélisés et fabriqués par prototypage rapide (figure 37 ci-dessous).

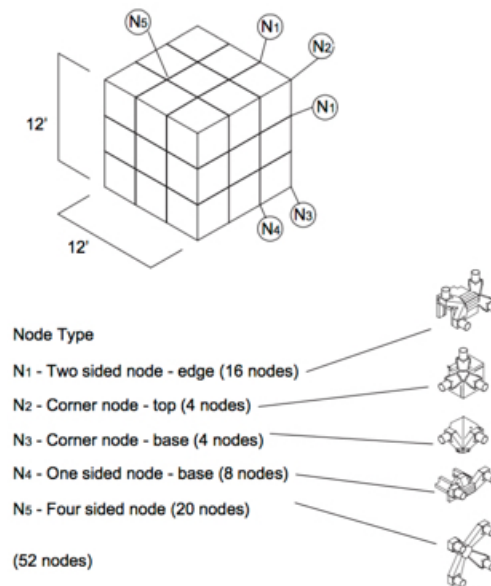


Figure 37: 5 assemblages réalisés par la méthode DDF (Sass & Oxman, 2006)

Sass et Oxman (2006) estiment que la méthode DDF augmente la faisabilité car elle pousse à la réalisation d'assemblages efficaces et facilement réalisables dans la réalité. En effet, l'assemblage est soumis aux mêmes critères que dans le milieu industriel à savoir, la résistance, la méthode de fabrication, et l'apparence. Il propose plusieurs schémas de matérialisation utilisant le prototypage rapide. Prenons l'exemple de la découpe laser (figure x) :

- a/ réparation d'un modèle 3D
- b/ implémentation des caractéristiques du matériau (épaisseur)
- c/ réglages de la machine

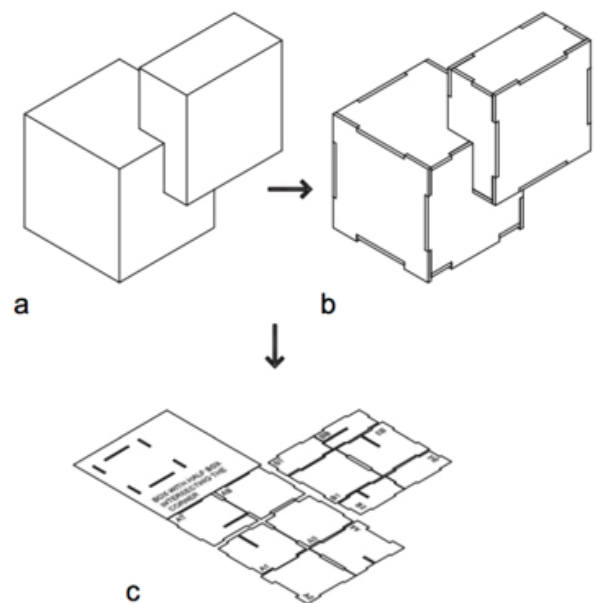


Figure 38: Modèle de matérialisation par découpe laser (Sass, 2006)

Ainsi, les travaux de recherches effectués sur l'intégration de la fabrication digitale dans le processus de conception architecturale visent à répondre aux enjeux soulevés par le numérique en architecture aujourd'hui. D'une part, par la rapidité de matérialisation elle répond à une limite de la maquette traditionnelle de l'architecte. D'autre part, elle répond à la rupture générée par le numérique sur les morphologies non-standards. Enfin, elle s'inscrit dans le rétablissement d'une cohérence et une continuité entre conception et construction. Des limites à l'intégration de ces nouveaux outils existent aujourd'hui et sont mentionnées dans l'état de l'art: la maîtrise des logiciels, la rapidité relative, les contraintes des machines, etc. ...

6. Résumé

La revue de l'état de l'art porte finalement sur trois grands champs de recherche:

- Le numérique en architecture
- Le processus de conception
- La matérialisation dans le processus de conception

Ce travail s'inscrit à l'union de ces trois domaines comme l'illustre le schéma suivant.

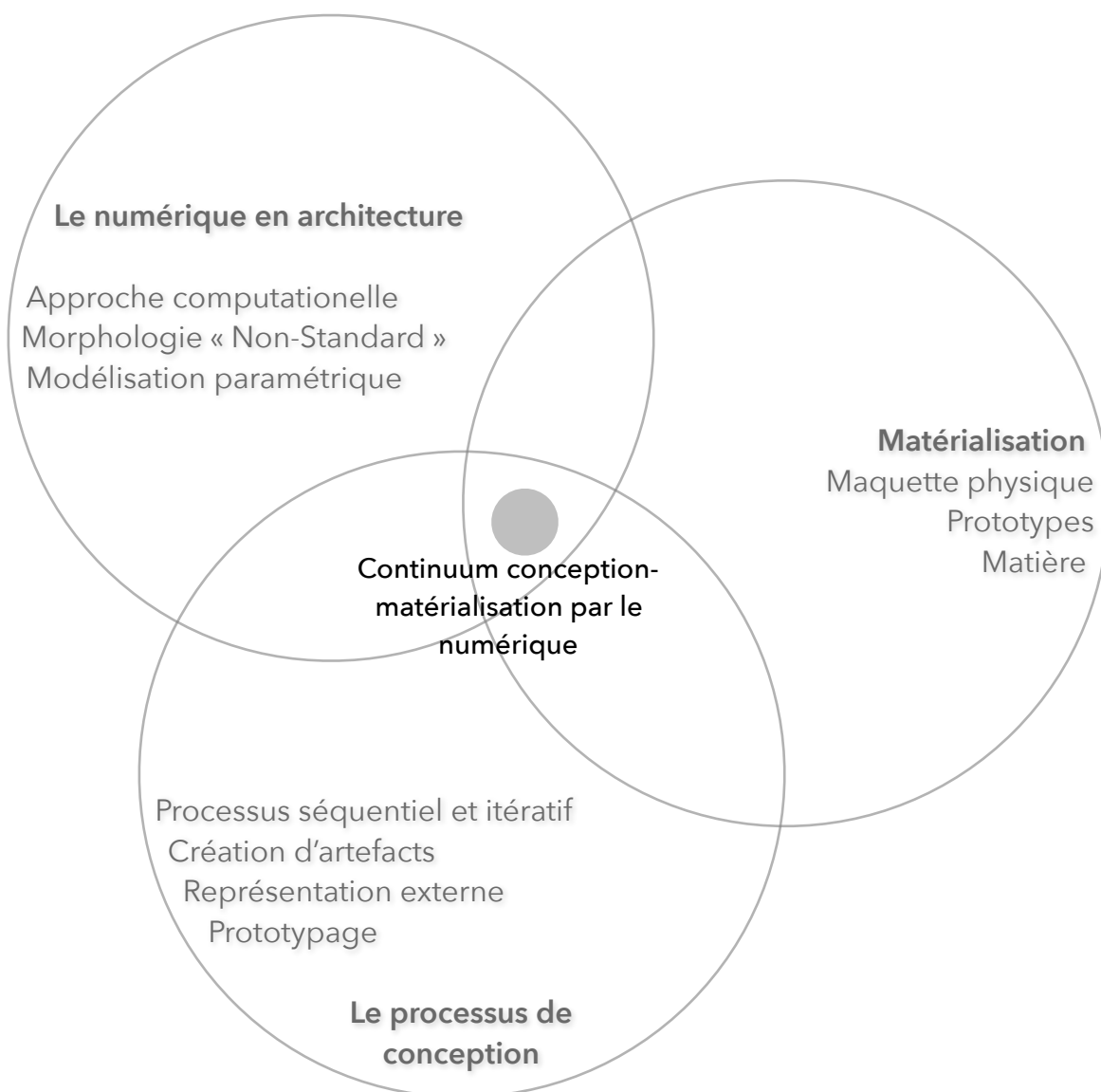


Figure 39: Schéma de situation de la recherche

7. Question de recherche

L'état de l'art présenté précédemment a permis tout d'abord de mettre en lumière un premier aspect du numérique: la rupture créée par la génération de formes complexes et la réalité constructive. Il a permis par ailleurs, d'expliciter un second aspect du numérique opposé au premier, et basé sur la continuité entre la conception et la réalisation permise par le numérique à l'échelle du bâtiment. Cette continuité, déjà amorcée à l'échelle réelle du bâtiment peut-elle aussi s'observer à l'échelle de la maquette du concepteur? C'est la première question de recherche de ce travail.

1. Le continuum numérique de conception-fabrication peut-il avoir lieu à l'échelle de l'artefact?

Les travaux de recherches présentés abordent essentiellement les bénéfices du prototypage rapide dans le processus de conception architecturale. Une question qui se pose concerne son intégration au processus et en particulier les obstacles à son intégration. Cela nous amène à la question suivante:

2. Quels sont les freins à l'intégration du prototypage rapide dans le continuum numérique conception-fabrication?

Enfin, la revue de la littérature a permis de constater une utilisation variée et croissante du numérique dans le processus de conception architecturale. Parallèlement, les bénéfices de la présence de matérialité dans un processus de conception a aussi été démontré. Afin d'étudier le rôle de la matière en conception numérique, la question suivante se pose:

3. La maquette physique a-t-elle un rôle spécifique dans un processus de conception architecturale numérique?

Les réponses à ces questions de recherche sont étayées dans la partie « discussion » présentée à la fin de ce travail.

ÉTAT DE L'ART

MÉTHODOLOGIE

TRAITEMENT DES DONNÉES

RÉSULTATS

DISCUSSION

MÉTHODOLOGIE

Pour répondre à ces questions, j'ai choisi d'analyser les processus de conception d'étudiants en architecture confrontés à ces changements récents. L'objectif de cette démarche est de comprendre l'appropriation de l'outil numérique en parallèle de la maquette physique en conception architecturale et d'étudier l'impact du numérique sur l'utilisation de la maquette physique. Ce travail s'inscrit dans une démarche de recherche qualitative et exploratoire. Pour y parvenir, j'ai opté pour une méthodologie basée sur l'observation d'étudiants en situation de conception numérique ayant à disposition les outils de prototypage rapide. Afin de confronter cette vision extérieure avec le ressenti du concepteur, un questionnaire a aussi été soumis aux personnes observées.

Cette section méthodologique se divise en trois parties:

- les notions théoriques liées à l'observation
- la théorie relative à l'élaboration d'un questionnaire
- la méthode appliquée à la récolte et au traitement des données

1. La théorie de l'observation

1.1. Définitions

L'observation en situation est définie par Martineau (2005, p.6) comme « un outil de cueillette de données où le chercheur devient le témoin des comportements des individus et des pratiques au sein des groupes en séjournant sur les lieux même où ils se déroulent ». L'observation est considérée par Baker (2006) comme une méthode de recherche complexe attachée au champ de l'ethnographie. L'objectif de cette méthode selon Baker (2006) est de pouvoir observer les personnes dans leur environnement quotidien afin de comprendre le fonctionnement des choses du point de vue de ces personnes.

L'observation peut se classifier en deux grandes catégories selon Blondin (2004): l'observation systématique et l'observation ethnographique.

L'observation systématique

L'observation systématique définie par Blondin (2004) est une observation qui suit un protocole très précis et est basée sur une unité d'observation claire. Ce protocole de collecte de données est souvent réalisé à l'aide de grilles complexes, d'un chronomètre, et des techniques permettant un contrôle le plus complet possible de l'observation. Cette méthode nécessite souvent l'intervention de plusieurs observateurs afin de la contrôler au mieux. Elle a pour avantage de fournir des résultats très fins et rigoureux mais écarte la mise en contexte. Par ailleurs, elle peut être ressentie comme intrusive par l'observé et ne favorise pas la communication entre le chercheur et l'individu étudié.

L'observation ethnographique

L'observation ethnographique est une approche tout à fait différente. La validité des données récoltées dépend du temps passé sur le terrain et de l'investissement personnel de l'observateur (Blondin, 2004). Cette méthode invite le chercheur à ne pas préparer des grilles d'observation trop catégorisées avant sa présence sur le terrain, mais l'invite à les construire progressivement sur le terrain. Elle se caractérise par une récolte de données telles que des croquis, des vidéos, des photographies. Enfin, cette méthode soumet l'analyse aux personnes observées de manière à confirmer la validité écologique des données (Bondin, 2004). L'observation ethnographique implique une durée d'observation longue mais le chercheur est parfois amené à l'utiliser sur un temps plus court. Cela permet tout de même de récolter des données intéressantes qu'une autre méthode n'apporterait pas (Blomberg, Burrell & Guest, 2003).

Avant de choisir entre l'une de ces deux méthodes, il paraît important de s'intéresser plus en détail à la notion d'ethnographie.

1.2. L'ethnographie

Pour certains, l'ethnographie est utilisée de manière courante pour définir la recherche qualitative. Pour d'autres, elle ne définit pas tant une méthode mais le point de vue utilisé pour analyser l'activité des individus (Blomberg & al., 2003). Selon Riche, Simpson & MacDonald (2003, p.1), l'ethnographie est décrite comme « un mouvement entre l'anthropologie et la sociologie qui se focalise sur l'observation des personnes en situation naturelle »¹⁴. Les deux paragraphes suivants expliquent ces deux notions.

- L'ethnographie est une déclinaison de l'anthropologie, la science qui étudie l'être humain. Spradley (1980) définit d'ailleurs l'ethnographie comme un travail de description d'une culture avec l'objectif principal de comprendre une autre manière de vivre de son propre point de vue.
- L'ethnographie est une déclinaison de la sociologie, la science des relations. Chatman (1992) définit l'ethnographie comme une méthode qui permet au chercheur d'avoir un point de vue interne, à travers l'observation et la participation, de membres d'une société appartenant à un cadre social donné.

Cette méthode de recherche s'est donc d'abord attachée à l'étude de communautés non occidentales. Aujourd'hui l'ethnographie touche aussi les sociétés industrialisées, dans les lieux de travail, les maisons de retraite, l'intégration des nouvelles technologies (Blomberg & al., 2003). Elle consiste à rassembler des informations sur le lieu même où se déroule l'activité observée et peu connue du chercheur. Les ethnographes partent en effet du principe, que les individus étudiés sont limités dans la description de leur activité si ils ne sont pas dans leur environnement habituel. (Blomberg & al., 2003)

L'ethnographe fournit ainsi, par son étude, une description claire de l'activité des individus observés et utilise des méthodes de retranscription pour éviter des erreurs

¹⁴ Traduction de « Ethnography is described as a movement between anthropology and sociology that focus on observing people in their "natural" environment. »

d'interprétation (Blomberg & al., 2003). Il est concerné essentiellement par le déroulement de l'activité et les événements qui se passent mais n'a pas pour mission d'évaluer l'efficacité de l'individu observé dans sa tâche (Blomberg & al., 2003). En effet, les ethnographes ont l'intime conviction qu'avant de pouvoir changer et améliorer une situation, il est nécessaire de la comprendre (Blomberg & al., 2003).

1.3. Pourquoi l'observation?

J'ai choisi l'observation ethnographique comme méthodologie de travail en me basant sur les travaux déjà réalisés dans le domaine de la recherche en activité de conception. La méthode de l'observation ethnographique a déjà été largement employée dans les métiers de la conception et s'est montrée efficace dans les années 1990 quand l'ordinateur s'est installé dans le monde du travail (Blomberg & al., 2003). Ces dernières années, les chercheurs, les concepteurs travaillant sur le thème HCI (Human Computer Interaction) s'intéressent particulièrement à l'ethnographie pour fournir une vision des relations entre le concepteur et les artefacts qu'ils conçoivent et utilisent (Blomberg & al. 2003). Ces travaux démontrent donc que l'activité de conception est un phénomène en partie observable (Riche & al., 2003), (Burns & Vicente, 2000), (Safin & al., 2007). La formation ingénieur-architecte que j'ai suivie propose par ailleurs un séminaire d'analyse du processus de conception basé en partie sur l'observation du concepteur en situation de travail. J'ai ainsi considéré qu'il s'agissait d'une méthode adéquate pour répondre aux questions de recherche mentionnées précédemment.

Par ailleurs, un des principaux avantages de l'observation par rapport à d'autres méthodes de récolte de données est l'obligation pour le chercheur de s'imprégner in situ des pratiques des personnes observées (Blomberg & al., 2003). Cela évite les divergences entre ce qui est dit et ce qui est fait réellement, phénomène qui peut arriver lors de la réalisation d'interviews par exemple.

Les limites de l'observation

Le choix d'une méthode par l'observation implique une présence et une implication importante du chercheur sur le terrain d'étude (Martineau, 2005). D'autre part, la personnalité du chercheur joue un rôle sur l'observation car elle peut « influencer la façon dont le chercheur sera perçu par les sujets observés et donc sur les attitudes et comportements qu'ils adopteront non seulement envers lui mais aussi sur ce qu'ils lui donneront à voir » (Martineau, 2005, p.8). Il faut donc veiller à ce que le chercheur soit « compatible » avec le milieu de recherche. L'observation ethnographique nécessite la confiance et la participation des personnes étudiées (Blomberg & al., 2003). Enfin, la recherche qualitative est souvent critiquée par son manque de fiabilité. C'est pourquoi les chercheurs utilisant cette méthode, insistent sur la « validité écologique » des résultats, c'est à dire la validation des résultats obtenus par les observés eux-mêmes.

1.3. La méthodologie de l'observation

Quatre tâches fondamentales

Pour réaliser une observation, le chercheur doit remplir au moins quatre tâches incontournables selon Martineau (2005):

- Être présent sur le terrain et s'adapter au milieu observé
- Observer le déroulement des événements
- Garder la trace de l'observation par différentes manières
- Présenter l'observation de manière à en proposer une interprétation

Les caractéristiques de l'observateur

Gold (1958) a proposé une typologie d'observateurs qui est devenue une référence. Elle repose sur « l'engagement du chercheur avec les personnes observées » (Martineau, 2005, p.8). Il définit ainsi quatre rôles:

Le participant complet : le chercheur agit et réalise son observation de manière clandestine, sans que les personnes observées soient au courant. Il doit donc trouver une manière de participer à l'action sans se faire repérer. Cette technique a l'avantage de ne pas biaiser le comportement des observés par la présence du chercheur (Baker, 2006). En revanche il est impossible de garder une trace de ce que le chercheur observe, à part dans sa mémoire. Cela peut entraîner des erreurs et des oublis (Blomberg & al., 2003).

Le participant observateur : le chercheur réalise son observation avec un statut d'observateur connu des personnes étudiées et peut ainsi réaliser des interviews ponctuelles pendant l'observation. Une limite à cette posture est la nécessité pour le chercheur de s'intégrer rapidement au milieu pour se faire accepter par les observés. En revanche, Gold (1958) met en garde sur une intégration trop forte qui peut conduire à une relation amicale où les acteurs ne jouent plus leurs rôles.

L'observateur participant : le chercheur dans ce cas est intégré au groupe mais de manière limitée (Martineau, 2005). Il reste en effet en retrait et passe plus de temps à observer qu'à participer (Baker, 2006). Ce rôle est adéquat pour des observations courtes et uniques où le chercheur réalise ses observations en une seule fois (Gold, 1958). Les avantages de cette méthode est d'une part, la facilité pour l'observateur de prendre des notes car il ne participe pratiquement pas et d'autre part, de permettre au chercheur de prendre du recul sur le phénomène observé et d'éviter une intégration exagérée du fait de la rapidité de l'observation (Gold, 1958). Le risque de cette méthode est d'interpréter de manière erronée le comportement des personnes étudiées étant donné le manque de communication (Gold, 1958).

L'observateur complet : « dans ce dernier rôle, le chercheur ne fait qu'observer et ne prend aucunement part à l'action; bien que reconnu comme observateur, il réalise une intégration en retrait » (Martineau, 2005, p.9). Les personnes étudiées n'ont pas connaissance du sujet de l'observation. L'avantage de cette technique est son caractère peu intrusif car le chercheur peut se détacher complètement des personnes étudiées

(Baker, 2006). L'un des risques de cette méthode est la méfiance des personnes étudiées vis-à-vis du chercheur.

Non participant: Le chercheur observe dans ce cas les personnes depuis une autre pièce par des caméras cachées. Les individus étudiés sont donc observés à leur insu.

Pour ce travail de recherche, certains rôles proposés par Gold n'étaient pas applicables au contexte d'étude et aux opportunités de terrain. En effet, un premier critère de choix a été l'obligation de dévoiler l'objet de ma recherche pour pouvoir accéder au terrain. Ainsi les rôles d'observateur complet, de participant complet ou de non participant n'étaient pas adéquats. J'ai alors adopté la posture d'**observateur participant** qui me permettait d'observer la conception des étudiants avec du recul, et me donnait la possibilité de prendre des notes aisément. Des interviews ponctuelles et des communications avec les personnes étudiées pouvaient tout de même avoir lieu.

Comment observer?

La méthodologie de l'observation peut être résumée en trois grandes étapes (Blondin, 2004, p.26): la préparation, la réalisation et le traitement des données.

La préparation

La préparation comporte quatre tâches importantes que le chercheur doit réaliser avant l'arrivée sur terrain d'étude. L'observation commence donc par la *documentation*, l'*échantillonnage*, la *préparation d'accès au terrain* et la *préparation des grilles d'observation*.

La documentation

« La préparation est cette période où le chercheur s'informe sur son objet de recherche et doit impérativement rester ouvert à la nouveauté. » (Martineau, 2005, p.9) Il s'agit de la période où le chercheur prend contact avec les personnes susceptibles d'accepter sa présence pour effectuer une observation.

L'échantillonnage

La clé d'une bonne observation est de répondre à « qui, quoi, où et quand? » (Baker, 2006). En effet, selon Blondin (2004), la première étape de l'observation consiste à choisir qui observer et combien de personnes. Dans une observation ethnographique, l'échantillon est souvent réduit et oriente le chercheur vers une démarche qualitative (Blomberg & al., 2003). Cette particularité pose la question de la validité des conclusions tirées suite à la recherche. Baker (2006) conseille alors de choisir un échantillon d'individus aux profils variés.

L'accès au terrain

Blondin (2004) met en garde contre la difficulté d'accès au terrain d'observation qui présente souvent de « nombreux obstacles » et peut parfois entraîner une restriction dans l'étude choisie. Il évoque aussi la réticence à l'idée d'être observé en situation de travail par exemple. Baker (2006) constate aussi cette difficulté, et l'investissement que cela représente pour le chercheur. Par ailleurs, de manière à rassurer et à obtenir la confiance de la part des personnes étudiées, il est important de les informer clairement des objectifs

de la recherche, en respectant la confidentialité, et en leur demandant leur consentement par la soumission d'un formulaire par exemple (Blondin, 2004).

La grille d'observation

L'observateur peut préparer une grille d'entretien ou des grilles d'observation dans l'optique d'orienter sa prise d'information. L'objectif est en effet de focaliser le regard du chercheur de manière à ne pas être envahi par une trop grande quantité d'informations à gérer (Martineau, 2005). Cependant, le risque est que la grille restreint le regard du chercheur, et l'empêche de s'ouvrir à la nouveauté et de manquer des événements importants. Le chercheur doit donc adopter un esprit critique, s'adapter, réfléchir pendant son observation (Martineau, 2005). En particulier dans le cas d'une observation ethnographique, le chercheur doit veiller à créer une grille d'observation globale au départ, puis par une démarche itérative, la préciser et l'adapter en fonction des constats faits du terrain d'étude.

La réalisation/ L'immersion

C'est l'étape la plus longue où le chercheur recueille des données (Martineau, 2005). Martineau rappelle que le chercheur doit être conscient que la réalité est plus complexe que ce que l'on perçoit à première vue. Le sens apparaît suite à une analyse intensive.

Par ailleurs, Martineau souligne que dans l'observation en situation en particulier, le chercheur accumule une quantité conséquente de données qu'il faut traiter par la suite. Or le chercheur ne peut tout voir et tout retenir, il doit donc impérativement utiliser des outils qui permettent de l'aider dans sa récolte de données.

Il considère les notes sur le terrain comme un outil essentiel pour le chercheur et distingue différentes typologies de prise de notes. Le chercheur peut s'aider d'une grille d'observation mais peut aussi utiliser des enregistreurs audio ou une caméra pour filmer les sujets observés. La vidéo présente l'avantage de pouvoir revoir l'observation autant de fois que l'on souhaite. On peut aussi la visionner avec le sujet observé lui-même (la vidéoscopie). Cependant, elle n'a pas que des avantages. Le chercheur peut, grâce à la vidéo, se sentir en contrôle total de l'observation en situation. Dans cette illusion qui peut biaiser sa perception, le chercheur manquera des informations. D'autre part, l'analyse des données recueillies est très longue dans le cas d'observation par caméra (Martineau, 2005).

Le traitement des données

Le traitement des données se fait en deux étapes: une première étape de tri et une de retranscription des données récoltées, une seconde étape d'analyse effectuée à l'aide de grilles conçues dans le cadre de la recherche (Blondin, 2004).

L'observation ethnographique se base donc sur des théories bien fondées. Cette méthodologie nécessite une préparation et un investissement conséquent. Elle s'inscrit dans un cadre méthodologique qualitatif qui peut être complété par l'élaboration et la soumission d'un questionnaire. La section suivante présente les théories relatives à l'enquête par questionnaire et décrit les techniques d'élaboration de ceux-ci.

2. L'enquête par questionnaire

2.1. Définitions et buts

« L'enquête par questionnaire est un instrument de prise de l'information, basé sur l'observation et l'analyse de réponse à une série de questions posées » (Pourtois & Desmet, 2007, p.157). Cette technique de récolte d'informations vient en complément de l'observation ou en remplacement lorsqu'une observation directe est impossible (Pourtois & Desmet, 2007). Cette technique s'applique à des sujets de recherche très divers et peut être utilisée de manière comparative, pour par exemple évaluer les changements au cours du temps. L'enquête par questionnaire est un outil qui se prête bien aux recherches quantitatives mais représente aussi un outil précieux en complément de la recherche qualitative (Pourtois & Desmet, 2007). Dans le cas d'une utilisation en recherche qualitative, le nombre de sujets est restreint et nécessite une analyse du contenu. « Bien souvent, elle constitue un complément à l'utilisation d'une autre technique (observation participante...) » (Pourtois & Desmet, 2007, p.158).

2.1. Méthodologie du questionnaire

Cette section présente les grandes étapes permettant l'élaboration d'un questionnaire puis s'intéresse aux types de questions fréquemment utilisées dans l'enquête par questionnaire.

Les étapes

Pourtois et Desmet (2007) préconisent neuf phases pour élaborer un questionnaire:

1. Déterminer les objectifs et les hypothèses de recherche
2. Construction du questionnaire
3. Etablissement de l'échantillon
4. Test du questionnaire (temps, omissions, compréhension, éthique...)
5. Réalisation de l'enquête
6. Retranscription ou « codage » des données
7. Traitement de données
8. Interprétation des résultats
9. Vérification de la fidélité et de la validité des données recueillies, codées et interprétées.

L'étape 2 qui consiste à la construction du questionnaire nécessite quelques bases théoriques sur la manière d'élaborer les questions à poser.

Le type de questions

Trois types de questions sont couramment formulées: les questions ouvertes, les questions semi-ouvertes et les questions fermées (Javeau, 1990; Pourtois & Desmet, 2007). La qualité de ces questions repose sur trois critères:

1. **La clarté.** La formulation doit utiliser un vocabulaire simple et compréhensible par un plus grand nombre et les questions doivent être courtes.
2. **La neutralité:** L'information doit être recueillie de manière objective afin d'obtenir des réponses authentiques. Pour y arriver, il faut formuler des questions qui n'orientent pas une réponse en particulier et proposer un nombre important de réponses possibles.
3. **L'adéquation:** ce critère fait référence à la capacité des personnes interviewées à répondre aux questions demandées.

Les **questions ouvertes** donnent la liberté à la personne interrogée de répondre ce qu'elle souhaite. Elles permettent parfois d'obtenir des réponses riches en informations, et leur utilisation est très utile lorsqu'on ne peut prévoir la réponse. Elles sont cependant difficiles à analyser (Javeau, 1990).

Les **questions fermées** prévoient les réponses, ce qui facilite ensuite l'analyse statistique. Cependant, elles peuvent impliquer le risque de dicter la réponse à la personne interviewée, en réduisant la possibilité de nuancer une réponse (Javeau, 1990). Par ailleurs, elles présentent l'avantage d'être facilement et rapidement complétées (Javeau, 1990).

Les réponses à fournir peuvent fonctionner en échelle. Il existe différents types d'échelles utilisées (nominales, ordinales, d'intervalles, proportionnelles, etc. ...). Dans le cas de ce questionnaire, l'échelle ordinale en cinq points, encore appelée échelle de Likert, sera majoritairement utilisée comme le montre l'exemple ci-dessous:

*A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le **niveau de « constructibilité »** de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?*

☐	☐	☐	☐	☐
très inférieur	inférieur	équivalent	supérieur	très supérieur

Les **questions semi-ouvertes** prévoient les principales réponses attendues, mais laissent la possibilité de fournir une réponse non mentionnée. Elles facilitent donc le dépouillement puisque la majorité des réponses sont prévues. En revanche, le choix des réponses « fermées » doit être réalisé soigneusement afin de pas biaiser le questionnaire.

Javeau (1990), rappelle qu'il est important de laisser la possibilité à l'interviewé d'exprimer son ignorance de la réponse par des items tels que « sans opinions » ou « ne sait pas ».

3. Méthode mise en place

Suite à l'état de l'art concernant la thématique de la recherche et la méthodologie choisie, cette partie présente concrètement la méthode mise en place pour recueillir les données nécessaires à ce travail de recherche.

Cette section se compose de deux grandes parties:

3.1. La préparation

3.2. La réalisation

3.1. La préparation

La phase de préparation concerne le choix des terrains d'étude, l'accès à ces derniers, et la présentation des terrains choisis. La mise en place de l'observation et de l'enquête par questionnaire est expliquée.

Choix du terrain

L'objectif de cette recherche est l'analyse de l'utilisation de la maquette physique et des prototypes en conception paramétrique. Comme l'indique la méthodologie l'observation en situation, la préparation commence par le choix de personnes à étudier. Le sujet qui me concerne touche l'utilisation de techniques de conception architecturale encore peu répandues dans le monde professionnel. L'enquête menée par Stals (2017) démontre en effet la faible utilisation et connaissance de la modélisation paramétrique dans les agences d'architecture Wallonnes. Par ailleurs, les Fab Labs se développent actuellement en Belgique en partenariat avec les universités. C'est donc dans le cadre universitaire que j'ai cherché un terrain d'étude. Je me suis donc tourné vers l'université de Mons qui, en partenariat avec la faculté d'architecture de Liège, propose un workshop à ses étudiants de Master 2, intitulé « matérialités numériques » (Figure 40).



Figure 40: Affiche de présentation du workshop (par M-A. Gallas, 2017)

En France, l'école d'architecture de Nancy propose depuis 2009, l'atelier conception fabrication digitale (CFD). Cet atelier de conception-représentation-réalisation architecturales, vise à expérimenter une approche morphologique créative, guidée par des modeleurs géométriques couplés à des machines à commandes numériques. L'atelier se déroule à l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy (ENSAN) durant une semaine complète. Ainsi, ce terrain d'étude rentre dans le cadre du travail de recherche qui m'occupe.

Les terrain d'étude de cette recherche composés du workshop « Matérialité Numérique » à Mons ainsi que du workshop « Conception Fabrication Digitale » à Nancy, représentent 12 journées d'observations et constituent ainsi une source intéressante de récoltes de données dans le cadre d'un mémoire de fin d'étude. Accès au terrain et présentation

Workshop Matérialités Numériques_Mons

Le workshop « matérialités numériques » a eu lieu au FabLab de Mons du 20 au 24 Février 2017. Il rassemble au total 18 étudiants dont 5 étudiants de la faculté d'architecture de Liège et 13 étudiants de la faculté d'architecture de Mons. L'équipe encadrante se compose des professeurs chargés du cours, à savoir, M.Gallas (UMons), M.Delvaux (ULg) ainsi qu'un informaticien du laboratoire de culture numérique M.Bianchi (ULg) (Figure 43).

L'exercice est réalisé par 2 équipes de 4 étudiants et 2 équipes de 5 étudiants. Ces quatre équipes seront nommées dans la suite de ce travail: M1, M2, M3, M4.

Ce workshop, suivi par les étudiants de 2ème Master en architecture, répond aux objectifs suivants:

- Sensibilisation à la culture architecturale numérique
- Mise en oeuvre du principe de Continuum Numérique
- Questionner le lien entre Matérialité / Numérique
- Intégration des techniques de fabrication numérique
- Intégration de la culture architecturale numérique dans un contexte de conception

Une première partie du travail s'est déroulée en dehors du FabLab pendant la phase de lancement où les étudiants ont pris connaissance du sujet. La partie conception s'est ensuite déroulée au FabLab de Mons (Figure 42). Enfin, la présentation finale a eu lieu le 20 Mars 2017 en présence d'un jury extérieur. Le planning général est résumé dans la figure 41 ci-dessous.



Figure 41: Planning du workshop



Figure 42: FabLab de Mons



Figure 43: Etudiants et encadrants du Workshop Matérialités Numériques

L'objectif de la conception (énoncé présenté en annexe 1)

Dans le cadre de cet exercice de conception il a été demandé aux étudiants de concevoir une structure « dynamique » dans le but d'améliorer le confort acoustique de la chapelle du Bélian (figure 44, chapelle de la faculté d'architecture de Mons) étant donné différents contextes d'utilisation. Pour cela, les étudiants doivent utiliser le potentiel de la

modélisation paramétrique et les outils du prototypage rapide afin de matérialiser les propositions.

Les concepteurs avaient à disposition

- 1 découpeuse laser (Cyborg LS-1080-K)
- 1 découpeuse vinyle (ROLAND CAMM-1 Servo GX-24)
- 1 fraiseuse numérique (HEIZ High-Z S-720)
- 4 imprimantes 3D (makerbot et ultimaker)



Figure 44: La chapelle de Bélian à Mons

L'observation a débuté par la phase de lancement du 15 au 16 Février. Cette première phase de lancement m'a permis de tester les grilles d'observation et de les faire évoluer. Ensuite, j'ai pu observer le workshop au FabLab de Mons du 20 au 24 Février ainsi qu'à la présentation finale du 20 Mars 2017.

Atelier Conception Fabrication Digital _ Nancy

L'atelier Conception Fabrication Digitale est à destination des étudiants architectes, ingénieurs et designers de Master 2 qui ont suivi le cursus A.M.E. (Architecture, Modélisation, Environnement) de l'ENSAN. Il a pour but de mettre en oeuvre un continuum numérique de la conception à la fabrication, en utilisant des outils paramétriques comme Rhinoceros-Grasshopper, et des outils de prototypage rapide comme la découpe laser et l'impression 3D. L'équipe encadrante se compose M.Hanser; Mlle.Hochscheid; F.Besancon; G.Duchanois; H.Gless.

L'atelier est suivi par 13 étudiants de formations et d'expériences variées. L'atelier proposé est ouvert à diverses formations. En effet, sur les 13 étudiants, 4 sont de formation ingénieur-construction et ont donc une expérience en conception architecturale limitée voire nulle.

L'exercice est réalisé par 3 équipes de 3 étudiants et une équipe de 4 étudiants. Ces quatre équipes seront nommées dans la suite de ce travail: N1, N2, N3, N4.

L'objectif de la conception

Le sujet de l'année 2017 est la réalisation d'un abri en portiques ou en facettes dans un contexte choisi par les étudiants. La conception doit être réalisée à l'aide de modèles paramétriques et matérialisée par les outils de prototypage rapide (découpe laser et imprimante 3D)

L'accès direct à ce terrain d'étude pour une observation m'a été impossible en raison de contraintes d'emploi du temps. Afin de récolter des données exploitables, j'ai transmis le questionnaire aux encadrants de l'atelier.

Par ailleurs, un reportage photo, vidéos, et les rendus finaux m'ont été fournis par l'intermédiaire de Mlle Stals, doctorante à l'université de Liège, qui était présente sur place. Ces données seront exploitées dans la suite de ce travail, toutefois mon absence à ce terrain d'étude rend ces données non viables vis-à-vis d'une méthodologie par l'observation. Les résultats obtenus par l'analyse de ces données seront présentés à titre indicatif puisqu'ils présentent une validité scientifique moindre.

Préparation de l'observation

Une fois l'accès au terrain d'étude autorisé et planifié, la préparation de l'observation pouvait débuter. Dans le cadre d'une observation ethnographique, la littérature préconise de ne pas catégoriser trop précisément et définitivement les grilles d'observations. Par conséquent, les grilles préparées à l'avance ont donc été une base pour orienter l'observation en situation mais ont évolué lors de la phase de lancement.

La grille d'observation prévue au départ a été inspirée de la grille d'observation utilisée lors du cours d'Analyse du Processus de Conception (APC). Cette grille a évolué suite à l'observation « test » et s'est précisée. En effet, elle était au départ volontairement globale et peu précise puis elle s'est affinée en fonction des éléments observés. Elle intégrait dans un premier temps le sujet abordé, l'outil utilisé, et une description générale. Ensuite, des catégories se sont affinées et sont détaillées dans la partie 3.2 de la méthodologie. Des exemples d'utilisation de ces grilles sont présentés en annexe 4 à 6.

Par ailleurs, pour augmenter la qualité de l'observation, la vidéo et le reportage photographique sont utilisés. Filmer les 4 groupes pendant 7 jours nécessite d'une part la mobilisation de beaucoup de matériel et entraîne, d'autre part, une gestion difficile des caméras sur place. Après discussion avec les encadrants, le choix de filmer seulement un groupe de manière continue pendant les 7 jours a été fait. L'observation des autres groupes est prévue par la prise de notes, des reportages photographiques, des courtes vidéos et des interviews.

Dans ce travail, l'observation porte sur les artefacts produits et plus particulièrement sur les maquettes physiques et les modèles numériques. Cependant le croquis, reste un outil intéressant pour l'analyse et n'est donc pas négligé.

De manière à pouvoir utiliser les productions, et l'image des étudiants dans ce travail, une fiche d'autorisation de droit à l'image a été soumise aux étudiants (annexe 3).

Préparation du questionnaire

De manière à capter l'évolution du ressenti du concepteur vis-à-vis de sa conception et des outils qu'il utilise pour concevoir et matérialiser, un questionnaire par phases a été préparé. Une version est présentée en annexe 2.

Objectifs et hypothèses

L'objectif de ce questionnaire est d'évaluer l'influence de la présence d'outils de prototypage rapide sur le concepteur et sur la conception. L'intérêt de le réaliser par phases permet de détecter des variations du ressenti au cours du processus de conception et de les confronter aux observations en situation. Ce questionnaire fait l'hypothèse que les concepteurs interrogés ont déjà une certaine expérience en conception architecturale, et qu'ils ont déjà des notions en modélisation paramétrique ainsi que des bases en techniques de prototypage rapide. Par ailleurs, pour élaborer ce questionnaire, il a fallu faire des hypothèses quant au déroulement du processus de conception au cours de ces workshops conception-fabrication. En se basant sur l'état de l'art et mon expérience en conception paramétrique, quatre étapes ont été définies:

1. L'étape esquisse
2. L'étape stratégie de modélisation
3. L'étape modélisation
4. L'étape fabrication

Construction du questionnaire

De manière générale les questions utilisent un vocabulaire simple et les mots techniques sont expliqués en bas de page. Les réponses sont souvent basées sur l'échelle de Likert ou des questions à choix multiples. Cette technique permet de diminuer la durée de réponse au questionnaire.

Ce questionnaire est construit en 5 étapes:

Préambule	Questionnaire N°1 [Étape esquisse]	Questionnaire N°2 [Étape stratégie de modélisation]	Questionnaire N°3 [Étape Modélisation]	Questionnaire N°4 [Étape Fabrication]
▶ Le préambule permet d'identifier la personne interrogée afin de s'assurer qu'elle correspond au profil et d'évaluer sa maîtrise des techniques numériques. Par ailleurs, il permet de cerner la vision du concepteur vis-à-vis de son processus de conception traditionnel. ▶ Ensuite vient le premier questionnaire, qui sera rempli par le concepteur à la suite de la recherche de « concept » et des esquisses. Dans cette première étape, le concepteur n'a pas forcément eu recours aux outils du numérique. Il est néanmoins conscient qu'il devra les utiliser. Les premières questions permettent de savoir si la présence de ces outils a déjà influencé la conception à cette étape du processus. ▶ Le second questionnaire est soumis à la fin de l'étape « stratégie de modélisation ». À ce stade du processus, les concepteurs ont déjà identifié le concept de leur projet, et ont commencé à réfléchir à comment modéliser avec l'outil paramétrique. ▶ Le troisième questionnaire arrive à la fin de l'étape modélisation, c'est à dire lorsque les concepteurs ont finalisé le modèle paramétrique. ▶ Enfin, le dernier questionnaire est soumis à la fin du workshop, une fois que le projet final a été fabriqué.				

Etablissement de l'échantillon

Ce questionnaire a été élaboré en complément d'une observation ethnographique. Les personnes interrogées devaient participer à ce type de travail de conception. Ainsi, l'échantillon de personnes interrogées est intrinsèquement lié au nombre d'étudiants participants au workshop. Au total, 31 étudiants ont été interrogés.

Test du questionnaire (temps, omissions, compréhension, éthique...)

Avant de soumettre ce questionnaire à l'échantillon étudié, il a été soumis à des étudiants de master 2 du cursus ingénieur architecte de l'université de Liège qui présentent un parcours similaire à celui des personnes interrogées. Ce test a permis d'évaluer la durée du questionnaire et d'identifier quelques problèmes de compréhension telles que la notion de « constructibilité » ou lié à la méthode de réponse par classement. J'ai ainsi pu ajouter des explications supplémentaires.

3.2. La réalisation

L'observation test

La première partie, destinée au lancement du workshop, a été une phase « test » de l'observation. En effet, pendant cette première phase j'ai pu tester les grilles d'observation, me placer dans le rôle de l'observateur participant et par ailleurs m'accoutumer à la gestion des reportages vidéo et photographiques de manière simultanée à la prise de notes. Lors de cette observation « test », je me suis rendu compte de la difficulté de l'exercice et de l'importance de l'expérience pour la maîtrise de cette méthode.

La première grille d'observation (présentée en annexe 4) a été utilisée lors du premier jour d'observation « test ». Il s'agit d'un support de prise de notes, décomposé en « séquences » d'actions. Suite à cette première journée d'observation, un premier constat lié à cette grille a été son inefficacité et sa redondance. Un second constat a été l'influence de la présence de l'enseignant sur la récolte de données. En effet, en présence de l'enseignant on assiste à une forte concentration des étudiants, et une description explicite à voix haute de leur conception et de leur avancement. D'autre part, l'enseignant fait avancer la conception en conseillant et en orientant les étudiants. L'enseignant fait partie d'une certaine manière de l'équipe de conception. J'ai ainsi considéré par la suite que l'enseignant faisait partie des concepteurs en précisant bien lorsqu'il intervenait. Suite à cette première journée, j'ai décidé d'élaborer une grille d'observation me permettant une récolte de données plus efficace, en pré-définissant les sujets abordés dans les différentes séquences observées et en ajoutant une colonne destinée aux conseils transmis par les encadrants (annexe 5).

Dans cette seconde grille, 7 sujets sont pré-définis :

- « FORM »: abréviation de « forme », définit l'aspect formel du projet, ou une question d'esthétique;
- « FAB »: abréviation de « fabrication », définit la manière de fabriquer un élément, un assemblage particulier à l'échelle de la maquette.
- « CONS »: abréviation de « construction », définit la manière de construire, mettre en oeuvre le projet;
- « ASSEM »: abréviation de « assemblage », ce critère est lié à la manière d'assembler des éléments du projet entre eux;
- « ANA »: abréviation de « analogie », définit les analogies et les références utilisées;
- « MODEL »: abréviation de « modélisation », correspond à un sujet lié à la modélisation, ou plus généralement à la numérisation d'une partie du projet;
- « MAT »: abréviation de « matière », Ce critère fait référence aux matériaux évoqués pour la réalisation de la maquette ou du projet.

Enfin, suite au bon fonctionnement des sujets pré-définis, une troisième grille d'observation a été réalisée sur le même modèle mais cette fois-ci pour les outils utilisés (annexe 6). Le même système de pré-définition des outils me laissait tout de même la liberté d'en ajouter d'autres si les étudiants utilisaient des outils non pré-définis. Par ailleurs

la colonne dédiée à l'activité des professeurs a été supprimée mais l'auteur de l'action est directement mentionné dans la colonne « observation ».

D'autre part, cette première phase d'observation m'a permis de visualiser les premières vidéos prises sur le groupe M3. Les premières vidéos présentaient quelques défauts de cadrage, et ne permettaient pas de capter toutes les informations nécessaires. J'ai donc ensuite pris soin de bien positionner la caméra, et d'effectuer des tests avant le démarrage du workshop.

L'observation en situation

Une journée d'observation en situation commençait à 9h00 par la mise en place de la caméra derrière le groupe M3 qui a été filmé durant toute la durée du Workshop (Figure 45)

Ensuite, j'adoptais le rôle d'observateur participant en passant la majorité du temps à observer avec le recul nécessaire sans m'impliquer dans l'activité de conception. Cette observation était réalisée par la prise de notes à l'aide de la grille d'observation élaborée et le reportage photographique.



Figure 45: Arrêt sur image dans une vidéo filmant le groupe M3

Le groupe M3 étant filmé en continu, j'ai accentué l'observation par la prise de notes et le reportage photographique sur les groupes M1, M2 et M4 de manière à manquer le moins possible d'évènements. Pour ne pas tomber dans le piège d'une mauvaise interprétation, l'activité et l'état d'avancement des concepteurs étaient demandés fréquemment. Par ailleurs, comme je l'avais remarqué lors de l'observation « test », l'intervention des encadrants aboutissait à des observations plus riches, j'ai ainsi observé en priorité ces moments d'interactions.

La réalisation de l'enquête

Réalisation de l'enquête

L'enquête a été réalisée de deux manières différentes. En effet, d'abord prévue sur papier l'enquête réalisée à Mons a été soumise en ligne par l'outil « GoogleForm », à la demande des encadrants pour des raisons de logistique (Figure 46). La première étape du questionnaire contenant le préambule a été soumise le 11/02/2017, la seconde étape a été soumise le 21/02/2017, le deuxième jour de workshop, la troisième étape a été soumise le 23/02/2017 et le dernier questionnaire le dernier jour du workshop, le 24/02/2017.

Questionnaire _ Matérialités Numériques

Il A remplir à la fin de l'étape esquisse Il

Ce questionnaire a pour objet d'identifier l'influence de la présence de la « fabrication digitale » sur votre manière de concevoir un projet architectural, et d'identifier son impact sur l'innovation et la « constructibilité ».

Votre avis est précieux pour ce travail de recherche. Il restera strictement confidentiel et ne servira qu'à des fins scientifiques.

SUIVANT Page 1 sur 4

N'envoyez jamais de mots de passe via Google Forms.

Ce contenu n'est ni rédigé, ni cautionné par Google. Signaler un cas d'utilisation abusive - Conditions d'utilisation - Clauses additionnelles

Google Forms

Figure 46: Interface du questionnaire en ligne sur « Google Forms »

Les étudiants de Nancy ont répondu aux questionnaires sur la version papier. Les quatre questionnaires ont été imprimés et agrafés ensemble puis soumis à la fin de l'étape esquisse aux étudiants. Sur chaque questionnaire était indiqué le jour auquel les étudiants devaient répondre au questionnaire. Les encadrants présents sur place le leur rappelaient néanmoins.

Les quatre dernières étapes d'élaboration d'un questionnaire préconisées par Pourtois et Desmet (2007) concernent le traitement des données et seront donc expliquées dans la section suivante de ce travail.

.....

La méthode mise en place s'est ainsi basée sur les théories fournies par la revue de la littérature. L'observation en situation s'est déroulée sous l'oeil de l'observateur participant et un questionnaire a été soumis à toutes les équipes de conception. Cette phase de récolte de données a été ensuite traitée et exploitée. Cette partie du travail est présentée dans la section suivante.

.....

ÉTAT DE L'ART

MÉTHODOLOGIE

TRAITEMENT DES DONNÉES

RÉSULTATS

DISCUSSION

TRAITEMENT DES DONNÉES

La méthode de traitement des données adoptée pour ce travail est basée sur une méthode qualitative. Elle s'inscrit dans l'approche exploratoire des questions de recherche formulées pour ce travail.

La recherche exploratoire, selon Anadón et Guillemette (2006, p.39), permet de « baliser une réalité à étudier ». Le but ici n'est pas de réaliser une étude statistique sur un grand nombre de concepteurs mais de comprendre en détail l'activité de conception d'un nombre limité de concepteurs observés.

Le traitement des données consiste à exploiter et analyser de manière approfondie l'observation ethnographique réalisée. Concrètement, les données à exploiter sont les grilles d'observation, les vidéos, le reportage photographique et les réponses aux questionnaires récoltés sur le terrain.

1. Traitement des données d'observation

1.1. Tri des données

La phase d'observation réalisée au Workshop « Matérialité Numérique » de Mons ainsi que les données récoltées au Workshop « CFD » de Nancy ont abouti à une quantité importante de documents et de données à traiter. En effet, l'observation au workshop de Mons représente environ 37h de vidéo et 1055 photos. Les données récoltées à Nancy sont quant à elles moins importantes et représentent environ 1h30 de vidéos et 130 photos. La quantité de données récoltées à Nancy n'est par ailleurs pas comparable à la quantité récoltée à Mons. En effet, les 37h de vidéo correspondent à une vidéo des 7 jours et quelques vidéos de moments importants dans les processus de quelques groupes. Les vidéos récoltées à Nancy sont quant à elles ciblées sur des moments charnières du processus.

Le tri des données est donc un travail essentiel pour réaliser une analyse convenable. Il a été effectué au fur et à mesure de l'observation à la fin de chaque journée de conception. Les photographies et les vidéos ont été triées par jour et par groupe.

D'autre part, une plateforme en ligne a été mise en place permettant de déposer les fichiers des étudiants.

1.2. Transcription

L'ensemble des données récoltées lors de la semaine de Workshop à Mons ainsi que celles récoltées lors du Workshop de Nancy ont été transcrites dans des grilles de transcription communes aux deux Workshops. Ces grilles sont consultables en annexes 7 à 10 de ce travail. Au total, huit grilles de transcription ont été réalisées permettant une comparaison des huit groupes étudiés. La grille est construite sur la même base que celle réalisée pour l'observation in-situ lors du Workshop de Mons et a été inspirée de la grille d'observation élaborée par le LUCID dans le cadre du projet « CommonTools ». Son objectif est de permettre un dépouillement et une exploitation efficace des données récoltées pour en dégager des résultats. Elle se construit sur un séquençage de « moments » observés.

Chaque moment est ensuite décrit par un texte résumant l'observation, une photographie lorsqu'elle est disponible puis détaillée par les points présentés ci-dessous qui explicitent chaque catégorie de la grille d'observation:

- ▶ Hot Spot: le Hotspot signifie qu'il s'agit d'un moment charnière dans le processus de conception. Ce type de moment se manifeste souvent par une émotion ou une attitude remarquable. Ces « hotspot » sont donc détectés de manière très subjective, il sera intéressant de discuter de ceux-ci dans la dernière partie de ce travail.
- ▶ Qui? : ce critère précise qui a réalisé l'activité décrite. Cette information permet de préciser d'une part, s'il s'agit d'un enseignant ou d'un étudiant. D'autre part, il permet d'obtenir des informations sur la manière de collaborer et surtout de connaître l'auteur d'une activité en particulier, bien que la collaboration ne soit pas le sujet de ce travail.
- ▶ Quoi? : ce critère permet de décrire précisément l'action qui est en train de se passer au cours de la conception.
- ▶ Illustration: dans cette case, la description est illustrée par une photo prise au moment de l'activité ou représentant le sujet de la description. Elle améliore ainsi la description générale de l'activité du concepteur.
- ▶ Sujet abordé: ce critère explique le ou les sujets abordés par les concepteurs lors de leur activité. Il se divise en sept catégories déjà présentées dans la section 3.2 de la méthodologie.
- ▶ Outils utilisés: ce critère définit l'outil utilisé par le concepteur pour aborder le sujet. Un concepteur peut utiliser plusieurs outils pour une même activité. Par exemple, il peut parler et faire des gestes en expliquant un modèle paramétrique sur Grasshopper. Ainsi la grille d'analyse compte sept grandes familles d'outils utilisés.
 - « CRO »: abréviation de « croquis ». Il s'agit dans ce cas d'un croquis, schéma, dessin, réalisé par le concepteur.

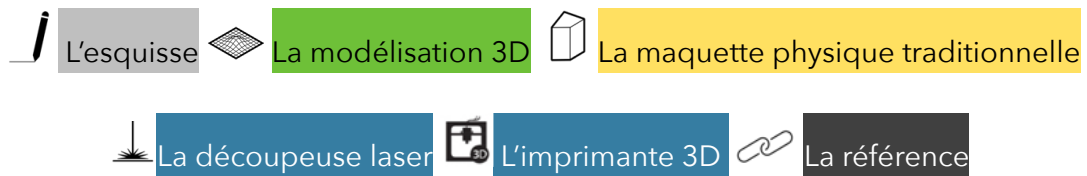
- « MAK NUM »: abréviation de « Maquette Numérique » qui fait référence à différents logiciels utilisés selon les différents usages, à savoir:
 - « AUTO » correspond à Autocad
 - « ARCHI » correspond à Archicad
 - « SKP » correspond à Sketchup
 - « RHI/GH » correspond à Rhinocéros et Grasshopper qui sont majoritairement utilisés ensemble.
 - « BLEND » correspond à Blender, qui est un logiciel de modélisation, texturage et rendus.
- « MACHINE»: ce critère permet de savoir si l'activité s'accompagne de l'utilisation d'une machine mise à disposition au FabLab à savoir:
 - « IMP3D »: abréviation d'« imprimante 3D ».
 - « DL »: abréviation de « Découpeuse Laser »
 - « AUTRES »: lorsqu'il s'agissait d'autres machines non liées à la fabrication digitale.
- « MAK PHY »: abréviation de « Maquette Physique ». Il désigne donc une maquette physique réalisée qui sert souvent de support au discours.
- « REF » abréviation de « Référence ». Cela désigne l'analogie réalisée avec une référence connue par le concepteur ou bien trouvée sur internet, livre...Cela peut prendre la forme d'une image, ou d'un mot dit à l'oral ou bien écrit.
- « REF NUM »: abréviation de « référence numérique » désigne une référence numérique aidant le concepteur dans sa démarche de numérisation d'une idée.
- « O+G »: abréviation de « Oral + Geste » correspond finalement à la discussion entre les concepteurs.

Ces grilles ont été complétées à l'aide de trois types de données: les photographies, les vidéos ainsi que les notes de terrain réalisées lors de l'observation in-situ. En ce qui concerne le Workshop de Nancy, la transcription s'est faite seulement à partir des vidéos et photos réalisées du fait de mon absence sur place. Il en résulte une quantité de données transcrites beaucoup plus faible. Il est donc nécessaire de différencier par la suite les résultats obtenus à Mons et à Nancy.

1.3. Exploitation des données

La grille de transcription permet ensuite d'élaborer une ligne du temps résumant le processus de conception de chacun des groupes étudiés sous l'angle des artefacts réalisés (maquette physique, modèle paramétrique, esquisse, prototypage rapide, références). Par ailleurs, elle permet d'identifier les différents prototypes réalisés au cours du processus de conception et le rôle qu'ils ont joué sur celui-ci.

Huit lignes du temps ont été élaborées et une description de chaque artefact réalisé est présentée sous forme de tableaux en annexes 11 à 26 de ce travail. Elles décrivent le processus de chaque groupe et divisent la semaine de conception en grandes phases de conception. Sur ces lignes du temps figurent les différents artefacts réalisés, représentés par un logo dont la signification est décrite ci-dessous:



Les artefacts réalisés sont associés à un chiffre et une couleur.

Exemple: La bulle « 0 » correspond à la première maquette physique réalisée pendant le processus de conception.

Les données de l'observation une fois retranscrites, ont donc été exploitées pour aboutir aux premiers résultats présentés par les lignes du temps des processus de conception. Par ailleurs, les réponses aux questionnaires ont aussi été traitées puis analysées. Cette démarche est présentée dans la section suivante.

2. Traitement des données du questionnaire

Les questionnaires distribués aux étudiants concepteurs avaient pour but d'évaluer le ressenti des concepteurs sur leur processus de conception à différents instants. Ils se focalisent en particulier sur l'utilisation de la modélisation paramétrique et du prototypage rapide.

Le même questionnaire a été fourni aux étudiants montois et aux étudiants nancéiens. La seule différence entre les deux questionnaires était le format papier pour les étudiants nancéiens et numérique via GoogleForm pour les étudiants montois.

À Mons, sur les 18 étudiants concepteurs:

- 18 étudiants ont répondu au questionnaire N°1
- 14 étudiants ont répondu au questionnaire N°2
- 16 étudiants ont répondu au questionnaire N°3
- 13 étudiants ont répondu au questionnaire N°4

La distribution du questionnaire s'est faite par mail aux moments charnières du processus de conception. Bien qu'un rappel oral était réalisé pour chaque groupe après l'envoi d'un questionnaire, certains étudiants n'ont pas répondu à certaines étapes. Le taux de participation moyen atteint tout de même 85 %.

À **Nancy**, le questionnaire a donc été distribué sous format papier en une seule fois et les étudiants devaient répondre à la date indiquée en haut de chaque questionnaire. Au total 12 étudiants sur les 13 ont répondu au questionnaire.

Cette différence de participation met en évidence l'impact de la méthode utilisée pour soumettre ces questionnaires. Il sera intéressant de discuter de ces différences dans la dernière partie du travail.

Retranscription des données

Avant d'analyser les 30 réponses obtenues, un travail de retranscription des réponses a été effectué. Les réponses ont donc été « codées » dans deux tableurs, un pour les réponses des participants à Nancy et un second pour ceux de Mons. Ces deux tableaux sont présentés en annexes 29 à 32 de ce travail.

Traitement de données

Ce questionnaire n'avait pas pour ambition de réaliser une étude statistique mais bien de comprendre plus précisément le comportement des concepteurs. C'est pourquoi les données récoltées sont présentées en terme de proportion de réponses obtenues et non en pourcentage. Cela permet d'obtenir une vision claire et sans biais des résultats, chose plus difficile à obtenir avec le pourcentage.

L'échelle de Likert présentée précédemment a été principalement traduite en disques de proportion de réponses comme l'illustre l'exemple de la figure 47 ci-dessous.

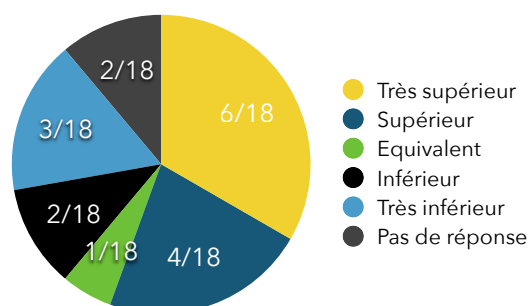
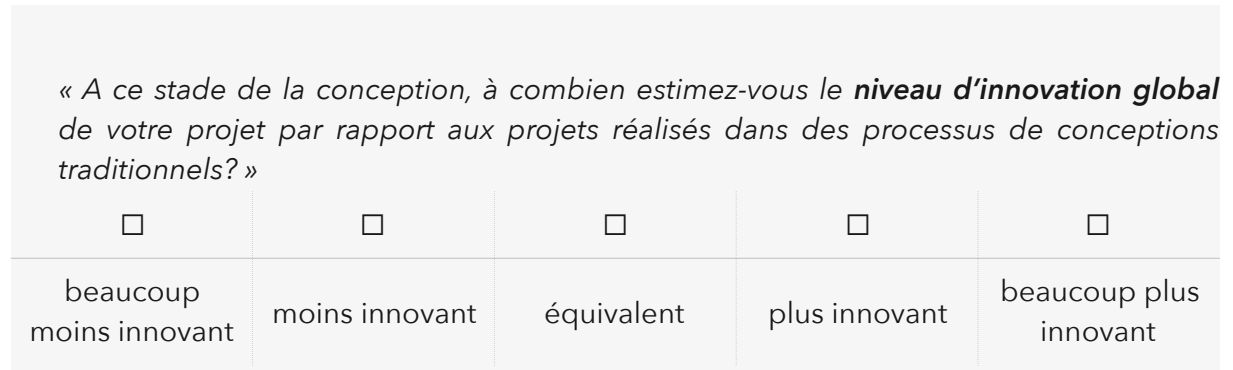


Figure 47: Exemple de présentation des réponses obtenues par l'échelle de Likert

Par ailleurs, certaines questions demandaient aux participants de classer des outils par ordre d'importance. Pour traiter et analyser ces réponses, l'utilisation de la moyenne pondérée a été utilisée. Le tableau 4 ci-dessous est un exemple présentant la méthode adoptée pour réaliser un classement global des réponses obtenues.

« Parmi les outils de conception ci-dessous, lequel a le plus favorisé votre créativité? (classez les propositions suivantes de 1 à 4 par ordre d'importance: 1=la plus importante et 4=la moins importante) »

- ☐ le croquis d'esquisse
- ☐ les références architecturales
- ☐ la modélisation 3D sur Grasshopper
- ☐ les outils de fabrication digitale

De manière à élaborer un classement des outils les plus influents, on peut utiliser la pondération 40, 30, 20 et 10. Dans cet exemple rempli au hasard, il en résulte le classement global suivant:

1/ Réponse 3

2/ Réponse 2

3/ Réponse 1

4/ Réponse 4

Classement de la réponse		1	2	3	4	SCORE
Pondération		40	30	20	10	
Réponse 1	le croquis d'esquisse	0	6	6	1	23,8
Réponse 2	les références architecturales	2	6	3	2	26,2
Réponse 3	la modélisation 3D sur Grasshopper	6	3	1	3	29,2
Réponse 4	les outils de fabrication digitale	3	2	3	5	22,3

Tableau 4: Exemple présentant la méthode pour obtenir un classement global des réponses obtenues.

Les données récoltées au cours de l'observation, ajoutées à celles récoltées par le questionnaire, ont représenté une quantité importante de données à traiter. Ce travail a permis ensuite de reconstituer le processus de conception de chaque groupe observé en situation ou à distance. L'exploitation des lignes du temps et des réponses aux questionnaires nous amène aux résultats de cette recherche, présentés dans la section suivante.

ÉTAT DE L'ART

MÉTHODOLOGIE

TRAITEMENT DES DONNÉES ET ANALYSE

RÉSULTATS

DISCUSSION

RÉSULTATS

Cette partie présente les résultats obtenus suite au traitement des données issues de l'observation en situation et du questionnaire. Ce travail ne prétend pas être représentatif de l'ensemble des manières de concevoir en présence d'outils numériques. Il a plutôt pour vocation à donner des tendances quant à certains comportements en conception architecturale numérique. De même, les résultats du questionnaire soumis à de futurs concepteurs professionnels n'ont pas vocation à être généralisés. En effet, ils sont spécifiques à la recherche qualitative effectuée pour ce travail, et interviennent en complémentarité des données recueillies via l'observation.

Les résultats sont présentés en 5 étapes:

- 1/ La présentation des équipes de conception et des projets réalisés
- 2/ Les interactions observées entre la maquette physique et le modèle paramétrique.
- 3/ Les différents continuums conception-fabrication numériques observés.
- 4/ L'explication des deux usages observés du prototypage rapide.
- 5/ Enfin, la dernière partie expose les résultats du questionnaire.

Pour une lecture plus aisée, certains documents sont présentés en annexes.

1. Présentation des équipes de conception et des projets réalisés

Afin d'identifier chaque équipe de conception à Mons comme à Nancy, commençons par une brève introduction des équipes et des travaux réalisés.

1.1. Matérialités Numériques _Mons

Le workshop « matérialités numériques » s'est déroulé en présence de quatre équipes de conception: les équipes M1, M2, M3 et M4. Pour rappel, l'exercice consistait à concevoir une structure dynamique au plafond de la chapelle de Bélian, ayant pour but d'améliorer les performances acoustiques de celle-ci. Chaque équipe comprend au moins un étudiant de l'université de Mons et un étudiant de l'université de Liège. Les participants ont des formations et des profils très similaires comme le montre l'annexe 27, élaborée à partir du préambule du questionnaire qui leur a été soumis. Leurs niveaux de maîtrise du logiciel paramétrique et des machines de prototypage rapide varient légèrement au sein des groupes mais la fréquence d'utilisation de ces outils est majoritairement faible et occasionnelle, comme l'illustrent les tableaux 5 et 6 ainsi que les figures 48 et 49 ci-dessous.

À la question A,

« A/ Combien de fois avez-vous déjà utilisé la **modélisation paramétrique** pour un projet d'architecture? »

les étudiants répondent:

Fréquence d'utilisation de la modélisation paramétrique par les participants au workshop de Mons dans leurs projets d'architecture			
	Groupe	Jamais	1 à 2 fois
Nombre d'étudiants	M1	3	2
	M2	1	3
	M3	2	3
	M4	1	3

Tableau 5: Réponses obtenues à Mons à la question A dans chaque groupe

Fréquence d'utilisation de la modélisation paramétrique par des participants montois dans leurs projets d'architecture

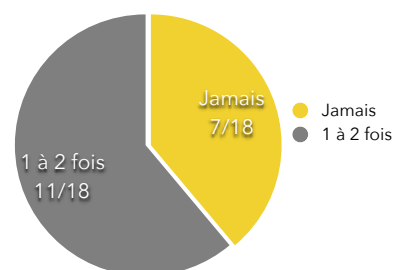


Figure 48: Réponses obtenues à Mons à la question A

Le tableau 5 et la figure 48 ci-dessus, montrent une utilisation seulement occasionnelle de la modélisation paramétrique dans les projets d'architecture des étudiants. Un peu plus de la moitié l'a déjà utilisée dans un projet d'architecture.

À la question B,

« B/ Combien de fois avez-vous déjà utilisé la **fabrication digitale** pour un projet d'architecture? »

Les étudiants répondent:

Fréquence d'utilisation de la fabrication digitale par les participants au Workshop de Mons dans leurs projets d'architecture			
	Groupe	Jamais	1 à 2 fois
Nombre d'étudiants	M1	2	3
	M2	3	1
	M3	3	2
	M4	1	3

Tableau 6: Réponses obtenues à Mons à la question B dans chaque groupe

Fig X: Fréquence d'utilisation de la fabrication digitale par des participants montois dans leurs projets d'architecture

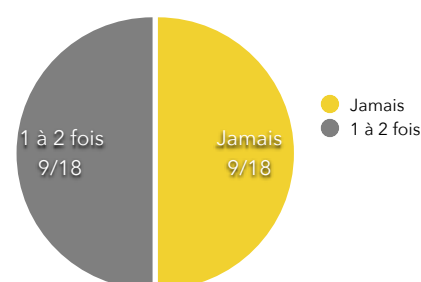


Figure 49: Réponses obtenues à Mons à la question B

Le tableau 6 et la figure 49 ci-dessus, montrent une utilisation très occasionnelle de la fabrication digitale dans les projets d'architecture des étudiants. La moitié des étudiants participants l'ont déjà utilisée dans un projet d'architecture. On voit bien par ces résultats que ces deux outils numériques utilisés dans ce travail sont encore récents et inhabituels dans les processus.

A présent, voici une description succincte des projets réalisés par chaque groupe au cours de la semaine de workshop à Mons.

Groupe M1_ [Tensions Acoustiques]

Le groupe M1 se compose de 5 étudiants. Le projet proposé par cette équipe est nommé « tensions acoustiques ». Les étudiants ont travaillé la toile tendue pour obtenir une forme pouvant varier en fonction des utilisations de la chapelle (Figure 50).

Figure 50: Maquette finale du groupe M1



Groupe M2_ [Cocon]

Le groupe M2 se compose de 4 étudiants. Le projet proposé par cette équipe est nommé « cocon ». Le concept de base de ce projet est l'origami. Les étudiants ont conçu une structure qui se plie et se déploie en fonction de l'usage (Figure 51).



Figure 51: Maquette finale du groupe M2

Groupe M3_ [Les Ailes de Bélian]

Le groupe M3 se compose de 5 étudiants. Le projet proposé est nommé « les ailes de Bélian » en référence à la chapelle. Les toiles tendues sont aussi utilisées mais dans ce cas, les concepteurs ont travaillé avec l'interdépendance de triangles formant une nappe continue au plafond de la chapelle (Figure 52).



Figure 52: Maquette finale du groupe M3

Groupe M4_ [Lustre]

Le groupe M4 se compose de quatre étudiants. Leur projet repense les lustres d'antan que l'on trouve dans les églises. La particularité de ce projet est l'utilisation d'une technologie de soustraction de matière permettant le pliage du lustre sous l'action du mécanisme (Figure 53).

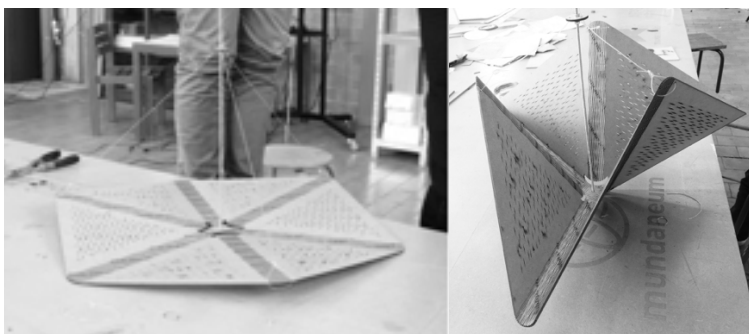


Figure 53: Maquette finale du groupe M4

1.2. Conception Fabrication Digitale _Nancy

Le workshop Conception Fabrication Digitale (CFD) de Nancy s'est également déroulé en présence de quatre équipes: les équipes N1, N2, N3, N4. Pour rappel, les étudiants devaient dans cet exercice concevoir un abri en portiques ou facettes dans un contexte quelconque. Les étudiants participants proviennent de formations plus variables qu'à Mons. L'annexe 28 issue du préambule du questionnaire rassemble ces profils. La grande majorité des étudiants sont issus d'une formation en architecture, mais certains proviennent d'une formation ingénieur-construction. L'expérience de ces derniers en conception architecturale est donc plus faible. Ils ont donc été répartis dans les quatre groupes. Par ailleurs, les variations dans la maîtrise des outils numériques entre les étudiants sont plus marquées à Nancy. Cette affirmation provient des résultats présentés

dans les tableaux 7 et 8 et les figures 54 et 55 ci-dessous, obtenus suite à l'analyse du questionnaire.

À la question A,

« Combien de fois avez-vous déjà utilisé la **modélisation paramétrique** pour un projet d'architecture? »

les étudiants répondent:

Fréquence d'utilisation de la modélisation paramétrique par les nancéiens dans leurs projets d'architecture dans chaque groupe				
	Groupe	Jamais	1 à 2 fois	3 à 5 fois
Nombre d'étudiants	N1	0	2	1
	N2	2	1	0
	N3	4	0	0
	N4	2	1	0

Tableau 7: Réponses obtenues à Nancy à la question A dans chaque groupe

Fréquence d'utilisation de la modélisation paramétrique par les étudiants nancéiens dans leurs projets d'architecture

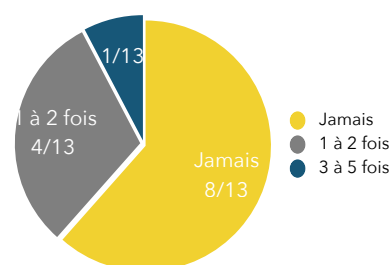


Figure 54: Réponses obtenues à Nancy à la question A

Le tableau 7 et la figure 54 ci-dessus, montrent au même titre qu'à Nancy, que l'utilisation de la modélisation paramétrique n'est pas une habitude pour les étudiants. Plus de la moitié des étudiants ne l'ont jamais utilisée dans un projet.

À la question B,

« B/ Combien de fois avez-vous déjà utilisé la **fabrication digitale** pour un projet d'architecture? »

les étudiants répondent:

Fréquence d'utilisation de la fabrication digitale par les étudiants nancéiens dans leurs projets d'architecture dans chaque groupe					
	Groupe	Jamais	1 à 2 fois	3 à 5 fois	6 fois ou plus
Nombre d'étudiants	N1	2	0	0	1
	N2	1	2	0	0
	N3	2	0	2	0
	N4	2	0	1	0

Tableau 8: Réponses obtenues à Nancy à la question B dans chaque groupe

Fréquence d'utilisation de la fabrication digitale par les étudiants nancéiens dans leurs projets d'architecture

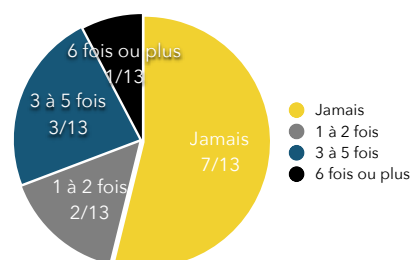


Figure 55: Réponses obtenues à Nancy à la question B

Le tableau 8 et la figure 55 ci-dessus démontrent que la fabrication digitale n'a majoritairement jamais été utilisée dans les projets des étudiants. Quatre étudiants déclarent l'avoir utilisée 3 à 5 fois ou plus. Les groupes sont cependant assez bien équilibrés.

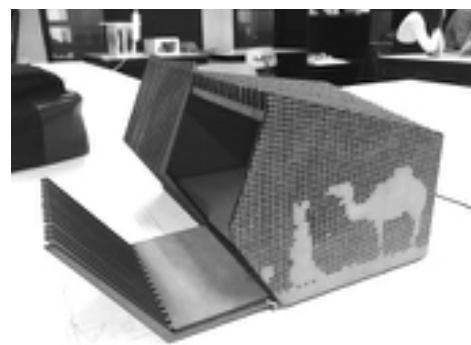
Ces résultats confirment donc la tendance observée à Mons, bien qu'à Nancy les étudiants paraissent légèrement plus habitués à la fabrication digitale. On se trouve dans en présence de profils assez similaires entre les deux terrains d'étude.

De la même manière que pour le workshop de Mons, une présentation succincte des travaux réalisés à Nancy est proposée ci-après.

Groupe N1_ [Désert]

Le groupe N1 est constitué de 3 participants. Le projet proposé par cette équipe est un abri dans un contexte désertique. Il est basé sur une structure en portique et des murs en bois perforés.

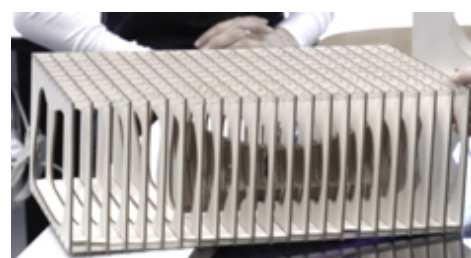
Figure 56: Maquette finale du groupe N1



Groupe N2_ [Wood cave]

Le groupe N2 est constitué de 3 participants également. Le projet Woodcave est réalisé à partir d'un volume simple dans lequel est creusé une grotte. Pour ce faire, des planches évidées à chaque fois de manière unique sont assemblées successivement pour former un volume intérieur courbe.

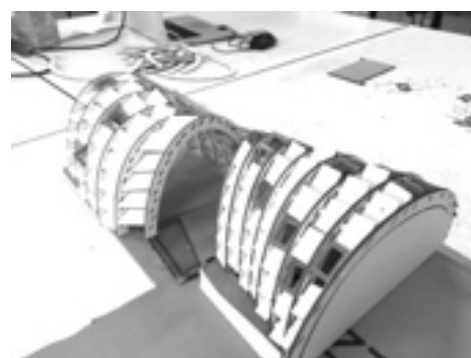
Figure 57: Maquette finale du groupe N2



Groupe N3_ [Tuiles Fjord]

Le groupe N3 est constitué de 4 participants. Le projet proposé par ce groupe est une succession de portiques en arcs, reliés par des tuiles pleines ou creuses.

Figure 58: Maquette finale du groupe N3



Groupe N4_ [Origamique]

Enfin, le groupe N4 est constitué de 3 participants. Ils proposent un abri réalisé à partir de facettes triangulaires identiques pour les murs mais uniques pour la toiture. Un travail précis d'assemblage de ces facettes a été effectué.

Figure 59: Maquette finale du groupe N4



2. La maquette physique: support de la modélisation paramétrique

Un premier résultat, identifiable à la suite de l'analyse des données récoltées, est une utilisation de la maquette physique traditionnelle en tant que support de la modélisation numérique. L'esquisse a aussi joué ce rôle et cette observation est également présentée dans cette section.

L'utilisation d'une maquette de référence en support de la modélisation paramétrique est dans un premier temps explicitée. Ensuite, l'utilisation du modèle paramétrique en tant qu'outil de simulation associé à la vérification par la matière est présentée.

2.1. La maquette physique de référence

Les processus observés au workshop « matérialités numériques » de Mons se caractérisent au départ, par la réalisation de maquettes physiques traditionnelles et d'esquisses d'intentions. Ces artefacts ont pour but premier d'explorer les premières formes et les premières idées. Cependant, les groupes M1 et M3 en particulier les ont utilisées en tant que point de départ de la modélisation et comme support de réflexion pendant la modélisation.

Les analyses qui suivent se réfèrent aux lignes du temps représentant le processus de conception de chaque groupe. Elles ont été élaborées à partir de la grille de transcription comme cela a été présenté dans la section 1.3 de la partie traitement des données. Deux exemples sont décrits et détaillés pour le groupe M4 et N4 dans la suite de ce travail. Les autres sont placés en annexes.

Cas du groupe M1 (cf. annexe 11)

Le processus du groupe M1 a débuté par la réalisation d'esquisses d'intentions. La modélisation paramétrique a très vite été entamée et des premiers essais de modélisation ont abouti à une première forme (0) (figure 60). Cependant, le deuxième jour, les maquettes physiques 1 et 2 ont été élaborées. Celles-ci ont déterminé la forme finale et définitive du projet. Les concepteurs se sont mis d'accord sur la forme autour de cette maquette physique puis la modélisation paramétrique a été réalisée dans l'objectif de la reproduire. La figure 60 ci-dessous illustre cette première phase décisive dans le processus.

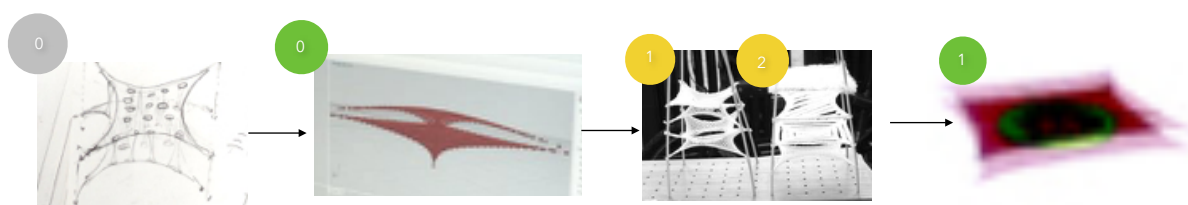


Figure 60: Evolution du modèle numérique en fonction de la maquette physique

Cas du groupe M3

Le groupe M3 a également utilisé la maquette physique traditionnelle réalisée comme support à la modélisation paramétrique. Cette maquette, présentée à la figure 61, réalisée

en carton mousse, fils de fer et tissu, constituait une représentation déjà précise de ce que les étudiants comptaient modéliser. Elle a été support de la modélisation tout au long du processus. C'est d'ailleurs la seule maquette complète réalisée avant la maquette finale au cours du processus.

Figure 61: Maquette physique initiale réalisée par le groupe M3



La figure 62 ci-dessous, illustre quelques moments d'utilisation de cette maquette pendant la modélisation. On peut constater que la maquette physique élaborée par ce groupe a été très sollicitée pendant la phase de modélisation sur Grasshopper au point parfois d'être posée sur le clavier de l'ordinateur.

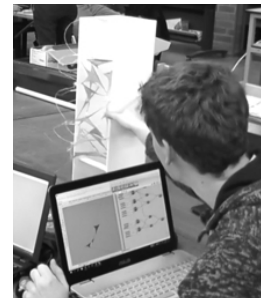
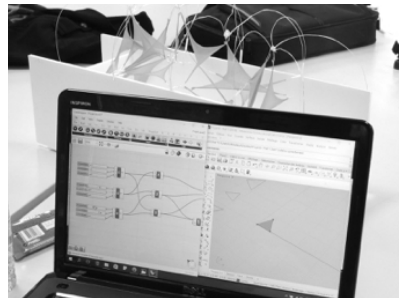


Figure 62: Photographies illustrant l'utilisation de la maquette de référence en support de la modélisation paramétrique.

Au workshop CFD de Nancy, aucune maquette physique traditionnelle n'a été réalisée avant le début de la modélisation paramétrique. En revanche, l'utilisation du croquis en support de la modélisation paramétrique a été observée. Cette différence majeure entre les deux workshops sera discutée dans la dernière partie de ce travail.

2.1. Le croquis d'aide à la modélisation

L'esquisse a également joué un rôle dans l'élaboration de la modélisation paramétrique. Cette caractéristique a été observée dans les groupes M1, M3, N1, N2, N3, N4.

Dans le groupe M1, l'esquisse 2 (Figure 63) réalisée le troisième jour du workshop est une réflexion entre les étudiants et les encadrants sur les méthodes possibles d'élaboration du plan d'algorithme pour la modélisation paramétrique. On observe sur cette photographie des figures géométriques expliquant une méthode possible pour élaborer l'algorithme de la modélisation paramétrique. Ces croquis sont spécifiques à l'élaboration du modèle paramétrique.



Figure 63: Utilisation du croquis en support de la modélisation paramétrique par le groupe M1.

Le groupe M3, a quant à lui beaucoup travaillé avec l'esquisse pendant la phase de modélisation. Certains croquis réalisés consistent en la numérotation de chaque toile et permettent aux concepteurs d'organiser le plan d'algorithme permettant la modélisation paramétrique.

La figure 64 ci-dessous illustre quelques moments où cette utilisation a pu être observée. Au même titre qu'avec la maquette physique, la modélisation est interrompue par une réflexion par le croquis devant l'écran d'ordinateur.



Figure 64: Photographies illustrant l'utilisation du croquis en support de la modélisation paramétrique par le groupe M3.

Sur ces croquis (Figure 65) on distingue les dessins et la numérotation des 13 toiles, les 10 points d'accroches et les trois clés de voûte.

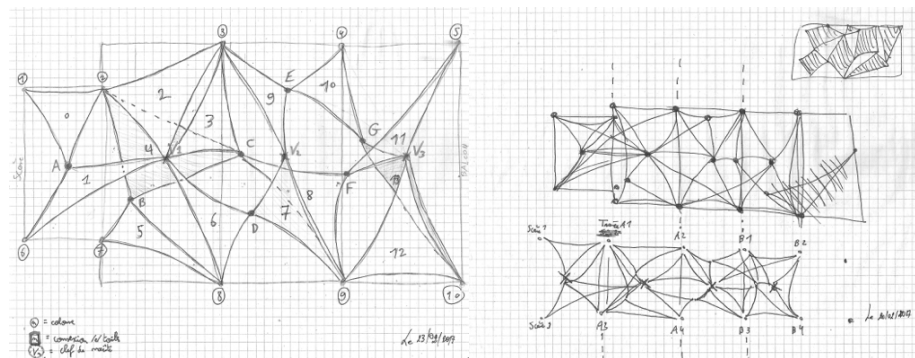


Figure 65: Photographies de quelques croquis du groupe M3.

L'utilisation de la maquette et du croquis en support de la modélisation est présentée par le schéma de la figure 66 ci-dessous. Ce schéma élaboré à partir de la ligne du temps du groupe M3 montre une utilisation du croquis (pastilles ●) et la maquette physique (pastilles ●) de manière continue sur une grande partie du processus de conception. Les flèches s'orientent vers la ligne « numérique » car les deux outils traditionnels font progresser le modèle numérique (pastilles ●).

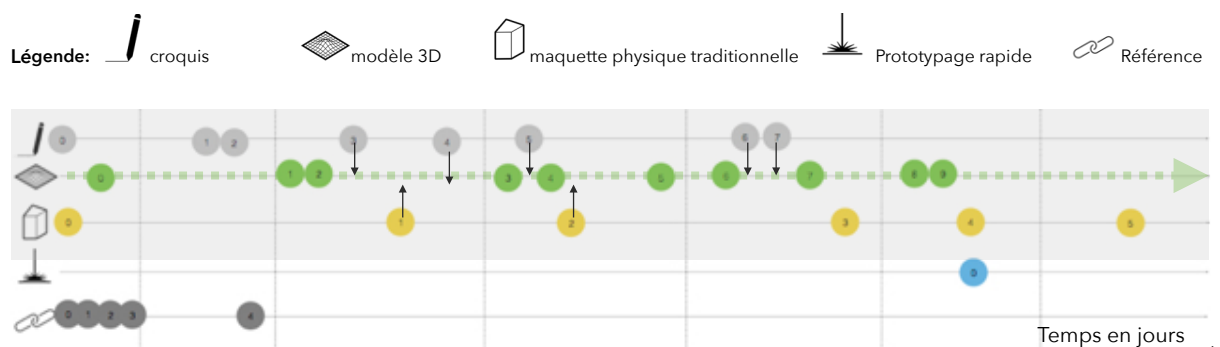


Figure 66: Schéma d'analyse du processus de conception du groupe M3

Les données récoltées au workshop CFD soulignent aussi cette utilisation du croquis (Figure 67). Les membres du groupe N2, par exemple, ont commencé par dessiner les courbes en 2D du volume intérieur qu'ils souhaitaient avant de les dessiner sur le logiciel Rhinocéros. Dans les autres groupes, le croquis est utilisé pour réfléchir à la manière d'élaborer le plan d'algorithme.

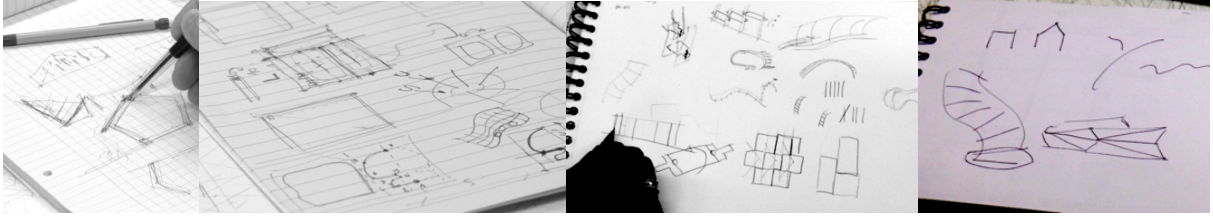


Figure 67: Photographies illustrant l'utilisation du croquis en support de la modélisation paramétrique par les équipes de Nancy (de gauche à droite: N1, N2, N3, N4)

L'utilisation de ces deux outils traditionnels (maquette et croquis) en support de la modélisation paramétrique s'est faite de manière naturelle dans ces groupes. Ce constat démontre un besoin de réflexion à partir des outils de base de l'architecte. Il met en évidence une manière spécifique propre à la modélisation paramétrique d'utiliser ces deux outils traditionnels.

Dans ces deux environnements de conceptions numériques similaires, les concepteurs participants se sont appropriés les outils traditionnels que sont la maquette physique et le croquis en support de l'élaboration du modèle paramétrique. La maquette de référence a pu être identifiée dans plusieurs groupes.

La partie suivante identifie des interactions plus spécifiques aux contraintes physiques qui ont pu être observées entre le modèle paramétrique et la maquette physique traditionnelle.

2.3. La simulation numérique, la vérification physique

Les concepteurs observés à Mons en particulier ont exploité le modèle paramétrique pour simuler des situations, des comportements ou encore définir une manière de matérialiser la solution. Ces situations ont été particulièrement observées pour les groupes utilisant la toile tendue, à savoir les groupes M1 et M3.

Le comportement réel élastique des toiles tendues a en effet été simulé dans le modèle paramétrique. Les participants ont été poussés dans cette démarche par les encadrants. Cette simulation a été possible grâce à Kangaroo, « plug-in » de Grasshopper. Il s'agit d'un simulateur de contraintes physiques permettant aux concepteurs des les intégrer au modèle 3D et ainsi concevoir une forme sous l'action d'une contrainte (<http://kangaroo3d.com/>).

Les concepteurs ont ainsi pu explorer des formes en intégrant les caractéristiques du matériau (l'élasticité ou le poids propre) et ont pu optimiser la forme pour diminuer les contraintes.

La figure 68 ci-dessous illustre son utilisation par le groupe M3. L'image de gauche représente trois toiles modélisées sans l'activation du « plug-in », c'est à dire sans prise en compte des propriétés intrinsèques du matériau. L'image de droite représente ces mêmes toiles après l'application du « plug-in ».

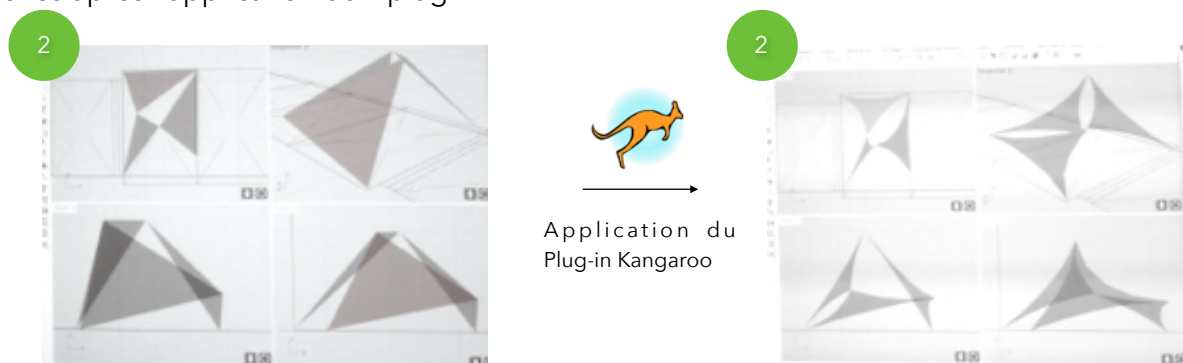


Figure 68: Application du « plug-in » Kangaroo dans le modèle Grasshopper du groupe M3

Ce plug-in a été utilisé par chaque équipe montoise mais s'est avéré indispensable pour les groupes M1 et M3 en particulier. Son utilisation a permis par exemple la visualisation de la forme après intégration aux dimensions de la chapelle, ou encore la visualisation des zones aux plus fortes déformations illustrées par la figure 69.

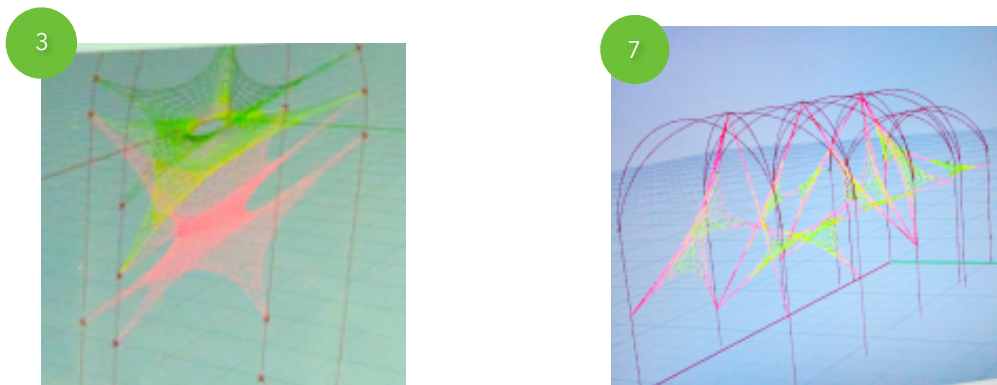


Figure 69: Photographies illustrant la simulation de la déformation dans Grasshopper par le groupe M1 (à gauche) et M3 (à droite)

Les étudiants ont ainsi pris conscience des fortes contraintes concentrées aux points d'accroche des toiles et ont ensuite décidé de vérifier la résistance des assemblages et de la matière en maquette physique (Figure 70). D'autre part, l'élasticité du matériau choisi a été intégrée au modèle numérique et des ajustements de paramètres ont dû être effectués.

Les comportements observés et les propos recueillis par la vidéo du groupe M3 illustrent cette situation:

- « Il faut contraindre le modèle à ne pas dépasser la valeur 2 »
- L'étudiant propose d'implémenter une valeur d'élasticité de 3 et de voir l'effet sur le modèle.
- Change l'élasticité à 1 et regarde la forme du modèle. « Ca n'a pas l'air de tirer trop tôt ça donne déjà une forme intéressante ».
- « Il faudrait pouvoir voir avec des couleurs. »

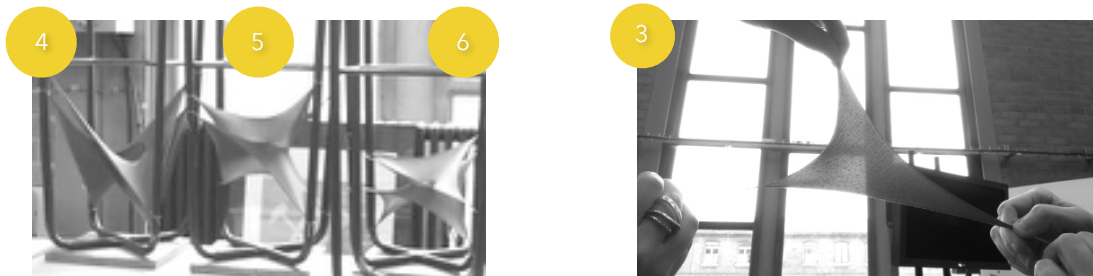


Figure 70: photographie illustrant la vérification physique de la déformation par le groupe M1 (à gauche) et M3 (à droite)

Une fois terminé, le modèle paramétrique a été exploité pour la recherche formelle et pour l'exploration des comportements. Le groupe M3 a testé une configuration extrême dans le cas où les points de fixations des toiles étaient situés à une distance maximale (Figure 71). Cette vérification numérique a ensuite permis au groupe M3 d'exporter les données géométriques précises fournies par le modèle afin de matérialiser la forme.

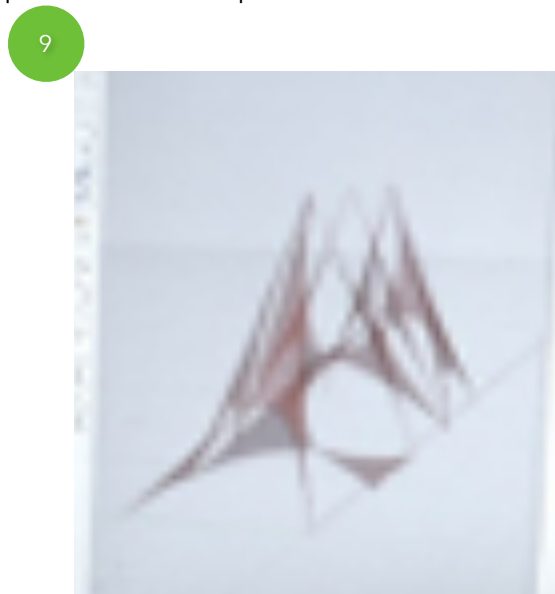


Figure 71: Simulation de la déformation maximale dans Grasshopper par le groupe M3

Des interactions fréquentes entre le modèle paramétrique et les maquettes physiques ont pu être observées lors de la semaine de conception à Mons.

La modélisation paramétrique a permis de visualiser facilement les différentes configurations mais s'accompagne, pour chaque groupe, d'une vérification physique par la maquette traditionnelle. Cette observation n'est valable que pour le workshop observé à Mons car les données récoltées à Nancy montrent une approche différente qui sera présentée dans la suite du travail.

Ce recours à la maquette traditionnelle en conception numérique peut paraître étonnant dans un contexte où des outils de prototypage rapide étaient mis à disposition. Ce constat nous interpelle surtout en regard du continuum conception fabrication numérique.

Nous verrons dans la suite de ce travail que le continuum numérique conception-fabrication a pu être observé dans certains groupes mais qu'il a été partiel ou absent dans d'autres.

3. Un continuum conception-fabrication numérique observé mais limité

Le second résultat remarquable à l'issue de l'analyse des données est une différence notable entre les différents processus conception-fabrication numériques observés tant à Mons qu'à Nancy. Cette section s'intéresse plus particulièrement à l'utilisation du modèle numérique paramétrique pour **la matérialisation de la maquette finale**.

Divisée en trois parties, elle rassemble d'abord les processus ayant exploité les informations numériques pour matérialiser la proposition en phase finale du workshop. Elle présente le processus de conception d'une équipe spécifique n'ayant pas eu recours à ce continuum. Finalement, elle présente un processus où le continuum a été restreint pour des raisons qui seront explicitées.

Les résultats présentés dans cette partie s'appuient sur les huit lignes du temps réalisées et présentées en annexes.

3.1. Un continuum numérique de matérialisation observé

La matérialisation à partir de données numériques a été particulièrement exploitée par les groupes du workshop de Nancy et le groupe M3 du workshop de Mons.

Les résultats présentés dans cette sous-partie concernent l'exploitation du modèle paramétrique par les équipes M3, N1, N2 et N3, pour concevoir et matérialiser leur maquette finale.

Cas du groupe M3 [Les ailes de Bélian]

Le processus du groupe M3 se caractérise par un investissement important dans la modélisation paramétrique. En effet, dans cette équipe, la plus grande partie du workshop a été consacrée au modèle numérique. Le tableau 9 ci-dessous présente le nombre de versions d'artefacts testés par ce groupe, telles que révèlent nos observations.

Type					
Nombre de versions	8	10	6	1	5

Tableau 9: synthèse des versions d'artefacts élaborées par le groupe M3

La conséquence est un modèle paramétrique très abouti qui a été exploité tant pour la simulation que pour la matérialisation de la maquette finale. Ce groupe n'a cependant pas utilisé les outils de prototypage rapide car le matériau en tissu ne s'y prêtait pas. En revanche, un continuum a tout de même pu être observé.

En effet, une fois la forme finale choisie dans le modèle Grasshopper, un «bake» a été réalisé, terme anglais utilisé dans Grasshopper pour signifier « cuire », autrement dit figer une forme avant de l'exporter. Une mise à plat et une numérotation de chaque toile a ensuite permis de créer des patrons qui ont servi à la découpe des toiles dans les bonnes dimensions et à l'assemblage de chacune des toiles au bon emplacement. Ce processus

de matérialisation est illustré par les photographies présentées dans la figure 72 ci-dessous.



Figure 72: photographies de la matérialisation des toiles à partir des données de Grasshopper

Le processus de conception du groupe M3 peut se schématiser de la manière suivante (figure 73):

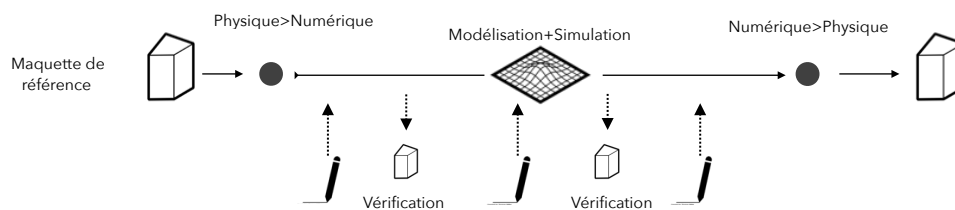


Figure 73: schéma résumé du processus de conception du groupe M3

Il débute par la réalisation d'une maquette physique traditionnelle qui sert de référence et de support à l'élaboration du modèle paramétrique. La phase de modélisation représente une grande partie du processus et comprend la simulation des comportements physiques. Elle est alimentée par le croquis et des phases de vérification sont réalisées de manières ponctuelles par la maquette physique traditionnelle. Enfin, il se termine par une matérialisation en exploitant les données numériques pour obtenir la maquette finale.

Cas des groupes N1_N2_N3_N4 (annexes 19,21,23,25)

A la différence du workshop observé à Mons, les lignes du temps mettent en évidence des processus plus homogènes entre les groupes. Les figures 74, 75, 76 schématisent l'approche adoptée par ces différents groupes.

Les processus de conception de ces trois groupes ont la particularité d'être très séquencés et très peu itératifs. On remarque en effet trois grandes phases bien distinctes: la phase de **recherche**, la phase de **modélisation** et la phase de **fabrication**. L'utilisation de la maquette physique comme moyen de conception a donc été écartée et aucuns prototypes n'ont été réalisés. Par ailleurs, dans ces trois groupes, la matérialisation finale a été réalisée à partir des données numériques en utilisant la fabrication digitale. Ces processus sont donc très axés sur la modélisation et rejoignent le processus du groupe M3 observé à Mons. La matière a eu un rôle peu important dans les phases de conception.

Les pastilles grises représentent les croquis réalisés en support de la modélisation comme nous l'avons présenté précédemment.

Des résultats si homogènes sont en partie liés à l'encadrement et à l'énoncé de l'exercice. Cependant, la suite de ce travail démontre que le groupe N4 a adopté une démarche différente basée sur le prototypage. Cette influence du cadre pédagogique sera abordée dans la dernière partie de ce travail.

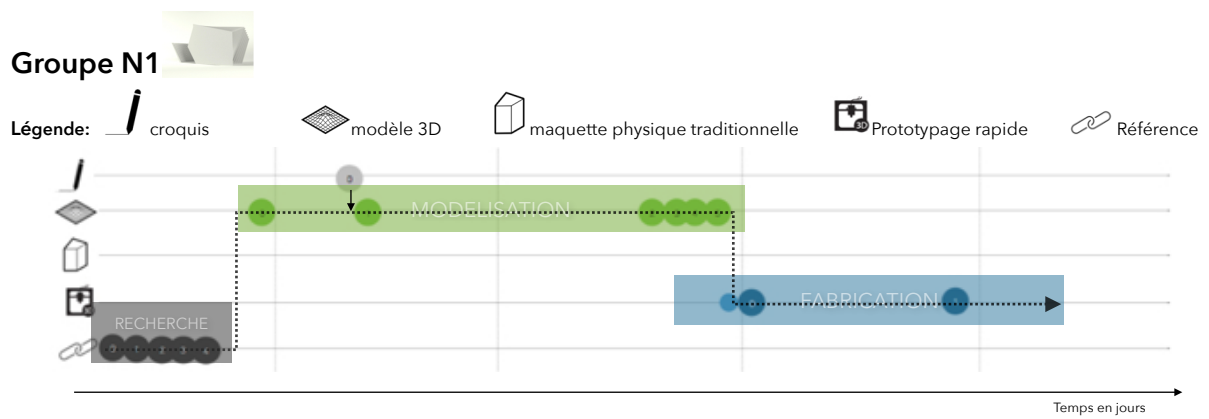


Figure 74: schéma résumant l'utilisation des différents outils dans processus de conception du groupe N1

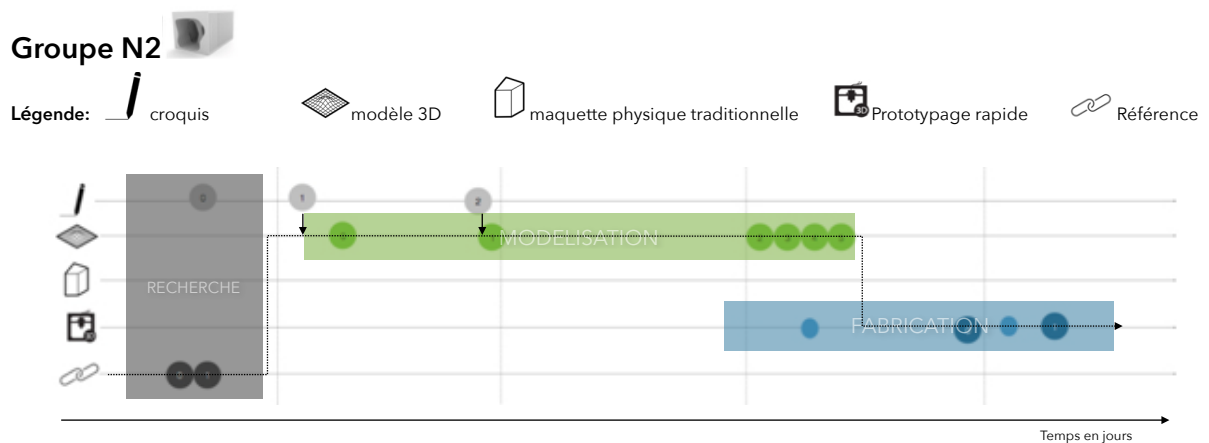


Figure 75: schéma résumant l'utilisation des différents outils dans processus de conception du groupe N2

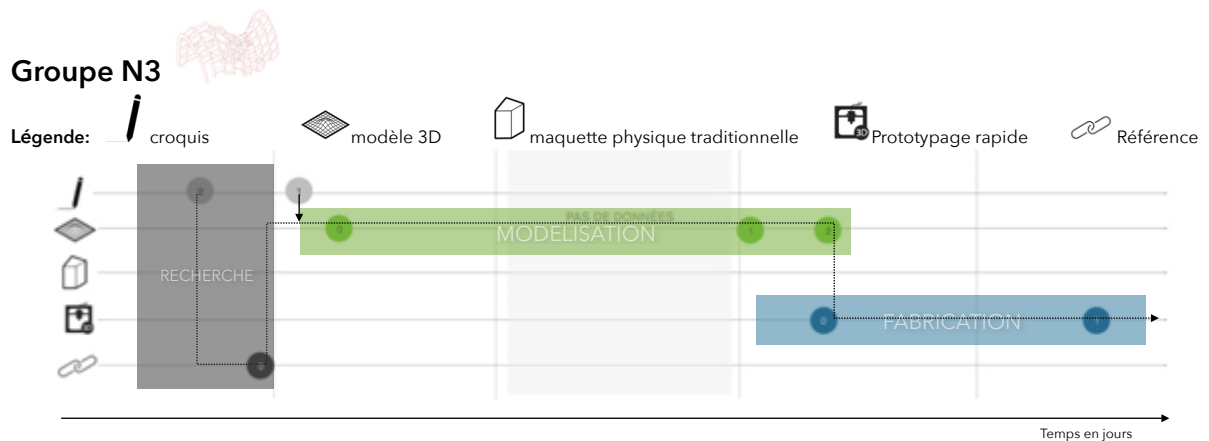


Figure 76: schéma résumant l'utilisation des différents outils dans processus de conception du groupe N3

Groupe N4

Le groupe N4, quant à lui, se démarque par la réalisation de prototypes intermédiaires avant la réalisation de la maquette finale, comme l'indique la figure 77. Dans cette équipe, on assiste à une exploitation des données numériques issues du modèle paramétrique pour matérialiser le projet à différentes étapes du processus. Le groupe N4 est entré dans un processus itératif, et a exploité les outils mis à disposition pour matérialiser leur projet. Au total, 8 prototypes intermédiaires représentés par les pastilles bleues ● dans la figure 77 sont réalisés avant la maquette finale.

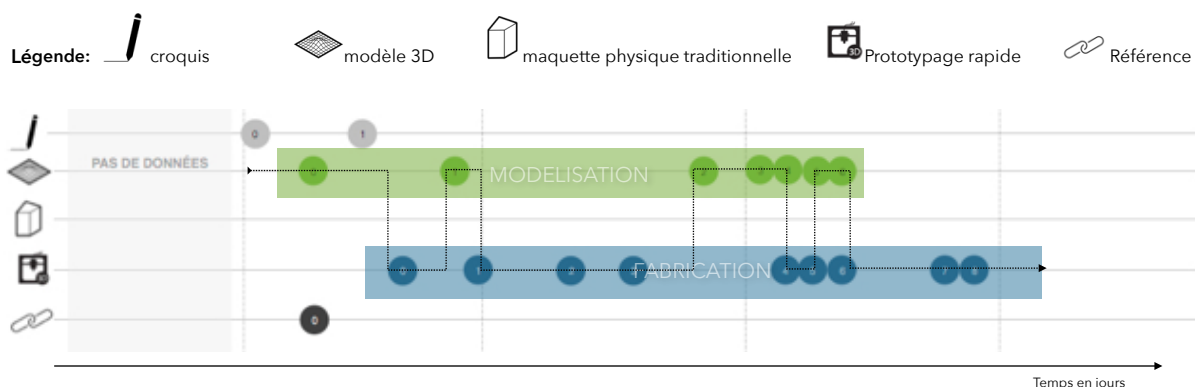


Figure 77: schéma résumé de l'utilisation des différents outils dans processus de conception du groupe N4

Contrairement aux prototypes intermédiaires réalisés par le groupe M3, ceux du groupe N4 sont réalisés à partir de données numériques et à l'aide du prototypage rapide. Cette utilisation du prototypage rapide sera détaillée dans la partie 4 des résultats.

Ainsi, une première catégorie de processus a pu être identifiée: les processus dans lesquels la matérialisation finale s'est faite à partir de l'exploitation des données numériques. On peut considérer une amorce de continuum numérique dans cette démarche. En revanche, deux autres types de processus ont pu être observés à Mons, une matérialisation effectuée en parallèle et un continuum décliné. C'est l'objet des sous-parties suivantes.

3.2. Un dis-continuum observé: cas du groupe M1

Le processus du groupe M1 se caractérise par une matérialisation parallèle au modèle paramétrique. Bien que ce groupe ait utilisé le modèle paramétrique pour la simulation comme expliqué dans le paragraphe 2.1 des résultats, la matérialisation finale n'a pas été réalisée à partir de données numériques. Le processus se caractérise par une forte utilisation de la maquette physique traditionnelle. Le tableau 10 ci-dessous montre que 11 maquettes physiques traditionnelles ont été réalisées mais qu'aucune maquette n'a été fabriquée à l'aide des outils de prototypage rapide.

Type					
Nombre de versions	3	7	11	0	9

Tableau 10: synthèse des versions d'artefacts élaborées par le groupe M1

D'autre part, la figure 78 ci-après propose un schéma d'analyse du processus du groupe M1, mettant en évidence l'utilisation de la maquette physique tout au long du processus de conception en parallèle du modèle paramétrique. Il a été montré dans le paragraphe 2.2 des résultats que la maquette physique a été utilisée en support de la modélisation. En revanche, à aucun moment les données du modèle numérique n'ont été utilisées pour matérialiser le projet final. La ligne en pointillés met en évidence les allés-retours entre les simulation numériques et physiques.



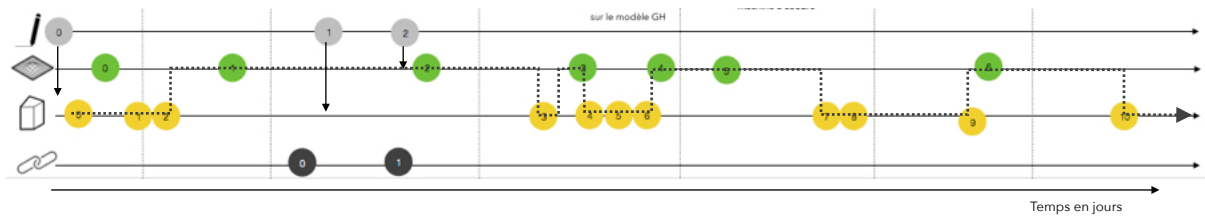


Figure 78: Utilisation des outils au cours du processus de conception par le groupe M1

Remarquons tout de même une tentative de décomposition des toiles afin de prévoir une matérialisation à plus grande échelle (Figure 79). A la demande des encadrants, les étudiants se sont posé la question d'une réalisation à l'échelle 1:1. Ils ont décidé de décomposer la toile principale en une succession de petits éléments pour faciliter la mise en oeuvre. Cette méthode constructive n'a cependant pas été mise en place pour la matérialisation.

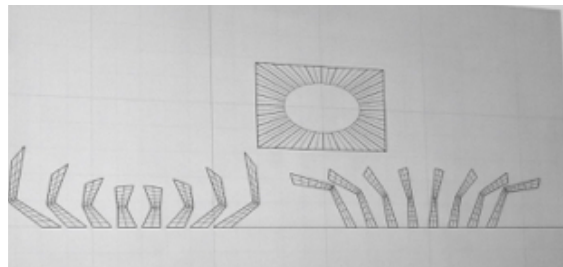


Figure 79: Photographie illustrant la décomposition de la toile

Finalement, on peut schématiser le processus de conception du point de vue des outils adoptés par le groupe M1 par la figure 80 ci-dessous.

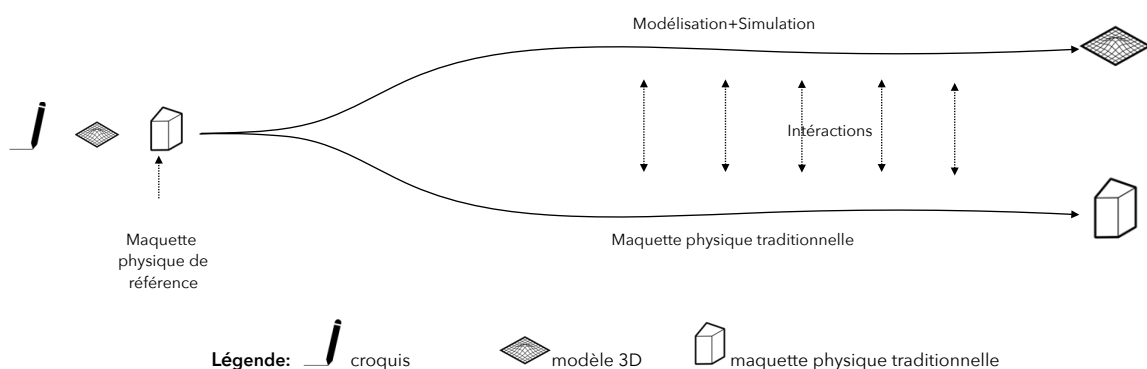


Figure 80: Schéma récapitulatif du processus de conception du groupe M1

Le processus de conception du groupe M1 se caractérise par l'usage de la maquette physique de référence en début de processus. Cette maquette a ensuite conditionné le reste du processus. L'utilisation du modèle 3D s'est faite en parallèle des prototypes physiques réalisés. Des simulations du comportement physique ont été réalisés sur le modèle Grasshopper et des vérifications physiques par la matière ont été réalisées par la maquette traditionnelle. Cependant, aucune exploitation des données numériques n'a permis la matérialisation d'un prototype physique permettant de considérer le continuum numérique de matérialisation.

3.3. Un continuum détourné: cas du groupe M2

La matérialisation numérique a eu lieu dans le groupe M2 mais d'une manière encore différente des autres groupes. Il est difficile de qualifier ici le processus de continuum numérique, mais la matérialisation numérique a tout de même été observée.

Le processus de conception de l'équipe M2 se caractérise par un travail de recherche à la fois en maquette physique et en maquette numérique. Le tableau 11 ci-dessous montre que cette équipe a réalisé 11 maquettes physiques traditionnelles et 3 matérialisations numériques.

Type					
Nombre de versions	3	6	11	3	1

Tableau 11: Synthèse des versions d'artefacts réalisés

Cette équipe dont le concept est l'origami, a débuté par la réalisation de maquettes en papier plié. Ensuite, c'est la conception d'un assemblage permettant le mouvement des facettes qui a été le centre des préoccupations. Les concepteurs se sont donc intéressés dès le premier jour à la matérialisation et à la fabrication.

Pour tester les assemblages, six maquettes traditionnelles ont été réalisées. Elles sont présentées dans la figure 81 ci-dessous. On peut observer différents assemblages réalisés (en bois, en fil de fer, en « charnière », en tissu, en anneaux). Finalement le choix sera l'assemblage en tissu.

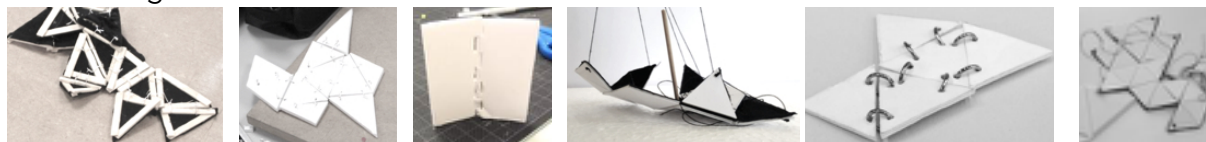


Figure 81: Photographies des assemblages réalisés par le groupe M2

On constate donc une prise en compte de l'assemblage très tôt dans le processus de conception. Une explication possible pourrait être liée à l'énoncé de l'exercice demandant une structure « dynamique ». C'est après cette exploration des différents assemblages possibles, qu'a réellement débuté la modélisation paramétrique comme le montre la ligne du temps en annexe 21. Celle-ci a permis d'explorer les formes de chaque nappe en intégrant le poids propre des nappes dans le modèle paramétrique (Figure 82).

Dans cette équipe, des prototypes intermédiaires ont d'abord été réalisés à la main, puis dans la phase finale, la matérialisation se caractérise par l'usage de l'impression 3D. Cependant, une modélisation secondaire a été réalisée sur le logiciel Sketchup pour réaliser les biseaux des facettes (Figure 83) et une pièce spécifique du mécanisme (Figure 84). Le modèle paramétrique n'a donc pas servi directement à la matérialisation mais un modèle « figé » a dû être à nouveau réalisé pour être imprimé en 3D.

D'autre part, l'utilisation de l'impression 3D s'est limitée au prototype final à l'échelle 1:10e (Figure 86) en raison du temps nécessaire pour l'impression des 42 faces (Figure 85) (environ 32h).

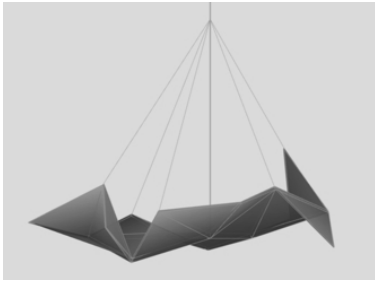


Figure 82: Capture d'écran du modèle paramétrique réalisé par le groupe M2

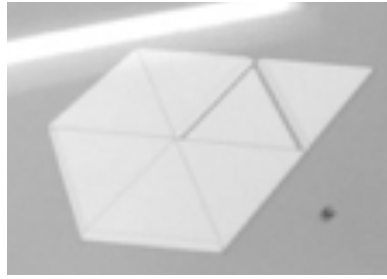


Figure 83: Capture d'écran du modèle Sketchup du groupe M2

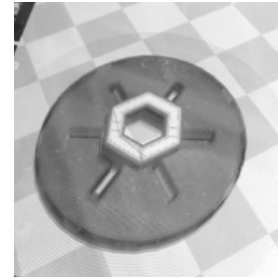


Figure 84: Photographie illustrant le modèle 3D de la pièce du mécanisme



Figure 85: Photographie des 42 faces imprimées



Figure 86: Photographie de la maquette finale au 1:10e

On peut alors résumer ce processus par le schéma ci-dessous (Figure 87):

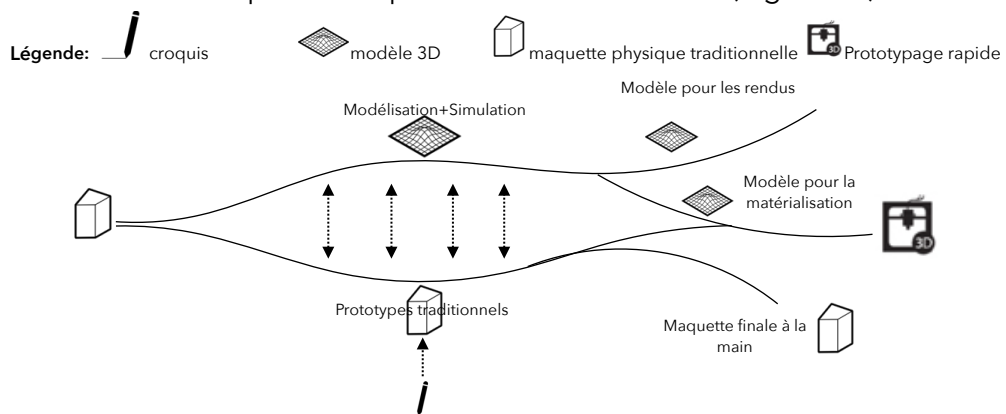


Figure 87: Schéma résumé du processus de conception du groupe M2

L'équipe de conception M2 n'est pas parvenue à matérialiser son projet de manière continue par l'exploitation du modèle paramétrique. La dernière phase de matérialisation s'est en effet appuyée sur un travail supplémentaire de modélisation sur Sketchup. Le passage au logiciel Sketchup, peut témoigner d'une limite du logiciel Grasshopper concernant la préparation et l'accès à la matérialisation ou bien d'une maîtrise encore trop faible pour préparer la matérialisation directement dans le modèle paramétrique. Les concepteurs ont par ailleurs été limités par le temps de matérialisation nécessaire à l'impression 3D et se sont tournés vers la maquette physique traditionnelle pour vérifier les solutions et matérialiser le prototype final à l'échelle 1:20e.

.....

Enfin, ces résultats ont montré des processus de conception différents dans des environnements de conception similaires. Le continuum numérique a été observé dans certaines équipes de conception mais il a été détourné voire absent dans d'autres. Certains groupes ont par ailleurs réalisés des prototypes intermédiaires en exploitant les machines à commande numérique. La partie suivante s'intéresse à l'intégration du prototypage rapide dans le processus de conception.

.....

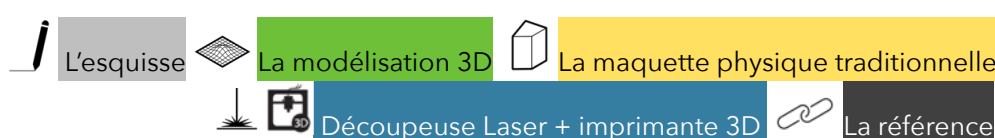
4. Deux utilisations du prototypage rapide

L'utilisation du prototypage rapide tel qu'il a été défini dans l'état de l'art, c'est à dire la réalisation de prototypes intermédiaires dans le processus de conception à partir de données numériques pour vérifier la fonctionnalité du produit, a été observée dans deux groupes, M4 et N4.

Dans les autres groupes, les prototypes étaient réalisés soit juste avant la matérialisation finale, soit en maquette physique traditionnelle. Les groupes M4 et N4 ont donc exploité les machines présentes au FabLab. Cette partie décrit l'utilisation du prototypage rapide spécifique à ces deux groupes et met en évidence l'intégration de ces outils au sein du processus global.

4.1. Un prototypage rapide intégré

Le groupe N4 se démarque des autres groupes observés à Nancy par l'usage du prototypage rapide. La ligne du temps décrivant le processus entier du groupe N4 est présentée à la figure 88 de la page suivante. Cette ligne du temps comprend les grandes étapes du processus de conception ainsi que certaines sous étapes importantes. En dessous de ces phases, sont présentés les différents artefacts réalisés au cours du processus reprenant la légende ci-dessous :



Chaque artefact réalisé est associé à un chiffre et une couleur. Enfin, des illustrations de ces artefacts sont présentés dans la partie inférieure.

Comme il a été décrit dans la partie 3.1, les phases de modélisation et matérialisation se chevauchent pour ce groupe. Au total, on compte 9 prototypes réalisés à partir des machines et aucune maquette réalisée traditionnellement (Tableau 12)

Type					
Nombre de versions	2	7	0	9	1

Tableau 12: synthèse des versions d'artefacts réalisées

Une première remarque concerne le but des prototypes produits. Les prototypes 4-5-6 (Figure 88) sont des prototypes réalisés à petite échelle pour évaluer des formes, il s'agit d'un exemple de « form finding ». Tous les autres prototypes, à part la maquette finale, ont pour but de trouver une solution pour connecter les facettes entre elles et touchent donc à l'assemblage. Au total, quatre versions d'assemblages ont été réalisées. Ces prototypes sont présentés dans le tableau de l'annexe 26.

Le choix de l'échelle a une importance sur l'efficacité du prototypage rapide et sera discuté dans la dernière partie de ce travail.

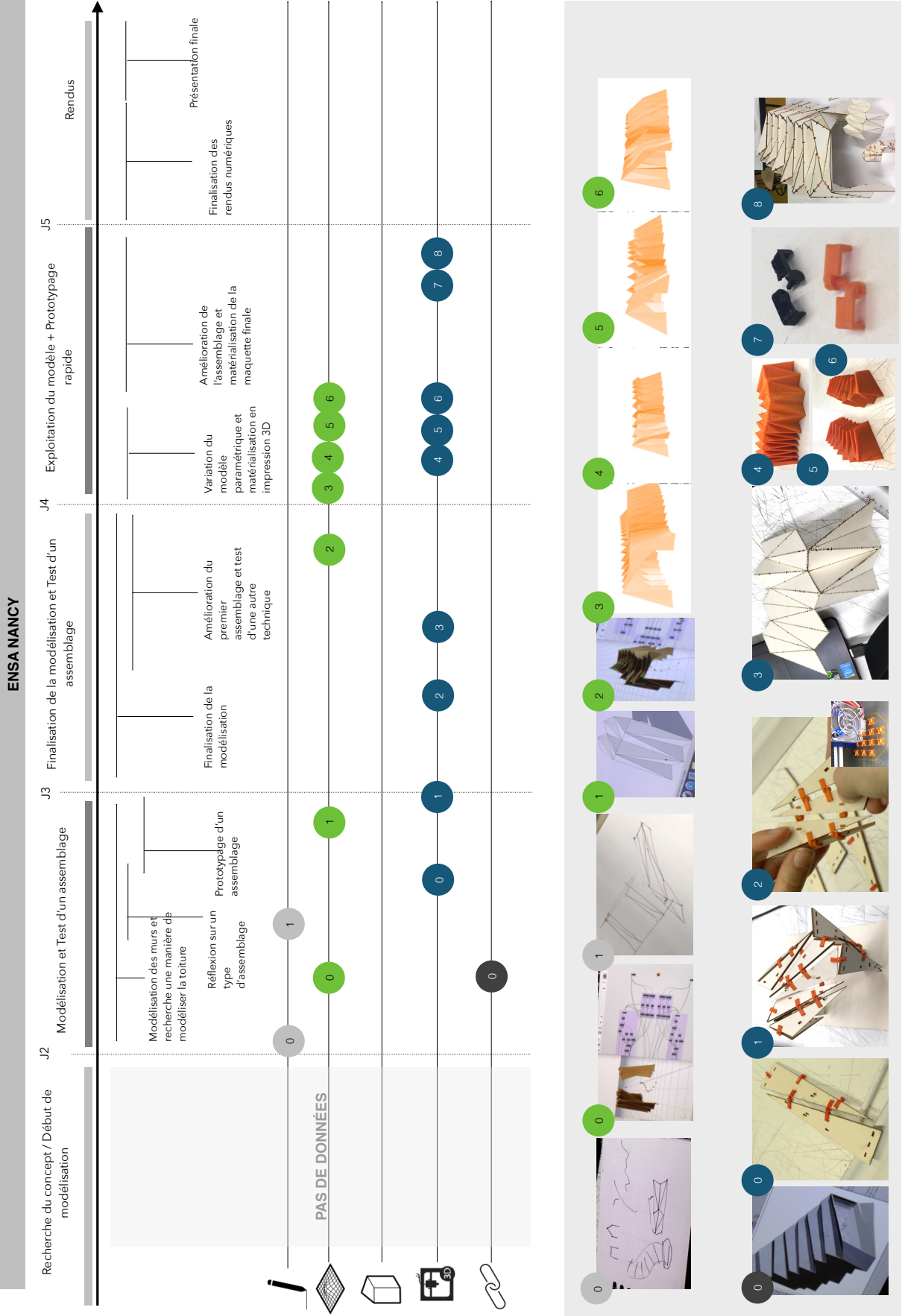


Figure 88: Ligne du temps représentant le processus de conception du groupe N4.

Une seconde remarque concerne l'origine de ces prototypes. Cette équipe a su intégrer une partie de la matérialisation dans le modèle paramétrique. La figure 89 ci-dessous présente le script élaboré pour la découpe laser. En revanche, les éléments d'assemblages en charnière (Figure 90) n'apparaissent pas dans l'algorithme et ont probablement été modélisés séparément. On peut considérer que ce groupe a intégré le prototypage rapide au modèle paramétrique mais qu'il reste des limites à son intégration. Ces limites feront l'objet d'une section dans la dernière partie de ce travail. L'exemple suivant présente une autre manière d'utiliser les outils mis à disposition.

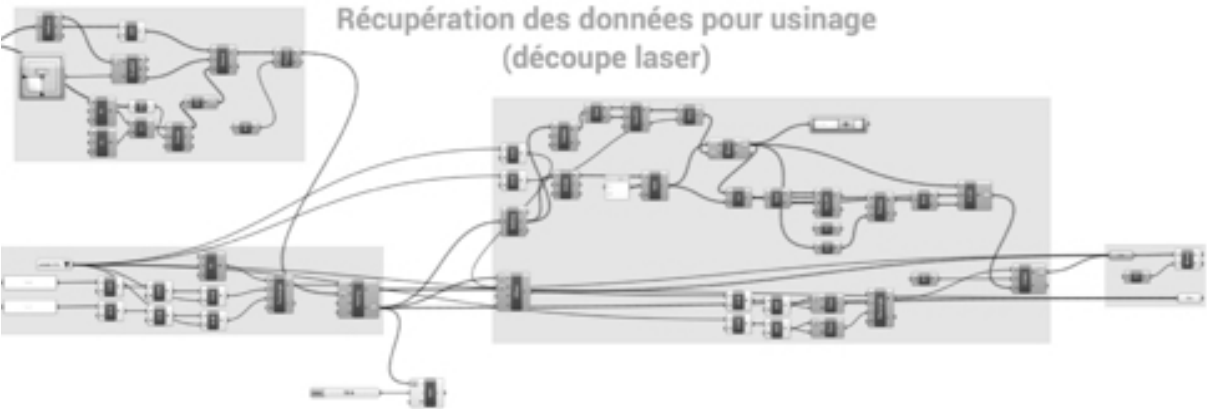


Figure 89: Algorithme Grasshopper élaboré par le groupe N4 pour intégrer la matérialisation (Groupe N4)

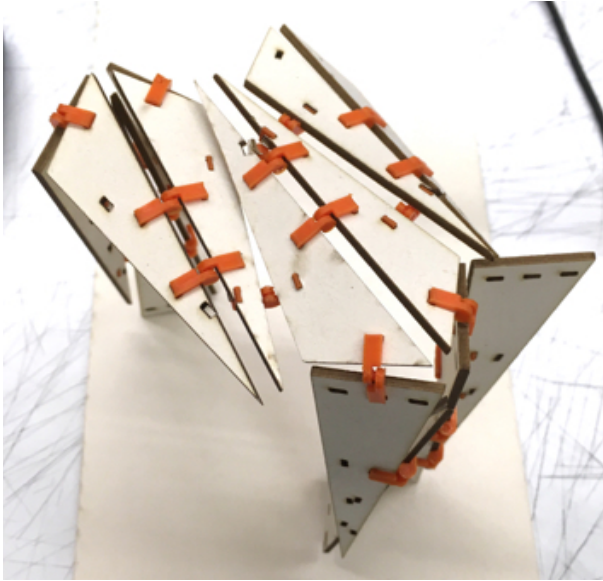


Figure 90: Prototype testant l'assemblage en charnière

4.2. Un prototypage rapide non-intégré

Le processus de conception du groupe M4 se caractérise, premièrement, par une réalisation d'un nombre très important de prototypes au regard de la durée du workshop et des autres équipes de conception. La ligne du temps du processus de conception de ce groupe est présentée dans la figure 93 (pages suivantes). 20 prototypes ont été réalisés à l'aide de la découpeuse laser (Tableau 13).

Type					
Nombre de versions	9	5	5	20	9

Tableau 13: synthèse des versions d'artefacts utilisés

La ligne du temps (Figure 93), montre tout d'abord, que les premières phases du processus se caractérisent par l'utilisation des outils traditionnels que sont l'esquisse, la maquette physique, la recherche de références. Cette première phase a abouti à une forme de lustre hexagonal qui se plie (prototype 1 et 2). L'assemblage a été assuré dans un premier temps par du papier collant. Cependant, très vite les encadrants ont demandé aux étudiants de trouver une solution réalisable à échelle réelle. Cette demande est liée aux objectifs de l'énoncé et a évidemment influencé la manière de concevoir des étudiants.

L'étude des assemblages a débuté par une discussion quant à la technologie permettant de remplacer le papier collant: la soustraction de matière. Celle-ci a été proposée par un des encadrants puis expliquée par le schéma de la figure 91 ci-dessous.



Figure 91: schéma d'explication de la technologie par soustraction de matière réalisé par un encadrant

Cependant, les étudiants, n'ayant jamais utilisé cette méthode auparavant, ont été peu convaincus par cette idée. La recherche s'est poursuivie par la réalisation de croquis. Puis finalement, une référence utilisant la soustraction de matière a été trouvée sur internet et a suscité la curiosité des concepteurs (Figure 92). Il s'agit d'un moment charnière dans le processus de conception. En effet, la réalisation du premier prototype à la découpe laser a modifié la façon de travailler des étudiants.



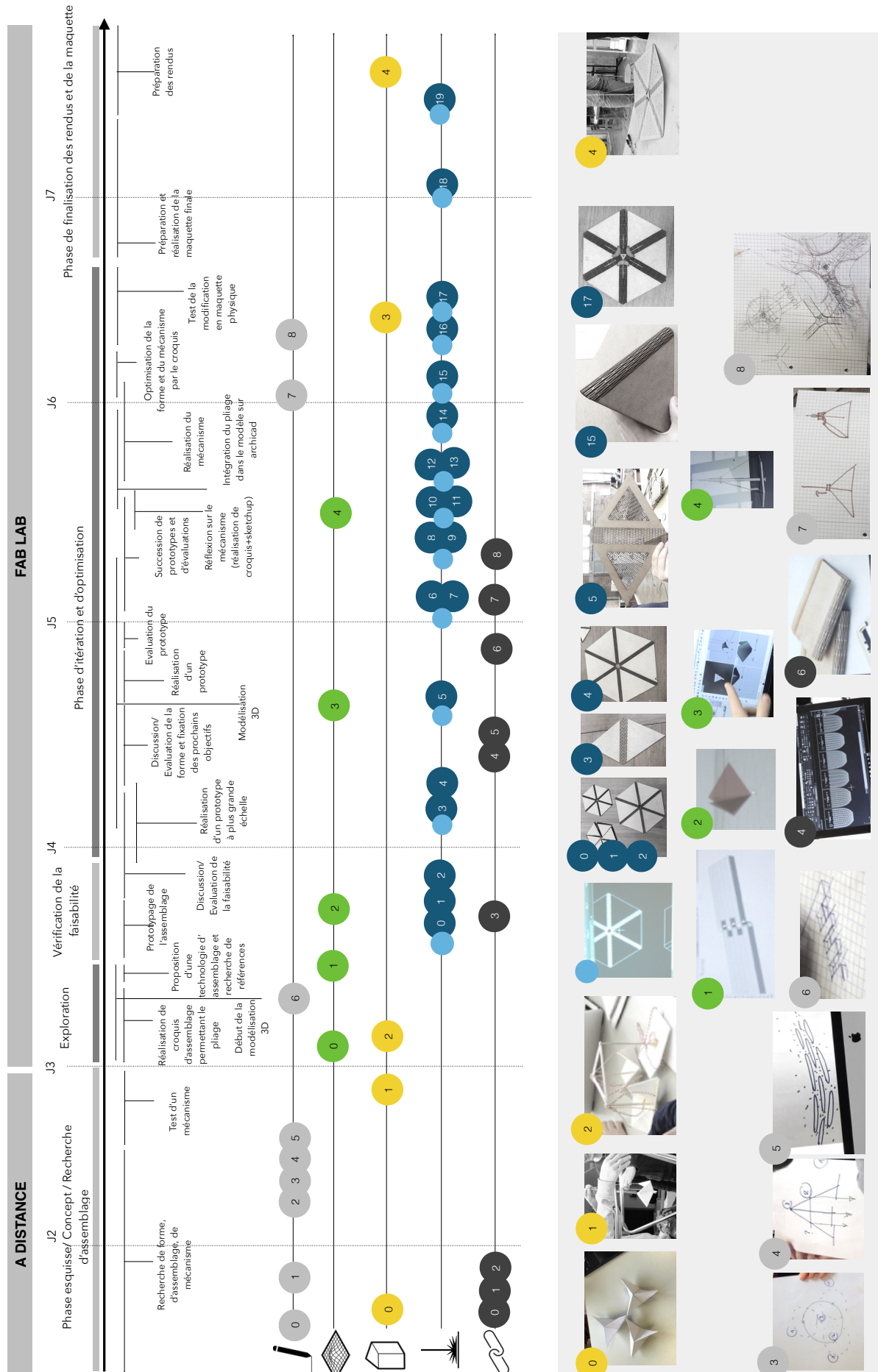
Figure 92: A gauche, référence de motifs au format DXF, à droite vidéo youtube utilisant la technologie

A partir de ce premier test, les concepteurs sont entrés dans un processus itératif basé sur l'exploitation de la machine et sur l'optimisation de la solution choisie.

Chaque prototypage nécessite une phase de préparation, une phase de réalisation, une phase de nettoyage, une phase d'évaluation et une phase de prise de décisions.

Cette séquence se répète 12 fois sur la totalité du processus de conception et est symbolisée par les flèches tournantes de la figure 94 ci-après. Cette boucle d'itération est détaillée dans la figure 95.

Figure 93: Ligne du temps représentant le processus de conception du groupe M4.



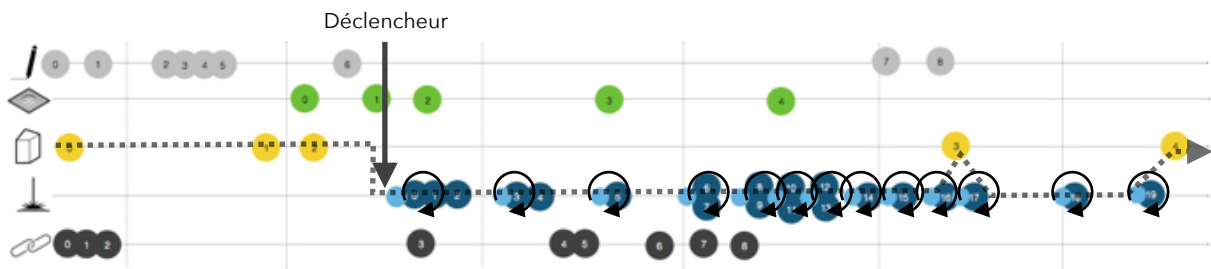


Figure 94: Schéma d'analyse du processus de conception illustrant les boucles itératives du groupe M4

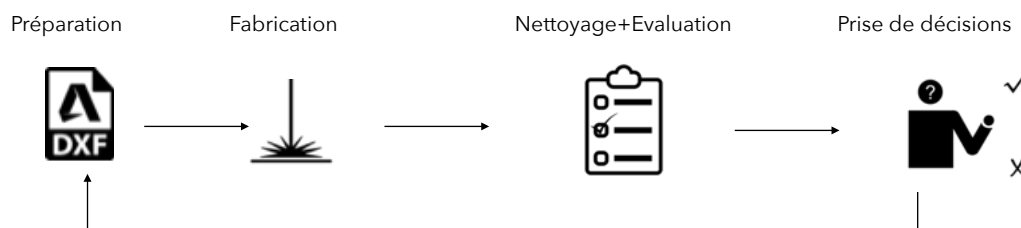
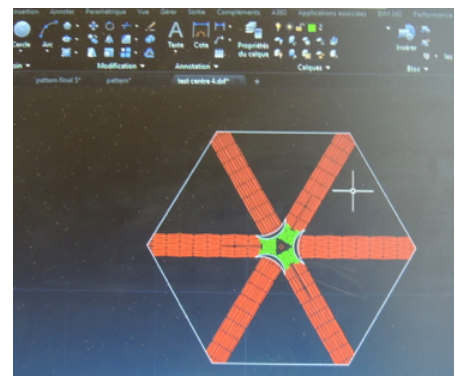


Figure 95: Séquence typique du prototypage rapide dans le groupe M4

Comme l'indique la figure 95 et 96, la préparation s'effectue sur Autocad. Celle-ci n'a pas de lien avec le modèle paramétrique utilisé en parallèle. Bien que conseillé par les encadrants du workshop, les étudiants n'ont pas souhaité créer un motif de découpe paramétrable dans le modèle Grasshopper. Cela leur aurait pourtant permis de modifier le motif rapidement en changeant un paramètre, puis de l'extraire directement en 2D.

La raison qu'ils évoquent est la suivante: un investissement nécessaire trop important pour arriver à cette modélisation. L'informaticien, présent dans ce workshop et ayant une maîtrise supérieure du logiciel Grasshopper, avait pourtant préparé l'algorithme permettant cette modélisation mais les étudiants ne l'ont pas exploité. La conséquence de cette décision sur la totalité du processus est une préparation de la matérialisation systématiquement chronophage. Les étudiants ont en effet dessiné le motif 2D sur Autocad pour chaque prototype en modifiant la forme et la taille. La figure 96 illustre ce travail. Le motif sera intégré plus tard dans le processus de manière figée sur Archicad pour obtenir les images de rendus.

Figure 96: Préparation de la découpe par le groupe M4 sur Autocad



Cette situation met en évidence une utilisation du prototypage rapide prononcée sans intégration au modèle paramétrique. Le manque de maîtrise du logiciel paramétrique est la raison évoquée par cette équipe. Ce constat sera discuté dans la dernière partie de ce travail. Par ailleurs, on peut identifier des rôles différents entre les prototypes réalisés dans le processus de conception. La section suivante s'intéresse plus particulièrement aux rôles joués par ces prototypes.

4.3. Résumé des rôles des prototypes

Après avoir présenté deux utilisations différentes du prototypage rapide, intéressons nous maintenant aux rôles joués par les prototypes réalisés traditionnellement ou numériquement. L'objectif ici est d'explorer les rôles des prototypes réalisés suivant ces deux manières, afin d'identifier un éventuel apport dans le processus de conception.

L'analyse des différents prototypes ou des maquettes physiques traditionnelles réalisées dans chaque groupe a permis de dégager différents rôles. Cette analyse se base sur une description de chacun de ces prototypes présentés en annexes 12 à 26. Un exemple de cette description est présenté pour le groupe M4 dans les tableaux 14 et 15 ci-dessous.

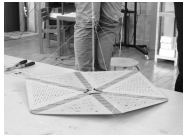
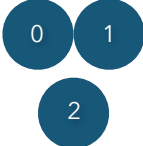
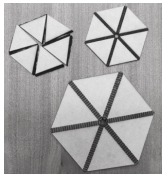
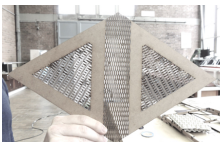
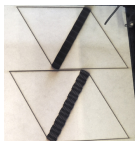
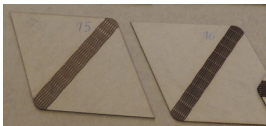
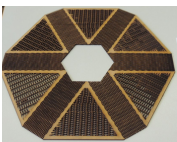
N°	Description	Photographie	Rôle
0	Première maquette « traditionnelle » réalisée en papier. Chaque travée de la chapelle comprend trois lustres qui se replient sur eux même		Recherche de la forme Test du pliage / du mouvement
1	Seconde maquette réalisée en carton mousse, une tige de bois matérialise l'accroche fixe et des ficelles sont actionnées pour plier un module		Test du fonctionnement du mécanisme
2	La maquette 1 est répétée pour obtenir les trois modules et une structure en bois est ajoutée pour les relier		Visualiser la forme avec les trois lustres
3	Premier assemblage du prototype réalisé à la découpe laser et le mécanisme de pliage		Tester le fonctionnement du mécanisme
4	Assemblage du prototype final avec le mécanisme: maquette finale		Tester le fonctionnement du mécanisme

Tableau 14: Liste des maquettes physiques traditionnelles réalisées par le groupe M4

N°	Description	Photo	Rôle
	Fichier Autocad représentant la forme du lustre avec le motif de découpe intégré		Préparer le prototypage
	Trois premiers prototypes réalisés à la découpeuse laser à deux échelles différentes		Vérifier la faisabilité et le fonctionnement de la technique
	Prototype pour tester un autre motif sur un losange		Tester un motif de pliage
	Test sur la forme entière à plus grande échelle		Vérifier le fonctionnement sur le lustre entier
	Test de la technologie sur les faces pleines		Tester un motif sur une plus grande largeur Visualiser l'aspect
	Préparation d'un nouveau prototype pour tester un autre motif de découpe		/
	Prototypes présentant des défauts dus à la machine. Celle-ci a « brûlé » trop de matière		Vérifier la réalisation Contrôler la matérialisation
	Prototypes testant la matérialisation d'autres motifs		Tester un assemblage Contrôler la matérialisation
	Prototypes testant la matérialisation d'autres motifs		Tester un assemblage Contrôler la matérialisation
	Prototypes testant la matérialisation d'autres motifs		Tester un assemblage Contrôler la matérialisation
	Préparation d'un prototype sur une pièce entière avec l'intégration d'une perforation		/
	Prototype de la forme totale comprenant une perforation des zones non pliables		Visualiser l'aspect Tester le fonctionnement Tester un assemblage Contrôler la matérialisation

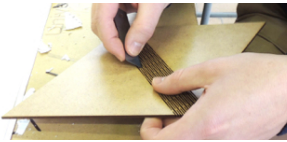
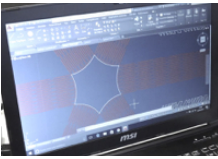
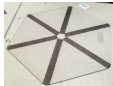
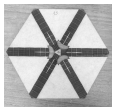
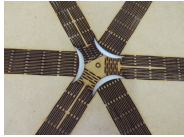
15	Prototype testant la matérialisation d'un nouveau motif. L'étudiant enlève la matière découpée par la machine (phase de nettoyage)		Tester un assemblage Contrôler la matérialisation Tester le fonctionnement
	Préparation d'un nouveau prototype de la forme totale, en réduisant le trou central, et en utilisant des courbes aux extrémités du lustres pour réduire les contraintes		/
16	Prototype de test du fonctionnement du pliage sur la forme globale avec le motif choisi		Tester le fonctionnement Vérifier la matérialisation
	Dessin de la zone centrale permettant d'intégrer le mécanisme suite au croquis 8 réalisé		/
17	Prototype permettant de tester le fonctionnement de la zone centrale		Tester le fonctionnement Visualiser l'aspect
	Ajustement de la zone centrale suite à la phase d'évaluation par la matière. Puis ajout des courbures aux extrémités		/
18	Prototype de vérification du fonctionnement		Tester le fonctionnement
19	Prototype final prêt à être assemblé au mécanisme		Tester le fonctionnement Visualiser

Tableau 15: Liste descriptive des prototypes réalisés par le groupe M4

L'ensemble des rôles observés dans les différents groupes à Mons et à Nancy sont ensuite répertoriés dans les tableau récapitulatif 16 ci-après. Ce tableau met en évidence des rôles récurrents dans chacun des groupes et des rôles plus spécifiques.

On peut distinguer dans un premier temps quatre grandes familles de rôles joués par les prototypes revenant régulièrement:

- **Assemblages:** concerne l'évaluation d'un assemblage entre deux éléments;
- **Aspect et Forme:** concerne l'évaluation de l'esthétique du projet;
- **Fonctionnement:** concerne l'évaluation du fonctionnement global;
- **Fabrication/Matérialisation:** concerne l'évaluation de la réalisation.

On remarque ensuite que le rôle « recherche formelle » est associé à la maquette physique traditionnelle tandis que le rôle « vérifier la fabrication » est plutôt associé au prototypage rapide. Enfin, le rôle « tester un assemblage » correspond soit à un prototype réalisé manuellement, soit numériquement.

Groupe	Maquette physique traditionnelle	Prototypage rapide
M1	- Recherche formelle - Support pour la modélisation paramétrique - Vérifier la fabrication - Tester le matériau - Tester un assemblage - Communiquer - Tester la résistance	/
M2	- Recherche formelle/concept - Tester un assemblage - Support pour la modélisation paramétrique - Tester le mécanisme - Visualiser l'aspect	- Tester un assemblage - Préparer la fabrication finale - Visualiser l'aspect - Vérifier le fonctionnement
M3	- Support pour la modélisation paramétrique - Communiquer - Recherche formelle - Support de réflexion sur la mise en oeuvre - Visualiser l'aspect - Tester le matériau - Tester un assemblage	- Préparer la fabrication finale
M4	- Recherche formelle - Tester le mécanisme - Visualiser la forme - Tester le fonctionnement - Visualiser l'aspect	- Vérifier la fabrication - Tester un assemblage - Contrôler la matérialisation - Visualiser l'aspect - Choisir un matériau - Tester le fonctionnement
N1	/	- Vérifier la fabrication - Communiquer
N2	/	- Vérifier la fabrication - Communiquer
N3	- Communiquer	- Vérifier la fabrication - Tester un assemblage
N4	- Communiquer	- Tester un assemblage - Recherche formelle - Vérifier la fabrication - Vérifier le fonctionnement - Communiquer

Tableau 16: Récapitulatif des rôles joués par chaque prototype réalisés au sein des équipes de conception

Les résultats présentés dans cette partie ont permis, d'une part, de montrer que l'intégration du prototypage rapide au continuum conception-fabrication n'est pas systématique et qu'elle nécessite un investissement et une maîtrise plus importante de la modélisation paramétrique. Cette maîtrise représente donc un frein à cette intégration. Par ailleurs, l'utilisation du prototypage rapide, bien que peu intégré au modèle paramétrique, amène le concepteur à tester de nouvelles techniques inconnues pour lui et le fait entrer dans un processus itératif. D'autre part, ces résultats ont permis d'identifier les rôles fréquents joués par les prototypes réalisés.

5. Du point de vue du concepteur

Les résultats proposés dans les parties précédentes sont issus de l'observation en situation ou de l'analyse de données récoltées. Une manière de compléter l'observation ethnographique passe par l'analyse du questionnaire soumis aux participants de manière à récolter leur point de vue. Cette section présente les résultats obtenus par la soumission des questionnaires aux deux workshops. Elle se divise en cinq sous-parties:

- 5.1. L'identification de l'échantillon sondé
- 5.2. La phase esquisse
- 5.3. La modélisation
- 5.4. Retour sur expérience
- 5.5. Evolution du niveau d'innovation et de « constructibilité » ressenti

5.1. Identification de l'échantillon sondé

Mons

Les étudiants participants au workshop « Matérialités Numériques », ont déjà été présentés individuellement dans la première partie des résultats (4.1).

De manière à pouvoir comparer le processus de conception utilisé dans le cadre de ce workshop avec leur processus habituel, la question suivante leur a été posée:

Question C:

« Habituellement, quelles sont les grandes étapes de votre processus de conception architecturale? Quels sont les outils associés à chaque étape? »

Au total 13 étudiants sur 18 ont répondu à cette question. Les réponses sont rassemblées dans le tableau en annexe 33 et le tableau récapitulatif 17.

Il en ressort que les premières étapes du processus de conception sont toujours accompagnées d'un « croquis » ou d'une « esquisse » à la main et au crayon. En effet, le mot « esquisse » est accompagné des mots « premières réflexions », « recherche », « idées ».

Par ailleurs, l'esquisse précède toujours l'outil informatique selon les différents processus. L'outil informatique arrive dans les dernières étapes du processus et est accompagné des mots « vérification », « rendu », « finalisation », « aménagement » ou encore « remise au propre », « affiner ».

Si l'on s'intéresse maintenant à la maquette physique, on constate qu'elle est mentionnée par seulement trois étudiants (E4, E7, E12). Pour l'étudiant E4, la maquette physique apparaît dans 3 étapes sur 4, il distingue deux types de maquette qu'il nomme la « maquette brouillon », la « maquette à la main ». L'étudiant E7 mentionne quant à lui, l'utilisation de la maquette physique dans la première étape seulement tandis que l'étudiant E12 la mentionne seulement dans la dernière étape.

La maquette physique est donc peu considérée dans les processus de conception habituels des étudiants interrogés. En revanche, l'esquisse et l'outil informatique en tant qu'outil de dessin avancé sont à chaque fois mentionnés. On peut supposer que ces deux outils sont fréquemment utilisés.

Outils mentionnés	 Croquis / Esquisses (au crayon)	 Logiciels CAD (Archicad / Autocad)	 Modélisation 3D / Rendus 3D	 Maquette physique
Fréquence	12/13	10/13	6/13	3/13

Tableau 17: Récapitulatif des outils utilisés par 13 étudiants du workshop de Mons

Nancy

Les profils observés à Nancy présentent plus de variations. L'analyse des profils effectués au paragraphe 4.1. montre que la formation d'origine, l'expérience en conception architecturale, le niveau actuel d'étude, la maîtrise de l'outil paramétrique et de fabrication digitale sont en effet des critères assez variables selon les étudiants interrogés.

À la question C:

« Habituellement, quelles sont les grandes étapes de votre processus de conception architecturale? Quels sont les outils associés à chaque étape? »

Au total, 10 étudiants sur 13 ont répondu à cette question. Les réponses sont rassemblées dans le tableau de l'annexe 34 et le tableau 18 ci-dessous les résume. Le même constat qu'à Mons peut être fait. Le crayon est l'outil le plus mentionné, suivi des logiciels de CAO, de la modélisation 3D. La maquette physique n'est mentionnée qu'une seule fois sur les 10 personnes ayant répondu.

Outils mentionnés	 Croquis / Esquisses (au crayon)	 Logiciels CAD (Archicad / Autocad)	 Modélisation 3D / Rendus 3D	 Maquette physique
Fréquence	7/10	6/10	3/10	1/10

Tableau 18: Récapitulatif des outils utilisés par 10 étudiants du workshop CFD

La première partie du questionnaire avait déjà permis de montrer (partie 4.1), que l'outil paramétrique et la fabrication digitale étaient des outils utilisés occasionnellement dans le processus de conception des étudiants interrogés. D'autre part, elle met en évidence une faible considération de la maquette physique dans leur processus de conception traditionnel. Les outils numériques proposés dans cette expérience ont-ils eu une influence sur le concepteur dès les premières phases du processus? La section suivante propose une analyse des réponses obtenues suite à la phase esquisse.

5.3. Les concepteurs en phase esquisse

Les deux premières questions posées dans cette étape du questionnaire ont pour but d'évaluer l'influence de la présence des outils numériques sur leur conception avant même de les avoir utilisés. Les étudiants ont tout de même la connaissance des potentiels apportés par ces outils. L'élaboration de ce questionnaire reposait sur l'hypothèse d'une certaine influence de cette pré-sensibilisation aux outils.

Le but est d'interroger le concepteur sur la forme du projet qu'il envisage avec l'utilisation des outils numériques, comparé à ce qu'il a l'habitude de faire avec les outils utilisés habituellement dans le processus de conception. Les deux questions suivantes sont alors soumises (une seule réponse était possible):

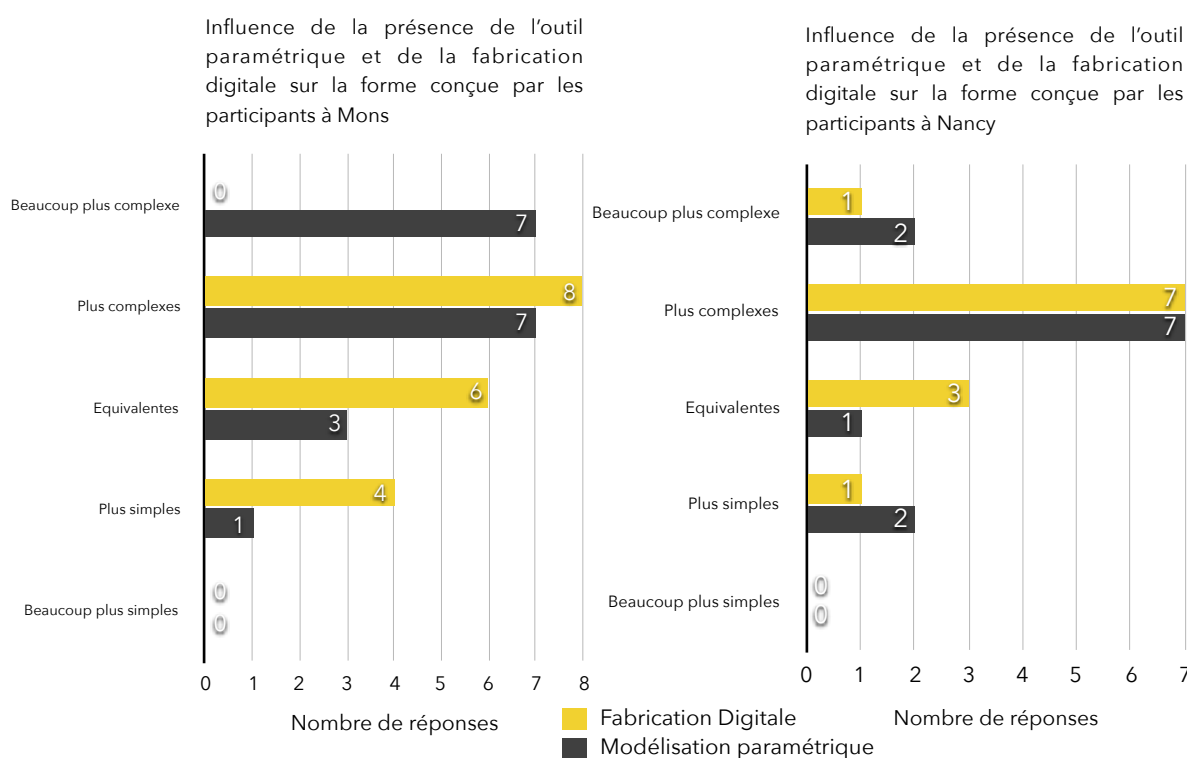
« 1/Par rapport à un processus de conception « traditionnel », la présence des outils de **fabrication digitale** dans le processus vous oriente vers des formes : »

« 2/Par rapport à un processus de conception traditionnelle, la présence des outils de **modélisation paramétrique** dans le processus de conception vous oriente vers des formes: »

☐	☐	☐	☐	☐
beaucoup plus simples	plus simples	sans impact	plus complexes	beaucoup plus complexes

Les résultats présentés dans la figure 97 ci-dessous montrent que la présence de la modélisation paramétrique oriente majoritairement les concepteurs vers des formes plus complexes voire beaucoup plus complexes. Ce constat est aussi vrai pour la fabrication digitale mais de façon moins flagrante.

Figure 97: Réponses obtenues à Mons et à Nancy aux questions 1 et 2 du questionnaire



Suite à l'étape esquisse, les étudiants avaient déjà une idée du projet qu'ils souhaitaient réaliser. De manière à comprendre leur vision vis-à-vis de la modélisation paramétrique, la question N°3 leur a été posée:

« 3/**La modélisation paramétrique** vous paraît-elle être un outil adéquat pour modéliser votre projet ? »

La figure 98 présentée ci-dessous témoigne d'une approche assez différente entre les participants à Mons et à Nancy.

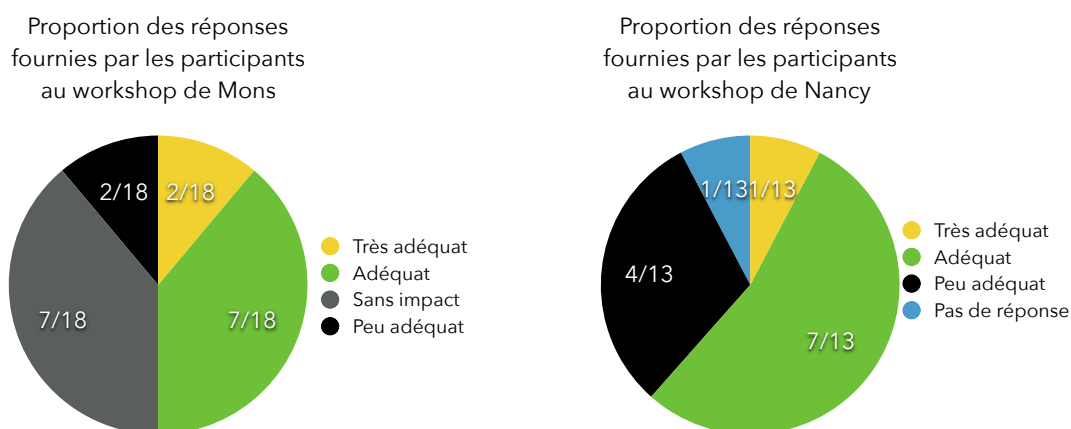


Figure 98: Réponses obtenues à la question 3/ du questionnaire à Mons et à Nancy

A Mons, on constate que la moitié des participants estiment la modélisation paramétrique adéquate ou très adéquate pour modéliser leur projet. Une part assez importante des étudiants pensent cependant que la modélisation paramétrique n'apporte pas plus que d'autres outils. Ces réactions peuvent être reliées au niveau de maîtrise du logiciel. Les étudiants estiment peut-être leur niveau trop faible pour pouvoir exploiter les potentiels du logiciel.

A Nancy, une grande majorité estime la modélisation paramétrique adéquate pour concevoir leur projet. En revanche, 1/3 des étudiants ayant répondu la trouve peu adéquate.

Afin de comprendre les raisons de ces réponses, analysons les réponses à la question:

« pouvez-vous donner la ou les raison(s)? »

9 réponses sur les 18 attendues ont été récoltées à Mons, 8 sur 13 à Nancy. Elles sont détaillées dans le tableau présenté en annexe 35.

Les participants qui estiment l'outil paramétrique adéquat voire très adéquat pour la réalisation de leur projet, le justifient majoritairement par la **facilité de changer une forme à tout moment** du projet. D'autre part, la possibilité de **créer des variantes** et d'explorer différentes formes est souvent évoquée. Un étudiant aborde d'autre part, l'adéquation à une trame qui se répète et un autre évoque l'aspect dynamique de l'exercice demandé à Mons.

Les étudiants ayant répondu « sans impact » ou « non adéquat », expliquent que **leur maîtrise du logiciel est trop faible** pour pouvoir exploiter les potentiels de l'outil. D'autre

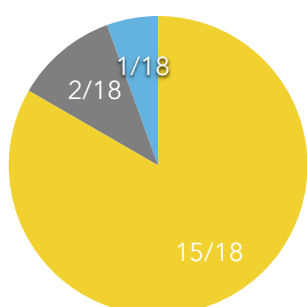
part, un étudiant évoque le temps de modélisation trop conséquent. Ce constat avait déjà été mentionné dans les résultats de l'observation, notamment avec l'exemple du groupe M4. Cette analyse montre que les concepteurs ont dans l'ensemble conscience des potentialités de modélisation paramétrique, mais se sentent limités par la maîtrise du logiciel. Ces réactions témoignent aussi d'une certaine réticence à l'égard de cet outil et au niveau d'investissement qu'il demande. Cela a eu un impact sur le niveau d'intégration du continuum numérique pour la matérialisation comme il a été observé sur le terrain. La conception architecturale numérique nécessite en effet un changement dans les habitudes de concevoir, ce qui n'est pas facile à mettre en place.

On peut à présent s'intéresser au ressenti vis-à-vis de la fabrication digitale en analysant les réponses obtenues à la question N°4:

«4/ A ce stade de la conception, quelle est la raison principale qui justifie l'utilisation des outils de fabrication digitale à la fin du processus pour votre projet? »

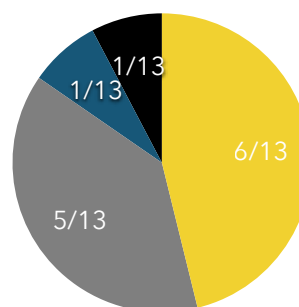
La figure 99 ci-dessous met en évidence les raisons principales qui, selon les concepteurs, justifient l'utilisation de la fabrication digitale. La première raison est donc « les formes sont complexes » et la seconde « les éléments sont nombreux et répétitifs » pour les deux workshops. Ces réponses témoignent que, dans un contexte numérique proposé par cet exercice, la conception peut être influencé dès la phase esquisse sans avoir eu recours aux outils numériques.

Proportion des réponses fournies à la question 4 du questionnaire par les participants au workshop de Mons



- Les formes sont complexes
- Les éléments sont nombreux et répétitifs
- Le coté dynamique du projet

Proportion des réponses fournies à la question 4 du questionnaire par les participants au workshop de Nancy



- Les formes sont complexes
- Les éléments sont nombreux et répétitifs
- Le nombre de prototype à réaliser est important
- pas de réponse

Figure 99: Réponses obtenues à la question 4/ du questionnaire à Mons et à Nancy

Ce premier questionnaire montre que la mise à disposition des outils numériques lors de ces workshops a déjà eu une influence sur la phase esquisse. Une part des participants considère la modélisation paramétrique comme un outil présentant une souplesse de changement qui permet facilement de créer des variantes. D'autres estiment leur niveau de maîtrise du logiciel trop faible pour pouvoir l'exploiter. Enfin, pour une part importante des participants, la modélisation paramétrique en particulier les oriente vers des formes plus complexes. C'est d'ailleurs la raison principale qui justifie l'utilité de la fabrication digitale. Intéressons nous maintenant, à la mise en place de la modélisation et aux premières matérialisations.

5.4. Les concepteurs en phase de modélisation et matérialisation

Les résultats des questionnaires N°2 et N°3 sont rassemblés dans cette partie. Ils questionnent l'état d'esprit du concepteur pendant la phase de modélisation paramétrique, la matérialisation voire la construction.

Un besoin de fabrication variable

Les réponses obtenues à la question N°12:

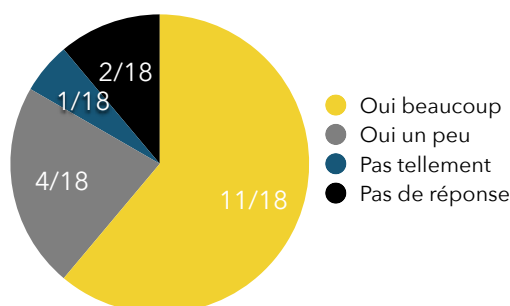
« 12/Ressentez-vous le besoin de fabriquer physiquement votre modèle pour valider vos choix? »,

mettent en évidence des besoins différents entre les participants à Mons et à Nancy.

La figure 100 ci-dessous montre en effet que les participants au workshop de Mons ressentent très majoritairement le besoin de fabriquer leur modèle numérique. Ce constat peu paraître étonnant si on le compare à l'utilisation de la maquette physique dans les processus habituels décrits précédemment par les étudiants. En revanche, il confirme le constat réalisé lors de l'observation sur la forte utilisation de la maquette physique durant la semaine de workshop.

A Nancy, presque 1/3 des participants n'a pas ressenti le besoin de fabriquer le modèle numérique. Ceci reflète ainsi l'analyse effectuée sur l'observation des artefacts réalisés. En effet, les participants ont très peu utilisé la maquette physique au cours du processus.

Proportion des réponses fournies
à la question 12 du
questionnaire par les participants
au workshop de Mons



Proportion des réponses fournies
à la question 12 du
questionnaire par les participants
au workshop de Nancy

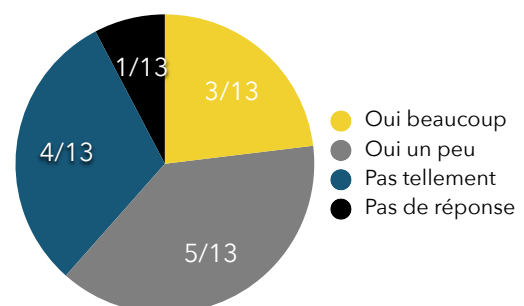


Figure 100: Réponses obtenues à la question 12 du questionnaire à Mons et à Nancy

La question N°13

« Selon vous, la maquette physique vous permettra principalement:
autoriserait plusieurs réponses.

Les deux rôles principaux qui ressortent des figures 101 et 102 sont « **avoir la preuve que le modèle est réalisable** » et « **tester des assemblages** ». La notion « d'esthétique » arrive en troisième position. A Nancy, une part importante des étudiants estiment que la maquette permettra de tester des assemblages. Pourtant, peu de prototypes physiques ont été réalisés à part pour le groupe N4. Ce constat témoigne des limites à l'intégration du prototypage rapide dans le processus de conception.

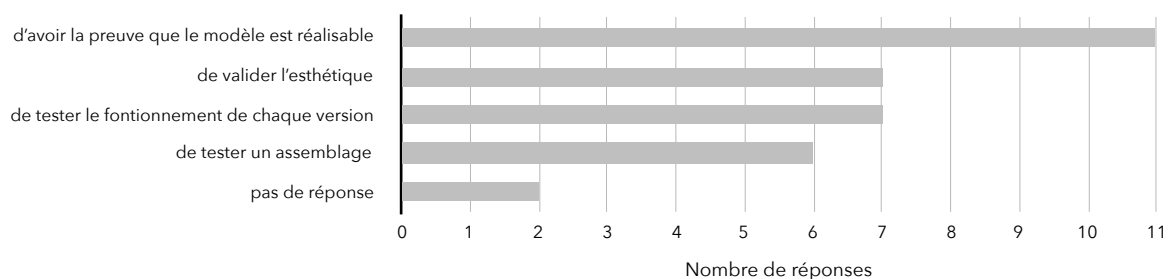


Figure 101 Proportion des réponses fournies à la question 1 du questionnaire par les participants au workshop de Mons

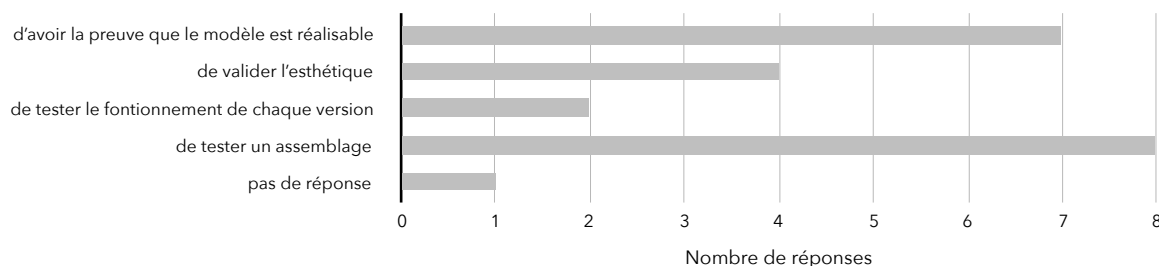


Figure 102: Proportion des réponses fournies à la question 13 du questionnaire par les participants au workshop de Nancy

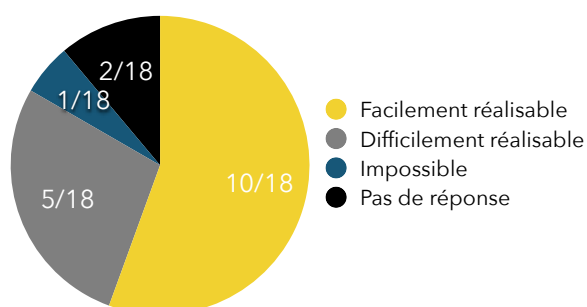
Il a été remarqué lors de l'observation que les concepteurs nancéiens ont tous eu recours aux outils de fabrication digitale. Les réponses à la question 14 (Figure 103) montrent par ailleurs que pour la grande majorité des participants, le modèle 3D aurait été très difficile voire impossible à fabriquer sans ces outils.

A Mons au contraire, l'observation a mis en évidence une utilisation soutenue de la maquette physique traditionnelle pour certains groupes. Ce constat peut être relié aux résultats présentés à la figure 103 ci-dessous montrant que la majorité des participants à Mons pensent que leur projet est facilement réalisable par les outils traditionnels.

Ces différences reflètent des approches pédagogiques différentes à Mons et à Nancy. Le prototypage prononcé réalisé à Mons manuellement sans les outils a eu impact sur ces questions. Le groupe M4 a considéré que sans les machines, leur projet était en effet difficile à matérialiser, une dépendance à la machine a donc été créée. Cette dépendance est plus présente à Nancy qui a fortement modélisé. On peut alors penser qu'à un certain niveau de détail dans la modélisation, la fabrication digitale devient très utile.

« 14/Pensez-vous que votre modèle 3D est facilement réalisable en maquette physique sans les outils de fabrication digitale? »

Proportion des réponses fournies à la question 14 du questionnaire par les participants au workshop de Mons



Proportion des réponses fournies à la question 14 du questionnaire par les participants au workshop de Nancy

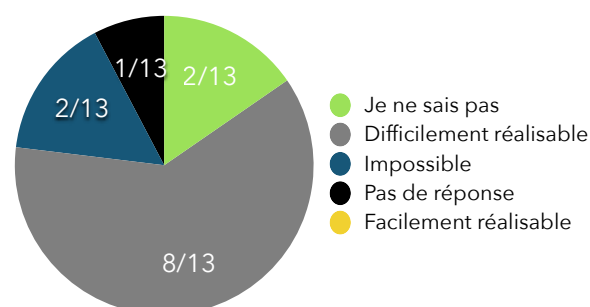


Figure 103: Réponses obtenues à la question 14 du questionnaire à Mons et à Nancy

Les résultats obtenus suite à l'analyse de ces deux étapes du questionnaire confirment et complètent l'observation réalisée. Les différences constatées dans l'observation se reflètent aussi dans les réponses obtenues dans ces questionnaires. En effet, le besoin de matérialiser le modèle paramétrique est beaucoup moins présent à Nancy qu'à Mons ce qui explique le faible nombre de prototypes intermédiaires réalisés à Nancy. On discutera dans la dernière partie des raisons de ces différences. Après avoir capté le ressenti du concepteur en phase de modélisation, l'analyse du questionnaire suivant donne un retour sur l'expérience vécue par les concepteurs.

5.5. Retour sur l'expérience du concepteur

Une fois les workshops terminés le dernier questionnaire a été soumis aux étudiants. L'objectif de ce dernier était de recueillir le ressenti du concepteur après une prise de recul quant à sa conception. Il aborde l'influence des outils sur la conception et des difficultés rencontrées avec les outils numériques.

Les réponses obtenues à la question N°17:

« Parmi les outils de conception ci-dessous, lequel a le plus favorisé votre créativité? »

sont présentées dans le tableau 19 ci-dessous. Les étudiants interrogés devaient classer une liste d'outils par ordre d'importance. La réalisation d'une moyenne pondérée (10, 20, 30, 40) amène le croquis et les références architecturales comme les deux outils les plus influents selon les concepteurs à Mons ou à Nancy.

La modélisation paramétrique, elle, arrive en 3ème position suivie de la fabrication digitale.

	MONS	Score	NANCY	Score
1	1/Le croquis d'esquisse	380	1/Les références architecturales	300
2	2/Les références architecturales	370	2/ La modélisation 3D sur Grasshopper]	270
3	3/ La modélisation 3D sur Grasshopper]	310	3/Le croquis d'esquisse	250
4	4/ Les outils de fabrication digitale	117	4/ Les outils de fabrication digitale	174

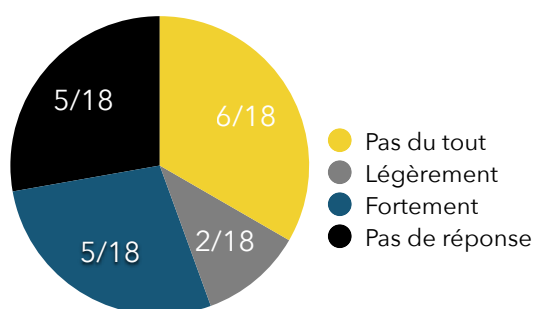
Tab leau 19: Classement des outils qui favorisent le plus la créativité des participants à Mons et à Nancy

Ce tableau traduit donc une plus grande influence des références architecturales par rapport aux outils numériques sur la créativité des concepteurs, à Mons comme à Nancy. Par ailleurs, la modélisation paramétrique a eu plus d'impact à Nancy qu'à Mons. En revanche ce tableau montre que les outils de fabrication digitale ont peu d'impacts sur la créativité dans les deux cas. Ce dernier constat entre en contradiction avec les réponses à la question 14 où les étudiants nancéiens estimaient leur projet difficilement réalisable sans ces outils. La présence de la fabrication digitale a pu avoir une influence sur la créativité de manière inconsciente chez les concepteurs. On reviendra sur sujet en dernière partie.

Les réponses à la question N°20 (figure 104) confirment ce dernier constat et montrent que les contraintes de la fabrication digitale ont légèrement influencé les projets, ou pas du tout pour le groupe M1 qui ne l'a pas utilisé. A Nancy les contraintes de la fabrication digitale n'ont pas eu beaucoup d'influence.

« 20/ Les contraintes des outils de fabrication digitale ont-elles influencé la conception de votre projet? »

Proportion de réponse obtenues
à la question N°20 au workshop
de Mons



Proportion de réponse obtenues
à la question N°20 au workshop
de Nancy

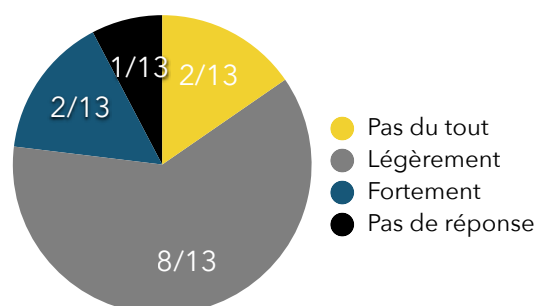


Figure 104: Réponses obtenues à la question 20 du questionnaire à Mons et à Nancy

Enfin, les réponses à la question N°21

« 21/ Pouvez-vous citer trois principales difficultés rencontrées lors de la fabrication de votre maquette? »

permettent d'identifier des difficultés récurrentes pour les concepteurs. Le tableau présenté en annexe 36 rassemble les réponses à cette question, et le tableau 20 ci-dessous les résume. Celles-ci touchent surtout l'assemblage des pièces pour réaliser la maquette finale, mais aussi le problème de l'échelle trop réduite. Certains évoquent des problèmes liés au logiciel Grasshopper, et d'autres au temps d'impression 3D trop long.

Problèmes d'assemblages	Assemblage des pièces La jonction entre les différentes parois Rassembler les pièces non numérotées Assemblage des éléments Liaison entre les panneaux Les charnières Jonction des formes La liaison entre les tissus Difficultés d'assemblage à cause des courbes et de la distance entre portiques
Problèmes d'échelles	L'échelle petite pour les raccords entre les toiles Patrons (échelle) Problème d'échelle (x2)
Problèmes informatiques	Problèmes avec Grasshopper Problèmes des exportation principalement Utilisation de Grasshopper Différence maquette 3D / Réalité Appliquer notre idée sur Grasshopper sans la dénaturer Passage d'un logiciel à un autre
Problèmes liés à la fabrication digitale	Le temps assez long de l'impression 3D Le temps (impression trop longue) (pièce mal imprimée) Problèmes de découpe laser (n'as pas coupé correctement)

Tableau 20: Tableau récapitulatif des contraintes exprimées par les concepteurs à Nancy et à Mons

Les résultats de ce dernier questionnaire permettent de se rendre compte de l'importance du croquis et des analogies réalisées pour la créativité dans un processus de conception architecturale, même numérique. En revanche, on peut difficilement conclure que les contraintes de fabrication digitale ont influencé la manière de concevoir. D'autres difficultés ont été mentionnées quant à la matérialisation des artefacts mais elles n'étaient pas nécessairement liées aux machines. Une dernière analyse est présentée dans la section suivante sur l'évolution du ressenti des concepteurs par rapport au niveau d'innovation et de constructibilité de leurs projets.

5.6. Innovation et constructibilité

A chacune des quatre étapes du questionnaire, les deux questions suivantes ont été posées aux concepteurs:

« A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau de « constructibilité » de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels? »*

** Constructibilité: facilité de construction d'un projet d'architecture en tenant compte des aspects techniques et économiques. — — —*

« A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau d'innovation global de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels? »

Les réponses à ces questions sont présentées par des graphiques montrant l'évolution du niveau de « constructibilité » et d'innovation estimés par les étudiants au cours du processus. Ces graphiques ont été réalisés à partir des réponses des étudiants ayant répondu à la question pour chacune des étapes.

Niveau d'innovation estimé à Mons

Globalement, les étudiants ayant répondu considèrent que les projets réalisés possèdent un niveau d'innovation équivalent ou supérieur aux projets habituels. La figure 105 montre que pour les groupes M1, M2, M3 le niveau oscille en effet entre « équivalent » ou « supérieur » tout au long du processus. Les membres de l'équipe M4 ont eu des avis très partagés en début de processus, pour finalement arriver en dernière étape à un ressenti sur l'innovation supérieur voire très supérieur.

On constate donc que d'une manière globale, ce contexte de conception a orienté les concepteurs vers des projets plus innovants que d'habitude. Il est maintenant intéressant de comparer ce constat avec le ressenti des concepteurs nancéiens.

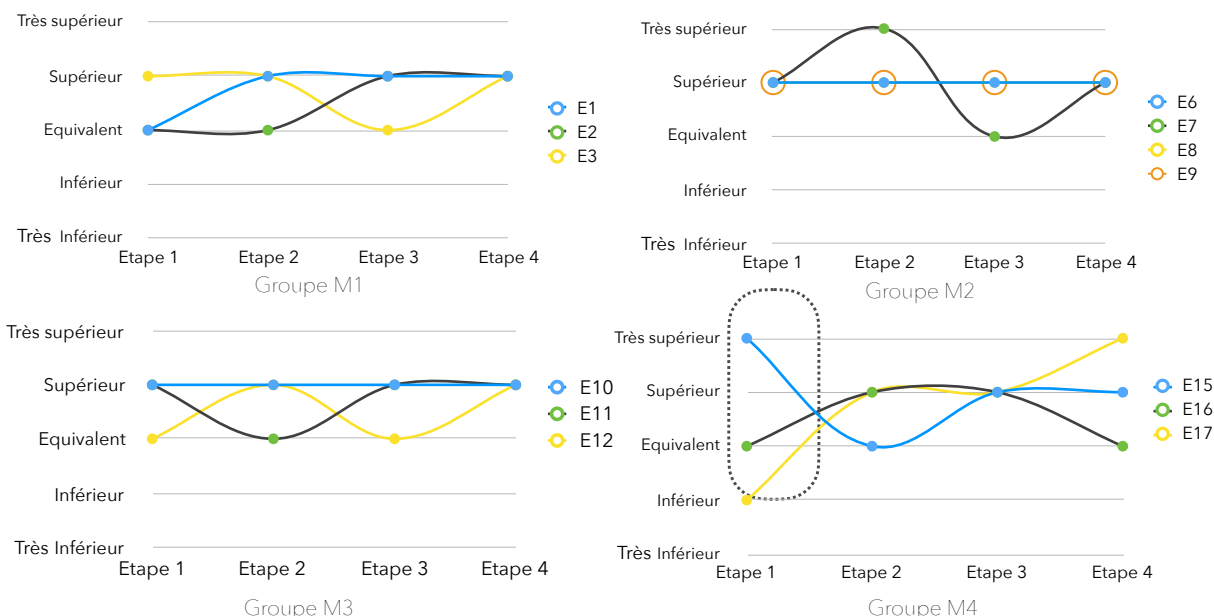


Figure 105: Graphiques d'évolution du niveau d'innovation selon les participants au workshop de Mons

Niveaux d'innovation estimés à Nancy

A Nancy, le niveau d'innovation est estimé supérieur aux projets habituels pour les groupes N2 et N4 à chaque étape, comme le présentent les graphiques de la figure 106. Le groupe N1 quant à lui, oscille entre supérieur et équivalent. Pour le groupe N3, il a tendance à baisser au fur et à mesure du projet.

Le niveau de consensus entre les étudiants de chaque groupe semble par ailleurs, plus élevé à Nancy comparé à celui de Mons. Cela peut refléter une vision commune du projet et bonne entente au sein des groupes, mais cela peut dû aussi une concertation pendant la réponse au questionnaire.

Il sera intéressant mettre en relief le niveau d'innovation estimé avec le niveau de constructibilité afin de dégager un éventuel lien. Par ailleurs, le constat effectué pour le workshop de Mons se confirme majoritairement au workshop de Nancy. On pourra discuter de cette estimation très subjective dans la dernière partie de ce travail.

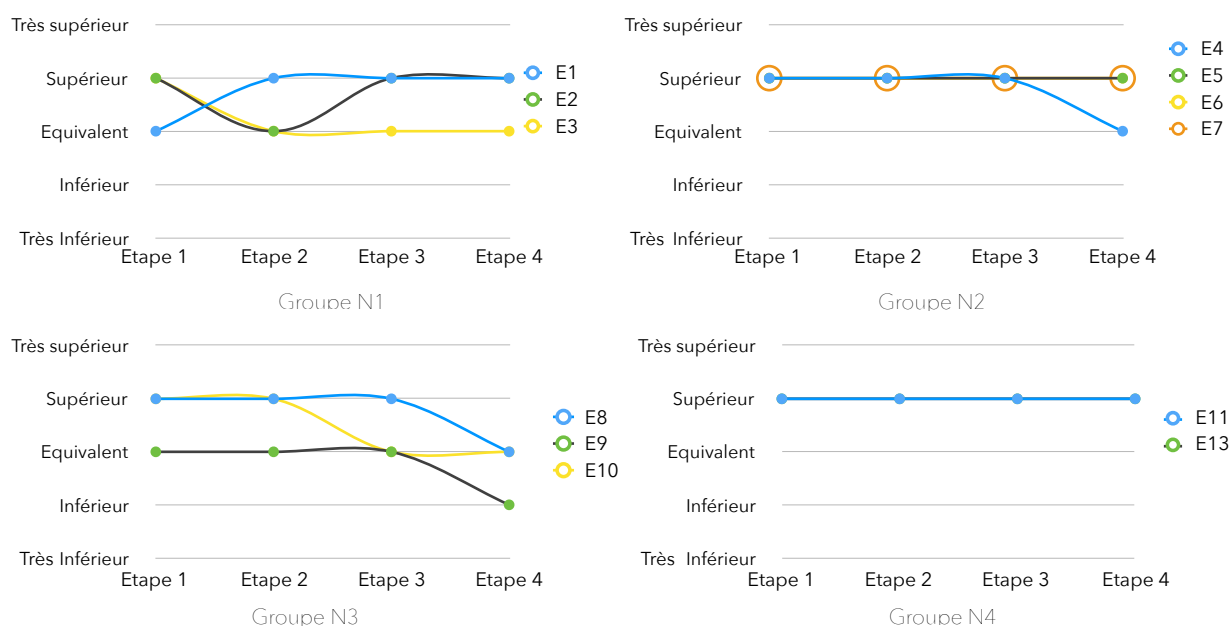


Figure 106: Graphique d'évolution du niveau d'innovation selon les participants au workshop de Nancy

Après avoir présenté l'indice d'innovation estimé par les concepteurs interrogés, on peut maintenant s'intéresser à l'indice de constructibilité et détecter peut-être certains liens entre ces deux estimations.

Niveaux de constructibilité estimés à Mons

Les niveaux de « constructibilité » constatés à la figure 107 montrent une évolution globalement croissante pour les quatre groupes entre le début et la fin du workshop. On arrive en effet à des niveaux « supérieurs » voire « très supérieurs » en fin de processus. On remarque par ailleurs que le groupe M4 a connu un « pic de constructibilité » à l'étape 2. Cette forte croissance peut s'expliquer par la réalisation des premiers tests de la technologie par soustraction. On remarque cependant que le niveau est redescendu aux étapes suivantes. Les étudiants, dans le cadre de l'exercice étaient en effet amenés à réfléchir à l'échelle 1:1. Dans leur situation, la constructibilité du projet est très liée aux contraintes de la machine et aux matériaux. Des interrogations quant à la réalisation de projet à grande échelle persistaient ce qui a pu influencer le niveau de constructibilité.

Dans l'ensemble, ces courbes se caractérisent donc par un niveau de constructibilité estimé au départ assez faible. Une explication à ce constat peut être liée aux réponses obtenues concernant la complexité formelle générée par la présence de la modélisation paramétrique dans le processus.

Enfin, nous avons pu identifier le rôle « preuve de matérialisation » dans la section 4.3 des résultats. En effet, les prototypes réalisés par les participants servaient souvent à tester un assemblage et à vérifier la faisabilité. La matérialisation pourrait avoir un impact sur la vision du processus de construction du projet. Dans ce sens, la matérialisation peut avoir eu une influence sur le niveau de « constructibilité » estimé. Les réponses obtenues à Nancy permettront peut-être de confirmer cette explication.

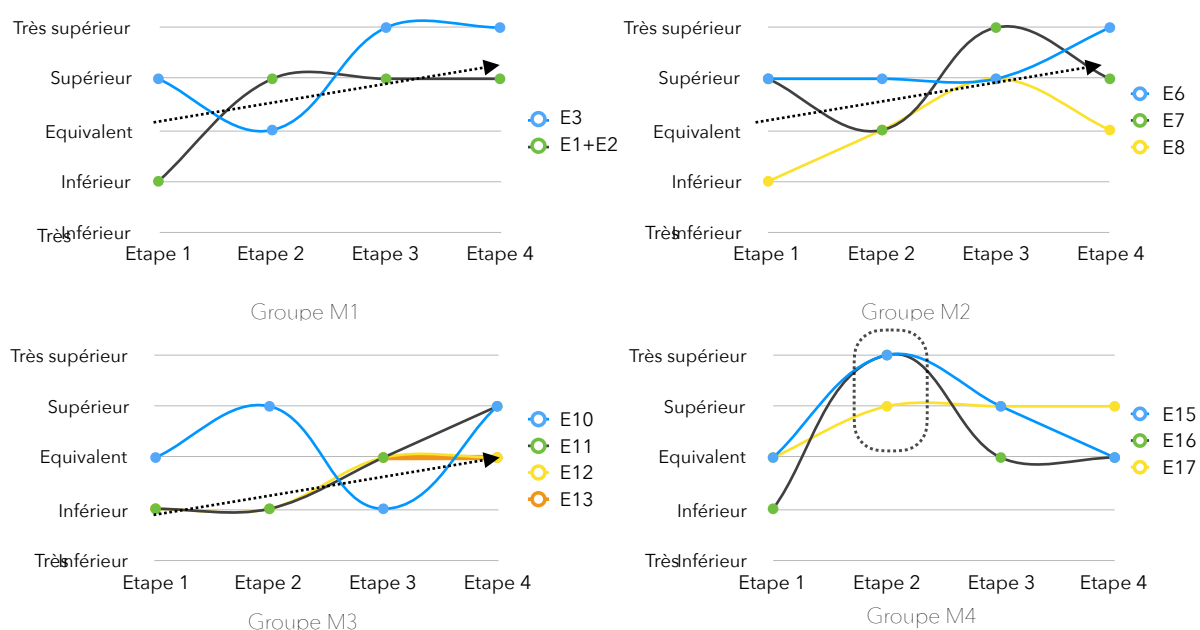


Figure 107: Graphiques d'évolution du niveau de constructibilité selon les participants au workshop de Mons

Niveaux de constructibilité estimés à Nancy

Le niveau de constructibilité estimé par les nancéiens a eu tendance à augmenter au fur et à mesure que le processus de conception et matérialisation a progressé. Ce constat est vrai pour les groupes N1, N2, N4 (Figure 108). L'explication du lien entre la matérialisation et le niveau de constructibilité proposée pour les résultats obtenus à Mons sont majoritairement confirmés à Nancy. En effet, au fur et à mesure que le projet avance, de plus en plus de tests physiques sont réalisés. Soit cette matérialisation a un effet positif sur le niveau de constructibilité estimé, soit il a un effet négatif (cas du groupe N3).

Le groupe N3 a en effet, estimé son niveau de constructibilité beaucoup plus faible dans la dernière étape. C'est pendant cette dernière étape que la fabrication de la maquette a été réalisée. Cette phase de matérialisation a été une étape assez complexe pour ce groupe qui a connu des difficultés pour assembler chaque tuile aux portiques. Les trous préparés à la découpe laser ne coïncidaient pas exactement pour pouvoir assembler les éléments facilement. Les étudiants ont dû coller les tuiles une par une ce qui a représenté un travail fastidieux et périlleux. Les difficultés rencontrées au cours de cette étape peuvent donc expliquer cette chute dans la perception.

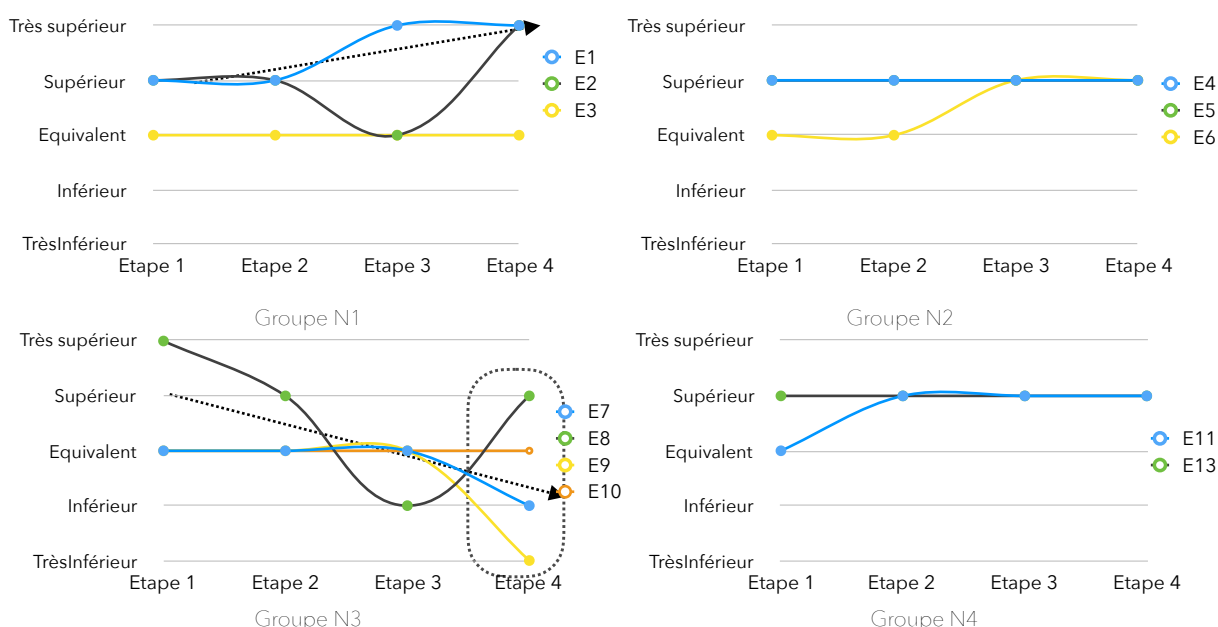


Figure 108: Graphiques d'évolution du niveau de constructibilité selon les participants au workshop CFD

Les résultats présentés dans cette section confirment certaines observations effectuées sur le terrain. Par exemple, le besoin de fabriquer le modèle 3D, variable selon les workshops, se reflète aussi dans le nombre de prototypes réalisés. Par ailleurs, les concepteurs estiment majoritairement que la modélisation paramétrique les a poussé à des formes plus complexes.

Le nombre important de prototypes réalisés montre aussi l'impact de cet environnement de conception sur les habitudes des concepteurs, qui utilisent très peu la maquette physique dans leur processus habituels. L'utilisation de la matière en conception numérique joue essentiellement un rôle de « preuve » que le modèle est réalisable, selon les concepteurs. Cette preuve de la réalisation a parfois fait chuter le niveau de « constructibilité » dans certains groupes étant donné certaines difficultés rencontrées lors du montage de la maquette finale par exemple.

ÉTAT DE L'ART

MÉTHODOLOGIE

TRAITEMENT DES DONNÉES ET ANALYSE

RÉSULTATS

DISCUSSION

DISCUSSION

Après avoir présenté les résultats obtenus suite à l'observation en situation et aux données du questionnaire, nous allons à présent considérer l'interaction entre matière et numérique en réponse aux questions de recherche.

Ces questions, élaborées à partir de l'étude de l'état de l'art, abordent premièrement l'intégration du continuum numérique dans la matérialisation du projet architectural. La seconde question s'intéresse aux obstacles à l'intégration du prototypage rapide dans le processus. La troisième et dernière se concentre sur les rôles de la maquette physique en conception numérique. En répondant à ces questions, la méthodologie déployée sera aussi commentée et discutée. Une section dédiée aux limites rencontrées tout au long de cette démarche sera présentée en fin de ce travail.

1. Un continuum numérique entre conception et matérialisation peut-il avoir lieu à l'échelle de la maquette?

Les résultats présentés dans la partie précédente ont mis en lumière des différences notables dans les processus de conception observés en ce qui concerne la continuité numérique conception-fabrication. Il a été observé que certains groupes atteignent une continuité numérique pour l'élaboration de leur maquette finale, alors que d'autres équipes ont travaillé de manière parallèle ou détournée avec la maquette physique conçue manuellement. Cette première partie de la discussion cherche à expliquer ces différences.

1.1. L'influence du cadre pédagogique sur la recherche

Une première explication de cette différence rejoint le constat effectué dans la partie méthodologie quant à l'influence des encadrants sur le processus de conception. Ce paramètre, lié au cadre pédagogique de la recherche, a certainement eu une influence sur les résultats obtenus dans ce travail. Il est alors intéressant et nécessaire de discuter de l'influence de ce paramètre sur la recherche effectuée.

Les résultats obtenus via les deux workshops mettent en évidence des approches différentes dans les consignes de l'exercice. Cependant, ces différences mettent en évidence des informations complémentaires.

L'hétérogénéité des processus observés à Mons peut s'expliquer par une plus grande liberté laissée aux équipes montoises dans leur manière d'aborder leur projet. En effet à Mons tous les outils étaient mis à disposition des étudiants, mais la manière de procéder était laissée libre. Cette façon d'approcher l'exercice permet dans un sens de rapprocher les étudiants d'un cadre plus professionnel, dans lequel le concepteur est assez libre dans la manière de concevoir et dans le choix de ses outils.

Les résultats de l'observation à Mons ont sans doute plus de probabilité de refléter les pratiques actuelles en agence d'architecture. D'autre part, cette liberté permet de mettre en évidence des pratiques liées à l'utilisation d'un outil peu habituel et récent à savoir la résistance au changement ou bien l'adaptation des outils traditionnels à un cadre contemporain.

Bien que n'ayant pu observer directement la semaine de conception à Nancy, les données récoltées et les résultats obtenus permettent de mettre en évidence une autre manière d'aborder l'exercice. En effet, la démarche proposée par les encadrants nancéiens se basait plus sur un séquençage du processus conception - matérialisation. La première partie du workshop a commencé par l'esquisse, la seconde s'est focalisée sur la modélisation paramétrique puis une phase finale de matérialisation a débuté. Comme nous l'avons remarqué dans les résultats, la conséquence de ce processus très structuré est la faible réalisation de prototypes intermédiaires, mais par ailleurs, la réalisation d'un continuum numérique au sein de chaque groupe. Les étudiants étaient donc plus incités à mener la modélisation à un niveau suffisant pour intégrer le numérique dans le processus de matérialisation.

Une autre des conséquences de l'approche pédagogique de Nancy est la faible vérification physique, dans le groupe N3 notamment. Cela a abouti à une matérialisation trop complexe en phase finale du processus où les étudiants ont dû recourir aux techniques de matérialisation traditionnelles pour résoudre les nombreux problèmes. L'intérêt de la réalisation de prototypes sur la constructibilité de la maquette est ainsi mis en évidence.

La présence de deux terrains d'étude dans ce travail a permis d'obtenir une variété de résultats intéressants. Cette variété est en partie due aux énoncés différents des exercices de conception et au cadre pédagogique. Ces résultats ont permis de mettre en lumière une continuité du numérique amorcée, mais encore limitée.

1.2. Trois niveaux d'intégration du numérique dans la matérialisation

Les résultats présentés dans la partie précédente ont montré des interactions et des utilisations variées entre le modèle numérique et la matérialisation. Pour résumer on peut considérer trois niveaux d'intégration du numérique dans la matérialisation.

Niveau 1

Ce niveau d'intégration correspond au plus haut niveau d'intégration du numérique dans la matérialisation. Il s'agit des processus dans lesquels l'exploitation du numérique a servi à matérialiser tant la maquette finale que les prototypes intermédiaires. Ce niveau d'intégration a été observé pour les groupes N4 et M4, bien qu'une hiérarchie puisse encore être effectuée entre les deux.

Ce niveau d'intégration est représenté par le schéma de la figure 109 à la page suivante.

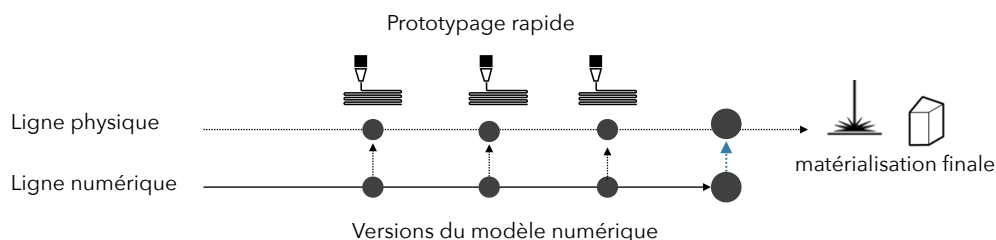


Figure 109: schéma d'intégration de niveau 1 du numérique en matérialisation

Niveau 2

Le second niveau d'intégration correspond à une exploitation des données numériques pour une matérialisation finale mais pas pour la matérialisation de prototypes intermédiaires. Ce niveau a été observé pour les groupes M3, M2, N1, N2, N3. La figure 110 schématise cette intégration.

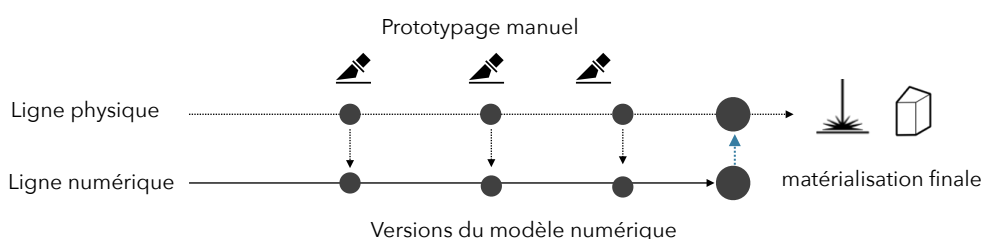


Figure 110: schéma d'intégration de niveau 2 du numérique en matérialisation

Niveau 3

Le dernier et plus bas niveau d'intégration correspond à une exploitation du modèle 3D numérique en parallèle d'une matérialisation traditionnelle. Ce niveau a été adopté par le groupe M1 et est schématisé par la figure 111.

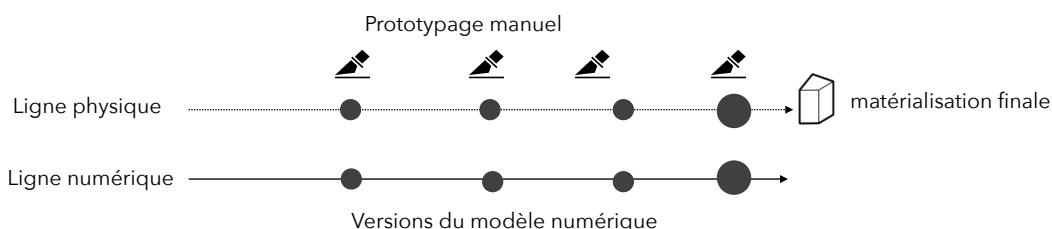


Figure 111: schéma d'intégration de niveau 3 du numérique en matérialisation

Ces niveaux d'intégrations ont un impact sur différents paramètres du projet architectural. Dans les équipes de conception observées, plus le niveau d'intégration est grand, plus le concepteur est incité à considérer la faisabilité du projet à grande échelle, très tôt dans le processus. Il a pour effet de déclencher un processus de conception itératif bénéfique à l'exploration des solutions possibles.

Trois niveaux d'intégration du numérique dans la matérialisation ont donc été identifiés suite à l'observation des deux terrains d'étude. Le niveau 1 correspond à l'intégration maximale observée, le niveau 3 à l'intégration minimale. Ces niveaux différents d'intégrations sont la conséquence d'obstacles et de limites au continuum numérique conception-fabrication. La section suivante cherchera à identifier les freins à l'intégration du prototypage rapide dans le processus.

2. Quels sont les freins à l'intégration du prototypage rapide dans le continuum numérique conception-fabrication?

En considérant que la maquette finale réalisée par les concepteurs n'est pas une représentation intermédiaire en tant que telle dans le cadre temporel limité du workshop, le prototypage rapide en tant que représentation intermédiaire a pu être réellement observé dans seulement deux groupes (M4, N4).

Cette section s'intéresse plus précisément aux obstacles ou raisons qui ont orienté les concepteurs à ne pas se servir des outils numériques pour réaliser les prototypes.

2.1. La maîtrise de la modélisation paramétrique, la clé du continuum numérique?

L'hétérogénéité des processus observés met en lumière la maîtrise nécessaire du logiciel de la modélisation paramétrique et l'investissement que celui-ci représente pour arriver à exploiter les données numériques dans la matérialisation.

Un exemple représentatif de ce phénomène est le processus du groupe M4. Cette équipe a été considérée comme faisant partie du niveau d'intégration N°1 et pourtant une limite a tout de même été constatée. En effet, les concepteurs n'ont pas exploité les données du modèle paramétrique pour réaliser la découpe laser mais sont passés par une conception 2D sur Autocad.

De même, le groupe M2, qui s'est tourné vers le logiciel Sketchup pour préparer l'impression 3D, témoigne aussi d'une préférence pour les logiciels plus communs.

Par ailleurs, on constate un investissement conséquent, voulu par les encadrants, dans la modélisation paramétrique tout au long du workshop de Nancy. Les étudiants ont en effet passé la grande majorité de la semaine de conception à modéliser leur projet sur Grasshopper.

On peut donc considérer que l'intégration du numérique dans la matérialisation est possible à partir d'un certain niveau de modélisation. L'influence de la maîtrise du logiciel paramétrique sur son utilisation a déjà été évoquée par Yu et al. (2015). Notre étude permet de montrer qu'elle a aussi une influence sur le continuum conception-fabrication.

Il faut cependant noter que la durée très courte des workshops observés a certainement influencé les choix des outils et incité les étudiants à travailler de manière efficace en utilisant les logiciels connus.

Les observations ont effectivement été réalisées sur des processus de conception d'une durée maximale de 7 jours. Cette contrainte, liée à l'accès au terrain, est à considérer dans l'interprétation des résultats. La section suivante aborde d'ailleurs la relativité de la notion de « rapidité » associée au prototypage.

2.2. La relativité de la notion de « rapidité » dans prototypage rapide

L'exemple du groupe M2 présenté dans les résultats remet en question le critère de rapidité qui caractérise le prototypage rapide.

Le moment N°49 dans la grille d'analyse présentée en annexe 14 l'illustre bien:

*«Réalisent la **maquette finale à la main et en carton mousse.***

-L'impression 3D prend trop de temps.

-Les facettes imprimées en 3D serviront à expliquer le fonctionnement du système sur une seule structure et non les 3 à l'échelle 1:10e

-Légère déception de ne pas pouvoir tout faire en impression 3D car le résultat est plus précis et plus propre ».

Dans cette équipe, la contrainte de temps a pu nuire à l'intégration du prototypage rapide dans le processus de conception. L'impression ayant pris environ 32h pour la maquette 1:10e, il est donc légitime de s'interroger sur la pertinence de son utilisation à partir d'une certaine échelle.

La section suivante aborde la notion d'échelle en tant que limite éventuelle à l'utilisation du prototypage rapide.

2.3. L'échelle, une limite du prototypage rapide?

Le questionnaire a permis de démontrer que les échelles de conception trop petites engendraient des difficultés dans la matérialisation des assemblages. En revanche, l'exemple du groupe M2 cité précédemment montre qu'une échelle trop importante remet en question l'efficacité du prototypage « rapide ».

Ce constat peut nous amener à considérer qu'il existe un domaine d'échelle propice à l'utilisation et à l'intégration du prototypage rapide dans le continuum conception fabrication. Cette question pourrait faire l'objet d'une recherche spécifique mais l'analyse des prototypes réalisés par le groupe N4 peut apporter quelques éléments de réponse.

Le groupe N4 a su exploiter et s'adapter aux différents outils mis à disposition. L'impression 3D a été utilisée dans les premières phases du processus pour la recherche formelle comme l'illustre la figure 112 ci-dessous. Elle a aussi été utilisée pour la réalisation des éléments d'assemblages d'échelle réduite et aux formes complexes. La création de deux assemblages spécifiques en fonction de l'emplacement de ceux-ci rejoint la méthode DDF (Digital Design Fabrication) proposée Sass et Oxman (2006) en section 5.2 de l'état de l'art.

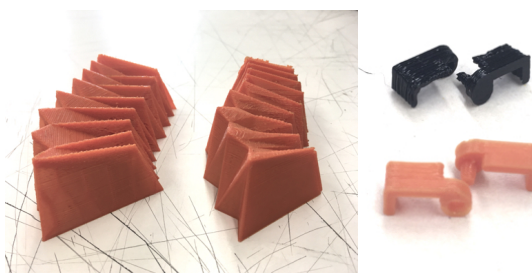


Figure 112: Prototypes réalisés en impression 3D

Les étudiants ont utilisé la découpe laser pour la réalisation des éléments de grandes dimensions pour les prototypes et la maquette finale (Figure 113). Ce processus de construction de la maquette s'apparente au processus que l'on pourrait trouver en construction réelle.



Figure 113: photographies de quelques étapes de la matérialisation finale

Notre étude montre donc que l'impression 3D utilisée en prototypage rapide est plus applicable aux échelles réduites pour évaluer la forme globale. Elle est efficace pour l'élaboration d'éléments d'assemblages complexes comme l'avaient remarqué Sass et Oxman (2006).

Cependant, les limites du prototypage rapide concernant l'échelle, confronte le concepteur à la réalité constructive. En effet, il n'y a peu de sens à vouloir utiliser l'impression 3D pour obtenir tout le projet en un seul monobloc. L'architecture est en grande majorité basée sur l'assemblage d'une multitude d'éléments bien que la robotisation et l'utilisation de l'impression 3D à l'échelle 1:1 tend à remettre en question cette théorie. Le niveau d'intégration N°1 du numérique dans le continuum de matérialisation, identifié dans ce travail, oriente le concepteur vers cette démarche. Les outils deviennent complémentaires et la découpeuse laser qui permet la découpe d'éléments plus importants en un temps moindre s'associe à l'imprimante 3D.

2.4. Le lâcher prise des concepteurs

Les résultats ont montré différentes manières d'aborder la modélisation paramétrique entre les groupes. Certains ont exploité les possibilités de variantes offertes par le logiciel Grasshopper, d'autres ont tenté de reproduire un modèle physique réalisé en début de processus.

Par exemple, la contrainte principale rencontrée dans le processus de conception du groupe M1 et traduite par leurs dires: « **Appliquer notre idée sur Grasshopper sans la dénaturer** », confirme les résultats de Bourbonnais (2014) ou Yu (2015), qui expliquent qu'en pratique, les architectes en situation de modélisation paramétrique se laissent peu guider par l'ordinateur. Les architectes veulent en effet rester maîtres de ce qu'ils créent morphologiquement parlant. On peut dans un sens considérer que cette volonté de garder l'emprise sur la forme est rassurant, mais peut aussi témoigner d'une réticence à l'égard de ces nouveaux outils. Le groupe M1 a en effet réalisé un nombre significatif de prototypes manuels. Ce constat rejoint le besoin de réalisation de « preuves physiques » afin de vérifier, de manière itérative, que le modèle est réalisable.

Les analyses présentées dans les quatre sections précédentes démontrent quatre obstacles pouvant expliquer les différences d'intégration du prototypage rapide dans le continuum conception-fabrication:

- ▶ La maîtrise du logiciel paramétrique
- ▶ La durée limitée de l'exercice
- ▶ Les outils adaptés à un domaine d'échelle
- ▶ Le « lâcher prise » des concepteurs.

Après avoir étudié les interactions entre le numérique et le physique, intéressons nous maintenant aux rôles des prototypes physiques réalisés dans un contexte numérique au cours des processus réalisés.

3. La maquette physique joue t-elle un rôle spécifique dans un processus de conception architecturale numérique?

3.1. Un nouveau rôle du prototype

La section des résultats a déjà décrit une utilisation spécifique de la maquette physique liée à la modélisation paramétrique. Une description de tous les prototypes physiques réalisés a d'autre part permis d'identifier les rôles joués par ceux-ci (Tableau 16 - section 4.3)

Le travail suivant consiste à classer les différents prototypes physiques, réalisés manuellement ou numériquement, selon les rôles définis par Houde et Hill (1997) qui ont été présentés dans la section 4.3 de l'état de l'art, et d'en définir de nouveaux si besoin.

Le tableau 21 ci-dessous classe donc les rôles obtenus via le tableau 16 présenté dans la section 4.3. des résultat selon les trois grandes catégories proposées par Houde et Hill: Fonction, Technologie, Aspect.

CATEGORIES	FONCTION	TECHNOLOGIE	ASPECT	?
Rôles rencontrés	- Tester le matériau - Tester le mécanisme - Vérifier le fonctionnement	- Tester la résistance - Tester le mécanisme - Vérifier le fonctionnement	- Recherche formelle - Visualiser l'aspect	- Support pour la modélisation paramétrique - Tester et vérifier la fabrication - Support de réflexion sur la mise en oeuvre - Tester un assemblage - Contrôler la matérialisation

Tableau 21: Classement des rôles obtenus

Ce tableau exprime des rôles inclassables en regard des catégories préconisées par Houde et Hill (1997). Ces rôles, placés dans la dernière colonne de ce tableau, peuvent être divisés en deux catégories:

La première catégorie est liée au rôle « **support pour la modélisation paramétrique** ». Nous avons déjà montré que la maquette physique a servi pour certaines équipes à élaborer la modélisation paramétrique. Ce rôle est très spécifique à la conception en présence de modélisation paramétrique mais représente un rôle observé pendant le workshop de Mons au même titre que le croquis.

Cette première catégorie, si elle est la raison d'être de deux prototypes, elle reste cependant difficilement généralisable.

La seconde catégorie rassemble les rôles suivants:

- « **Tester et vérifier la fabrication** ». Ce rôle a été observé après les phases de modélisation paramétrique où les concepteurs devaient vérifier que leur modèle était bien réalisable;
- « **Support de réflexion pour la mise en oeuvre** »: Ce rôle a été observé avec la maquette physique traditionnelle du groupe M3;
- « **Contrôler la matérialisation** »: Ce rôle a été observé par exemple dans le groupe M4 lors de la réalisation des prototypes avec la découpeuse laser;
- « **Tester un assemblage** »: ce rôle a été observé dans groupe N4 lors de la réalisation de la charnière par exemple.

Ces rôles sont liés au processus de matérialisation et donnent la preuve au concepteur que le modèle et la forme générée sont réalisables physiquement. Leur but est de répondre à la question: « comment peut-on construire le modèle, le fabriquer? ». Ils rejoignent la catégorie identifiée par les travaux de Ullman (2003) expliquée dans l'état de l'art à la section 4.4, soit la catégorie type « **proof-of-product** » qui permet de vérifier que le concept peut se matérialiser et en évaluer la faisabilité.

Cette seconde catégorie, liée à la faisabilité de la matérialisation, a été rencontrée à de nombreuses reprises dans les différents groupes. Ce travail propose alors de considérer ce rôle comme un rôle clé pour permettre au concepteur d'avancer dans son processus de conception.

Cette recherche nous amène finalement à ajouter une dimension supplémentaire au modèle proposé par Houde et Hill, décrivant les rôles du prototypes sur 3 dimensions (fonction, technologie et aspect). Cette quatrième dimension, que l'on nommera ici « **faisabilité** » permet au concepteur de vérifier la faisabilité de sa conception numérique. Le schéma proposé dans la figure 113 ci-dessous reprend le modèle donné par Houde et Hill et ajoute la 4ème dimension identifiée dans ce travail.

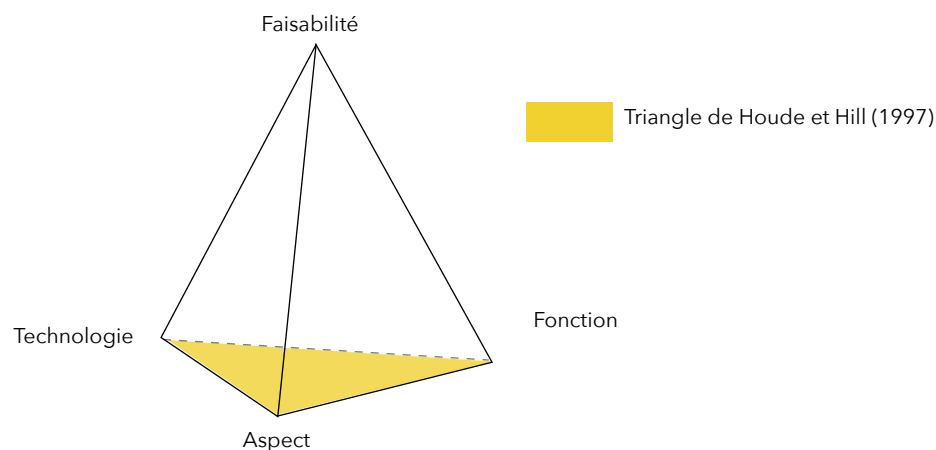


Figure 113: Proposition d'un modèle du rôle du prototype en conception architecturale numérique

Sur le même principe que les travaux effectués par Houde et Hill (1997), les prototypes réalisés par les équipes de conception peuvent être placés sur cette pyramide. Un exemple réalisé sur le groupe M4 est présenté par la figure 114 ci-dessous.

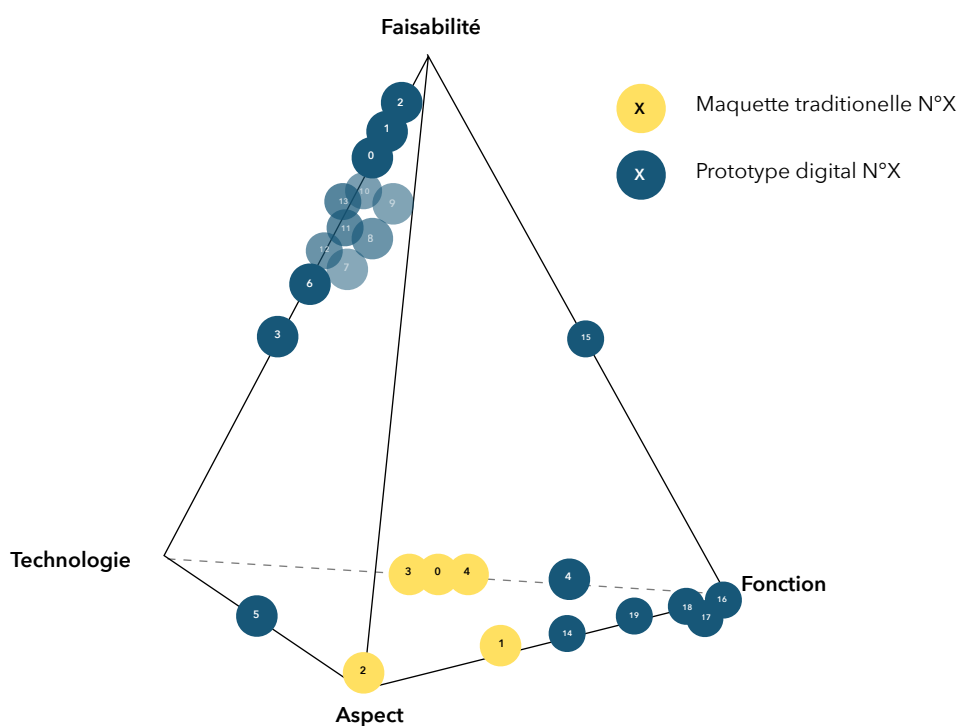


Figure 114: Prototypes effectués par le groupe M4 positionnés sur le pyramide des rôles

La pyramide présentée ci-dessus, montre d'une part que les prototypes réalisés par le groupe M4 peuvent avoir plusieurs rôles. Dans leurs cas, les maquettes traditionnelles réalisées restent sur la base de la pyramide et n'ont pas pour but réel de vérifier la faisabilité. La vérification de la faisabilité de la fabrication a eu lieu dans ce groupe essentiellement avec les prototypes réalisés à la découpeuse laser.

Ce travail permet donc de mettre en évidence un rôle joué par le prototype qui complète ceux déjà identifiés par les travaux de Houde et Hill (1997). Ce rôle de « faisabilité » qui permet au concepteur de comprendre comment il va construire l'objet, s'applique particulièrement bien à l'architecture et permet de prendre en compte le processus de constructibilité du projet. Par ailleurs, le nombre important de prototypes réalisés pour certains groupes met en évidence un usage de la matière conséquent dans un contexte numérique. Ce constat nous amène à nuancer voire contredire certaines théories défendues notamment par Pallasmaa qui place le numérique comme l'une des causes de l'éloignement entre la conception et la matière. C'est la suite de la discussion.

3.2. Le retour à la matérialité?

La peur de l'éloignement entre l'architecte et la matière est documentée depuis des décennies. A. Loos (1910) ou Le Corbusier (1930) exprimaient déjà cet éloignement. Cette peur s'est amplifiée par l'arrivée du numérique, qui accorde selon Pallasmaa (2005), trop d'importance à la visualisation.

Les résultats obtenus par cette étude dans un contexte de conception numérique nous autorisent à nuancer ces théories.

Bien qu'il existe actuellement encore des limites à l'intégration du prototypage rapide dans le continuum conception fabrication, on constate cependant qu'un nombre important de prototypes a été réalisé à Mons. Ce constat peut paraître paradoxal lorsqu'on le compare à l'utilisation de la maquette physique dans les processus de conception habituels des participants.

Comme nous l'avons déjà évoqué, le contexte pédagogique influence les résultats de la recherche, au sens où les participants au workshop étaient incités à créer ces prototypes. Cependant le questionnaire montre bien un besoin de fabrication élevé « *comme preuve que le projet est réalisable* », notamment au workshop de Mons.

De plus, cette matérialisation a une influence notable sur le niveau de constructibilité estimé par les concepteurs: soit la matérialisation augmente le niveau estimé lorsque elle se passe correctement, soit elle diminue si des problèmes sont rencontrés.

D'autre part, les outils de prototypage rapide ont clairement joué un rôle dans certains processus de conception. A Nancy, les résultats du questionnaire montrent que les participants ont été « légèrement » influencés par les contraintes des outils de fabrication digitale. En revanche, ils estiment en grande majorité que leur modèle paramétrique aurait été « difficilement réalisable » sans les outils de prototypage rapide. Une explication possible consiste à dire que les participants ont été influencés inconsciemment par la présence de la fabrication digitale et se sont laissés la possibilité d'explorer des formes plus innovantes.

Cette analyse, basée sur les résultats de l'observation de concepteurs en situation de conception à l'aide des outils numériques, a tendance à contredire la théorie d'une rupture créée par l'ordinateur entre le concepteur et la matière. Elle met en lumière au contraire, un possible rapprochement de l'utilisation de la matière dans le processus de conception architecturale, rapprochement outillé et suscité par le numérique. Les nouveaux outils de matérialisation mis à disposition des concepteurs jouent un rôle certain sur ce rapprochement et potentiellement sur l'innovation et la conception d'une solution viable.

3.3. Prototypage rapide en architecture source de réussite et d'innovation?

Les études présentées dans l'état de l'art démontrent qu'en design industriel la réalisation d'un nombre important de prototypes augmente la probabilité d'aboutir à une solution plus efficace (Section 4.3 de l'état de l'art). En architecture cette philosophie reste peu répandue et les architectes n'investissent pas autant de temps dans la réalisation de prototypes.

L'utilisation du prototypage rapide dans les groupes M4 et N4 a permis de mettre en évidence des pratiques assez atypiques qui s'approchent de celles du design industriel.

Premièrement, l'utilisation du prototypage rapide par ces deux équipes les a menés à réaliser une multitude de prototypes. Ils sont alors entrés dans un processus en boucles itératives visant à optimiser un assemblage ou bien une forme. Cette manière de concevoir complète la section précédente quant à l'usage de la matière en conception numérique. On peut en effet constater qu'une fois le processus d'itération déclenché par le prototypage, il se poursuit jusqu'à la fin du projet pédagogique.

Deuxièmement, le prototypage rapide a permis à ces deux groupes d'explorer des techniques qu'ils ne connaissaient pas et a ainsi favorisé l'innovation. L'exemple du groupe M4 qui a utilisé le pliage par soustraction de matière illustre ce phénomène. Au départ les étudiants étaient réticents à l'égard de cette technique, puis ils ont été surpris et très enthousiastes par cette nouvelle technique ce qui a déclenché le processus itératif.

Cette démarche a été appréciée par les membres du jury lors de la présentation finale, et ce groupe a reçu les meilleures appréciations lors de l'évaluation finale au workshop de Mons.

L'étude effectuée sur le terrain ne permet pas d'affirmer que le prototypage rapide s'est bien intégré aux différents processus de conception. En revanche, dans les deux seuls groupes pour lesquels il été exploité concrètement, les comportements et les démarches observées ont été remarquables. D'une part, l'usage de ces outils a déclenché un processus itératif entraînant la production d'une multitude de prototypes favorisant ainsi la conception par la matière. D'autre part, il a permis d'explorer de nouvelles techniques et a contribué à augmenter le niveau d'innovation du projet.

4. Limites de la méthodologie

Cette section discute les limites de la méthodologie mise en place pour réaliser cette étude. Elle aborde dans un premier temps l'élaboration du questionnaire, puis discute des limites rencontrées dans l'observation en situation.

4.1. Limites du questionnaire

Découpage en étapes

Pour élaborer un questionnaire permettant de mesurer l'évolution du ressenti, j'ai dû effectuer des hypothèses quant aux différentes étapes que les étudiants allaient progressivement traverser. Les quatre étapes (esquisse, élaboration du plan d'algorithme, modélisation, et matérialisation) ne se sont pas nécessairement déroulées de manière successive.

La phase esquisse s'est bien déroulée dans les premiers jours du processus et de manière synchrone entre les groupes, en revanche la fin des autres étapes n'était pas si nette et simultanée. En effet, les participants élaboraient la stratégie de modélisation paramétrique en même temps qu'ils modélisaient. De plus, les étapes entre les différents groupes n'étaient pas systématiquement synchrones puisqu'ils n'avançaient pas forcément au même rythme.

Une conséquence possible est la distribution du questionnaire à moment décalé par rapport au moment prévu. Cependant, l'en-tête de chaque questionnaire permettait de contextualiser les questions et de positionner le concepteur dans le processus de conception.

Par ailleurs, le taux de réponse des participants a évolué en fonction des étapes et en fonction du type de soumission.

L'évolution du taux de réponse

Le questionnaire a été soumis de deux manières différentes comme cela a été expliqué dans la section 3.2 de la méthodologie. Ces deux manières ont eu une influence sur le taux de réponse.

À Mons, le questionnaire était envoyé à chaque étape par e-mail aux étudiants. On constate une participation complète pour le premier questionnaire et une diminution du taux de réponse pour les trois autres.

En revanche à Nancy le questionnaire a été distribué au format papier en une seule fois, et les encadrants rappelaient aux étudiants de répondre au moment voulu. Seul un étudiant n'a pas répondu à la totalité du questionnaire.

Ce constat montre l'influence de la méthodologie employée sur le recueil de données et leur complétude. La soumission sur papier a permis d'obtenir un taux de réponse plus important que le questionnaire en ligne. D'autre part, le fait de soumettre les quatre questionnaires en une seule fois a certainement influencé le taux de participation. La méthodologie employée à Mons obligeait les étudiants à consulter leur mail à chaque étape ce qui a pu générer un phénomène de lassitude. Adopter deux méthodologies de soumission n'est pas l'idéal pour atteindre une validité optimale des résultats. Ceci nous a cependant été imposé par les contraintes des terrains d'études

4.2. Limites de l'observation

4.2.1. Accès au terrain

Ce travail examine des phénomènes et des changements récents dans les manières de concevoir. Dans cette situation la recherche d'un terrain d'étude adapté devient un point clé et un enjeu de taille pour la bonne mise en oeuvre du travail de recherche.

Dans le temps imparti, et compte tenu d'une présence encore faible de ces pratiques en agences d'architecture, le milieu universitaire était pour moi la solution la plus viable. Cependant, cela nous oblige à rester prudent quant à la généralisation des résultats. En effet, le niveau de maîtrise des étudiants en conception n'est pas équivalent au niveau de professionnels aguerris et expérimentés.

Les contraintes d'emploi du temps ne m'ont pas permis d'observer ce workshop sur le terrain directement. Cela influence donc la validité de certains résultats.

4.2.2. Le temps d'observation

La méthodologie adoptée pour ce travail impliquait une présence permanente sur le terrain d'étude.

Une durée de sept jours est certes une période courte comparée à la durée totale que représente ce travail, cependant, il s'agissait de sept jours intensifs, pour moi l'observateur, comme pour les concepteurs observés.

En effet, en ce qui me concerne, j'ai pu remarquer des phénomènes de fatigue au cours des journées continues d'observation.

En ce qui concerne les concepteurs observés, différents constats peuvent être faits. Tout d'abord, les concepteurs se sont plus ou moins bien prêtés au jeu de l'observation tout au long du workshop. Ce constat est d'autant plus important pour le groupe qui a accepté d'être filmé durant les sept jours. J'ai pu constater un certain malaise au début de l'observation vis-à-vis de la caméra, mais les concepteurs ont très vite accepté. Cependant en fin de processus la caméra devenait plus pesante alors que le stress du rendu s'ajoutait aussi à l'exercice.

Cette méthodologie peut être parfois invasive et doit pouvoir gérer pour ne pas biaiser la recueil des données.

La méthodologie adoptée basée sur l'observation ethnographique et le questionnaire se sont bien complétés pour ce travail. Certaines hypothèses réalisées pour l'élaboration du questionnaire n'ont pas été véritablement vérifiées et les techniques de soumissions ont influencé le taux de participation. Par ailleurs, l'accès au terrain reste une difficulté à prendre en compte très tôt dans un travail exploratoire de ce type.

CONCLUSION

CONCLUSION

A travers ce mémoire, deux notions a priori opposées qui concernent la conception architecturale aujourd'hui ont été confrontées: le numérique, un outil moderne en conception et la maquette physique, un outil ancestral de l'architecte

Les outils numériques de plus en plus performants et accessibles autorisent les concepteurs à explorer des morphologies innovantes au prix parfois de complications dans la mise en oeuvre. Les possibilités de visualisations offertes par les outils numériques 3D en conception architecturale, ont tendance à se substituer à l'usage de la maquette physique. Les bénéfices de son utilisation sont pourtant bien réels et reconnus par la communauté scientifique.

Partant de ces constats, ce travail propose une étude de l'usage de la maquette physique dans un processus de conception architecturale numérique. Un premier objectif de ce travail était d'identifier les différents rôles joués par la maquette physique (traditionnelle ou de prototypage rapide) dans un contexte de conception numérique. Le second objectif était d'analyser un éventuel continuum du numérique entre la conception et la fabrication de la maquette. Le troisième objectif consistait à étudier l'intégration des nouveaux outils de fabrication dans le processus de conception. Enfin ce travail devait pouvoir capter le ressenti du concepteur sur sa propre conception.

La mise en place d'une méthodologie basée sur l'observation ethnographique de deux groupes d'étudiants en situation de conception numérique a permis d'identifier des résultats variés. D'autre part, la démarche adoptée intègre la mise en place d'une enquête par questionnaire afin de compléter les résultats de l'observation et de capturer le point de vue du concepteur lui même.

Les données récoltées à travers l'étude de ces deux groupes ont permis d'identifier trois niveaux d'intégration du continuum numérique, de la conception jusqu'à la fabrication

L'étude a également permis d'identifier les obstacles et les freins à l'intégration du prototypage rapide dans le processus de conception architecturale. Il en résulte qu'une part importante de cette intégration est due à la maîtrise du logiciel paramétrique. L'échelle de la maquette, les contraintes des machines ainsi que le « lâcher prise » du concepteur interviennent également dans cette intégration.

Enfin, ce travail a permis d'identifier un rôle spécifique de la maquette physique en conception architecturale numérique, soit un support à l'élaboration du modèle paramétrique au même titre que le croquis d'esquisse. L'analyse a permis par ailleurs de définir un rôle plus généralisable aux prototypage en conception: la preuve de la matérialisation.

Finalement, ce travail démontre qu'il existe un continuum du numérique applicable à la maquette de conception. Ce continuum a lieu à différents niveaux d'intégration en fonction du niveau de maîtrise des outils numériques ainsi que d'autres facteurs.

Cette étude prouve également qu'une cohabitation entre des outils traditionnels que sont la maquette physique, le croquis et des outils modernes, technologiques, informatiques peut conduire le concepteur vers des solutions innovantes et viables.

A la suite de ce travail on peut affirmer qu'un environnement de conception numérique n'est pas forcément synonyme d'un éloignement du concepteur avec la matière. Au contraire, ces nouveaux environnements de conception peuvent amener le concepteur à repositionner la maquette physique comme un outil majeur et indispensable à la preuve de la faisabilité de son projet.

En revanche, l'intégration de la fabrication digitale dans le processus de conception architecturale n'est pas une chose évidente et naturelle pour les concepteurs peu entraînés. Ce travail montre cependant que son utilisation déclenche des comportements nouveaux en conception architecturale. Des boucles itératives basées sur des séquences de prototypage, d'évaluation, de décision et de conception rapprochent le processus de conception architectural des processus de conception en design industriel. Le concepteur dialogue avec le champ physique, numérique et technologique en explorant de nombreuses possibilités jusqu'à obtenir la solution la plus adéquate à ses yeux.

Ainsi, la production concrète du projet architectural est remise au coeur du processus de conception. Bien que la maîtrise de ces nouveaux outils reste, à l'heure actuelle et notamment en Belgique, encore limitée, les concepteurs sont conscients des possibilités offertes par la fabrication digitale pour l'innovation, la production de prototypes ou la mass-customisation. Ces nouveaux outils de conception et matérialisation peuvent aussi devenir ceux qui construisent les bâtiments. Le numérique crée aujourd'hui des liens entre les moyens de concevoir l'architecture et la produire.

La direction dans laquelle s'est engagée l'architecture ces dernières années impose aux architectes de considérer le numérique plus sérieusement que jamais. Sans nuls doutes, la nécessité pour eux de maîtriser les outils numériques n'a jamais été aussi grande qu'aujourd'hui.

Les manières de concevoir et de produire l'architecture présentées dans ce travail réinventent les pratiques de conception et de mise en oeuvre des bâtiments. Cette redéfinition qui mélange les domaines de compétence, pourrait également redéfinir l'identité professionnelle de l'architecte.

BIBLIOGRAPHIE

ARTICLES SCIENTIFIQUES, LIVRES ET PUBLICATIONS

[A]

Anadón, M., & Guillemette, F. (16 Mai 2006). La recherche qualitative est-elle nécessairement inductive? Dans *Recherches qualitatives en sciences humaines et sociales: les questions de l'heure: actes du colloque de l'Association pour la recherche qualitative (ARQ)*: Vol. 5, (pp. 26-37). Université McGill, Montréal.

Aish, R., & Woodbury, R. (2005). Multi-level Interaction in Parametric Design. In A. Butz, B. Fisher, A. Krüger, & P. Olivier (éd.), *Smart Graphics* (Vol. 3638, p. 151-162). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Consulté à l'adresse http://link.springer.com/10.1007/11536482_13.

[B]

Bagneris M. (17 Juin 2009). Contribution à la conception et à la réalisation des morphologies non-standard : les formes pascaliennes comme outil. *Thèse de doctorat à l'Université de Montpellier 2*.

Baker, L. (2006). Observation: A Complex Research Method. *Library trends* , 55 (1), pp. 171-189.

Bézier, P. (1987). Courbes et surfaces pour la CFAO. *Ed. Techniques Ingénieur*.

Blomberg, J., Burrell, M., & Guest, G. (2003). An Ethnographic Approach to Design. Dans *The Human-Computer Interaction Handbook: Fundamentals, Evolving Technologies and Emerging Applications*, ed. Jacko, J., Sears, A., London.

Blondin, D. (2004). L'observation en situation en milieu primaire: Dépasser les contraintes enrichir la recherche. *Recherche Qualitative*, HS, 2, 18-37. Consulté le 8 Novembre 2016 à l'adresse http://www.recherche-qualitative.qc.ca/documents/files/revue/hors_serie/hors_serie_v2/DBlondin%20HS2-issn.pdf.

Borillo, M. & Goulette, J.P. (ed.) (2002): Cognition et création; explorations cognitives des processus de conception. *Mardaga, Sprimont*. Consulté le 11 Mars 2017 au lien suivant: <https://books.google.be/>

Bourbonnais, S. (2014). Sensibilités technologiques: expérimentations et explorations en architecture numérique 1987-2010. *Thèse de doctorat à l'Université Paris-Est*. Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01143050/>

Bouvier, A., George, M., & Le Lionnais, F. (1979). Dictionnaire des mathématiques. F. Le Lionnais (Ed.). Presses universitaires de France.

Burns, C. M., & Vicente, K. J. (2000). A participant-observer study of ergonomics in engineering design: how constraints drive design process. *Applied ergonomics*, 31(1), 73-82.

Burns, H (1991) Building construction in Palladio's Vicenza, dans J Guillianme (ed) *Les Chaudiers de la Renaissance*, pp.191-226, Paris.

Burry, M., Burry, J., & Faulí, J. (Octobre 2001). Sagrada Família Rosassa: Global computeraided dialogue between designer and craftsperson (overcoming differences in age, time and distance). Dans *Reinventing the Discourse-How Digital Tools Help Bridge and Transform*

Research, Education and Practice in Architecture-Twenty First Conference of the Association for Computer Aided Design In Architecture (ACADIA), pp. 076-086.

Burry, M. (2002). Rapid Prototyping, CAD/CAM and human factors. *Automation in Construction*, 11(3), 313-333. Consulté le 10 Mars 2017 à l'adresse suivante <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580500001072>

[C]

Chatman, E. A. (1992). *The information world of retired women*. Westport, CT: Greenwood Press.

Chilton, J. (2000). Heinz isler. *The engineer's contribution to contemporary architecture* Publié par Thomas Telford. Londres.

Conan, M. (1990). *Concevoir un projet d'architecture*. Editions L'Harmattan.

Corbusier, L. (1930). *Précisions sur un état présent de l'architecture et de l'urbanisme* Paris. Vincent Fréal (éd. orig. 1930).

Couwenbergh, J-P. (2015). L'approche computationnelle : un changement de paradigme en conception architecturale. *Perspectives d'enseignements et de recherches*. Journée de la Recherche et des Doctorants en LOCI, 2015.

Cross, N. (2000). *Engineering design methods* (Vol. 4). New York: Wiley.

Cuff, D (1992) *Architecture: the story of practice*. MIT Press, Cambridge

[D]

Davis, D. (2013). *Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture*. RMIT University, Australie.

De Boissieu, A. (2010). *Modélisation paramétrique en conception architecturale: Caractérisation des opérations cognitives de conception pour une pédagogie*. Ecole Nationale Supérieur d'architecture de Paris la Villette, Paris.

Devaux, R. (2016). *Etude du workflow de projet d'architecture paramétrique. Identification des composantes récurrentes, perturbatrices ou novatrices*. Travail de fin d'étude à la faculté des sciences appliquées de l'Université de Liège.

Dubois, P., Aoussat, A., & Duchamp, R. (2000). *Prototypage rapide, généralités*. LCPI - Laboratoire Conception de Produits et Innovation. HAL archives-ouvertes. Consulté en ligne le 10 Avril 2017 à l'adresse <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01064800/document>.

[E]

Ebnother, Y. (Mars 2013). *The deceptive ease of folding: the industrialisation of a prototypical product*. Prototyping architecture: the conference papers. Building Centre Trust, London.

[F]

Frampton, K. (1985). *Studies in tectonic culture: the poetics of construction in nineteenth and twentieth century architecture*. *Graham foundation for advanced studies in the fine Arts & the MIT press*. Cambridge, Massachusetts. Consulté en ligne le 2 Avril 2017 au lien suivant: <https://issuu.com>.

[G]

Gibson, I., Kvan, T., & Wai Ming, L. (2002). Rapid prototyping for architectural models. *Rapid prototyping journal*, 8(2), 91-95.

Girard, C. (2014). L'architecture, une dissimulation. La fin de l'architecture fictionnelle à l'ère de la simulation intégrale. Dans *Modéliser & simuler*-Tome 2 (pp. 245-292). Editions Matériologiques, Paris.

Gold, R. (1958). Roles in Sociological Field Observation. *Social Forces*, 36, 217-223.

[H]

Häggman, A., Honda, T., & Yang, M. C. (Août 2013). The Influence of Timing in Exploratory Prototyping and Other Activities in Design Projects. Dans *ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. American Society of Mechanical Engineers.

Hochscheid E., (2012). Développement des échanges de fichiers entre deux acteurs de la construction. Mémoire de Master Design Global. Map Crai, Université de Lorraine.

Houde, S., & Hill, C. (1997). What do prototypes prototype? *Handbook of human-computer interaction*, 2, pp. 367-381.

Howard, T. J., Culley, S. J., & Dekoninck, E. (2008). Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature. *Design studies*, 29(2), 160-180. Consulté le 15 Avril 2017 à l'adresse <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142694X08000173>

Hoyet, N. (2007). Conception de la matérialisation en architecture: l'expérimentation comme facteur d'innovation industrielle. Thèse de doctorat à l'Institut National Polytechnique de Lorraine.

[J]

Javeau, C (1990). L'enquête par questionnaire, Editions de l'Université de Bruxelles. consulté le 19 Mai 2017 à l'adresse http://digistore.bib.ulb.ac.be/2007/DL2472288_000_f.pdf.

Kilian, A. (2017) Advancing Wood Architecture (Foreword). A computonial approach. pp. xix-xxv

[K]

Kolarevic, B. (2001). Digital fabrication: manufacturing architecture in the information age. *ACADIA*, pp. 268-277. Consulté le 5 Mai 2017 à l'adresse <http://papers.cumincad.org/data/works/att/81b8.content.pdf>.

Kolarevic, B. (Ed.). (2003). Architecture in the digital age: design and manufacturing. Taylor & Francis, New-York et Londres.

Kolarevic, B., & Klinger, K. (2013). Manufacturing material effects: rethinking design and making in architecture. Routledge.

Kolb, D. A., (1984). Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.

Kroes, P. (2002) Design methodology and the nature of technical artefacts. *Design Studies* vol 23 (pp.287-302).

Kundra, T. K. (1993). Computer aided manufacturing. Tata McGraw-Hill Education.

[L]

Leach, N. (16 juillet 2014). Parametrics Explained. *Baltzer Science Publishers*, p. 1-10. Harvard.

Lebahar, J-C. (2007). Paris: Hermès Sciences. Lavoisier.

Liker, J. K., & Morgan, J. M. (2006). The Toyota way in services: the case of lean product development. *The Academy of Management Perspectives*, 20(2), 5-20. Consulté le 25 Avril 2017 au lien suivant <http://astro.temple.edu>.

Loyer, F. (1974). Pour bien lire une maquette d'architecture: le relatoscope. *Communication et langages*, 23(1), 56-75.

Lynn, G. (1993). Folding in architecture. *Architectural Design*. (Vol. 102). *Academy Editions Limited*.

[M]

Markov, A. (1954). Theory of algorithms. Academy of Sciences of the USSR.

Martineau, S. (2005). L'observation en situation: enjeux, possibilités et limites. *Recherches qualitatives*, Hors série (2), pp. 5-17.

Menges, A. (2012). Material computation: Higher integration in morphogenetic design. *Architectural Design*, 82(2), 14-21.

Menges, A., Schwinn, T., & Krieg, O. D. (Eds.). (2017). *Advancing Wood Architecture: A Computational Approach*. Routledge.

Menges, A. (2017). Integrative design computation for advancing wood architecture. Dans A. Menges, T. Schiwnn, O. David (Eds.), *Advancing Wood Architecture: A Computational Approach*, pp.97-111. Routledge, New-York.

Mitchell, W. (2005) Constructing complexity. Dans Martens B., Brown A. (eds) *Computer Aided Architectural Design Futures 2005* (pp. 41-50). Springer, Dordrecht.

Mitchell, W. and M. McCullough. (1995). Prototyping. *Digital Design Media*, pp. 417- 440. Van Nostrand Reinhold. New York,.

Modeen, T. (2005). *CADCAMing. The use of rapid prototyping for the conceptualization and fabrication of architecture*. Consulté en ligne 8 février 2017 à l'adresse <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580504000779>

Mougenot, C. (2008). Modélisation de la phase d'exploration du processus de conception de produits, pour une créativité augmentée. Thèse de doctorat, Arts et Métiers ParisTech.

Moran, M. E. (2007). Evolution of robotic arms. *Journal of robotic surgery*, 1(2), 103-111.

Moretti, L., Bucci, F., & Mulazzani, M. (2002). Luigi Moretti: works and writings. *Princeton Architectural Press*.

[N]

Neeley, W. L., Lim, K., Zhu, A., & Yang, M. C. (Août, 2013). Building fast to think faster: exploiting rapid prototyping to accelerate ideation during early stage design. Dans *ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, (pp. V005T06A022-V005T06A022). American Society of Mechanical Engineers.

[O]

Oxman, R. (2005). Theory and design in the first digital age. *Design studies*, 27(3), 229-265.

Oxman, R., & Oxman, R. (2010). New structuralism: design, engineering and architectural technologies. *Architectural Design*, 80(4), 14-23.

Oxman, R., & Gu, N. (2015). Theories and models of parametric design thinking. Dans la 33ème Conference CAADe.

[P]

- Pahl, G., & Beitz, W. (1984). *Engineering design, The design council*. London, Springer, 12, 221-226.
- Pallasmaa, J. (2005). *Le regard des sens: The eyes of the skin. Édition du Linteau*.
- Picon, A. (2010). *Culture numérique et architecture: une introduction. Editions Birkhäuser*. Basel, Suisse.
- Picon A. (2005), *L'architecture et le virtuel: vers une nouvelle matérialité*. Dans *Le projet tectonique* Chupin J.P. et Simonnet C. (pp. 165-182). *Éditions Infolio. Les Grands Ateliers, Villefontaine, France*.
- Pottmann, H. (2012). *Architectural Geometry and Fabrication-Aware Design. Nexus Network Journal*, 15(2), 195.
- Pourtois, J. P., & Desmet, H. (2007). *Épistémologie et instrumentation en sciences humaines*. Editions Mardaga.
- Prost, R. (1992). *Conception architecturale: une investigation méthodologique*. Editions L'Harmattan.

[R]

- Rabut, C. (2002). On Pierre Bézier's life and motivations. *Computer-aided design*, 34(7), 493-510.
- Riche, Y., Simpson, M., & MacDonald, L. (Novembre 2003). *An observational analysis of collaborative actions in the design industry*. Technical report, The University of Queensland. Consulté le 6 Mai 2017 à l'adresse http://www.itee.uq.edu.au/uqmatrim/publications/ozchi_ethno_final.pdf.
- Ryder, G., Ion, B., Green, G., Harrison, D., & Wood, B. (2002). Rapid design and manufacture tools in architecture. *Automation in construction*, 11(3), 279-290. Consulté le 6 mai 2017 à l'adresse [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(00\)00111-4](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(00)00111-4).

[S]

- 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).
- Sass, L., & Oxman, R. (2006). Materializing design: the implications of rapid prototyping in digital design. *Design Studies*, 27(3), 325-355.
- Schumacher, P. (2009). Parametricism: A New Global Style for Architecture and Urban Design. *Architectural Design*, 79(4), 14-23. <http://doi.org/10.1002/ad.912>
- Schön D. A. (1983). *The reflective practitioner: How professionals think in action*. New York: Basic Books (reprinted in 1995).
- Self, M. (2017). Hooke Park. Applications for timber in its natural form. Dans A. Menges, T. Schiwnn, O. David (Eds.), *Advancing Wood Architecture: A Computational Approach*, (pp.141-153). Routledge.
- Silvestri, C. (Juin 2009). *Perception et conception en architecture non-standard. Une approche expérimentale pour l'étude des processus de conception spatiale des formes complexes. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II*. Consulté le 9 Mai 2017 à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00858782/document>.
- Sommerville, I., (1995). *Software Engineering, Addison Wesley*, Wokingham, England.

- Spradley, J. P., & McCurdy, D. W. (1980). *Anthropology, the cultural perspective*. John Wiley & Sons.
- Stals, A., Elsen, C., Jancart, S., Delvaux, F. (2015). Challenges in teaching architectural morphogenesis. *Dans Proceedings of the 3rd International Conference for Design Education Researchers*.
- Stals, A., Elsen, C., & Jancart, S. (2016). Ruptures et démesures de l'architecture non standard à l'ère du numérique: la paramétrisation comme outil de réconciliation. *Actes du Séminaire de Conception Architecturale Numérique*.
- Stals, A., Elsen, C., & Jancart, S. (Juillet 2017). Practical Trajectories of Parametric Tools in Small and Medium Architectural Firms. *CAAD Futures*, Istanbul, Turquie.
- Stehling H., Scheurer F. , Roulier J. (2014). Bridging the gap from CAD to CAM: concepts, caveats and a new grasshopper plug-in. *Fabricate 2014*, pp. 52-59. ETH, Zurich.
- Streich, B. (Juillet 1991). Creating architecture models by computer-aided prototyping. *Dans Computer Aided Architectural Design Futures: Education, Research, Applications (CAAD Futures '91 Conference Proceedings)*, Zürich (Switzerland), pp. 535-548.
- Sundar, S., Selwyn, S. T., & Elanchezhian, C. (2005). *Computer aided manufacturing*. Firewall Media.

[T]

- Tedeschi, A. (2014). *AAD, Algorithme Aided Design. Parametric Strategies using Grasshopper*. Le Penseur Publisher, Brienza.
- Terzidis, K. (2003). *Expressive Form: A Conceptual Approach to Computational Design*. Taylor & Francis.
- Terzidis, K. (2006). *Algorithmic architecture*. Routledge.

[U]

- Ullman, D. G. (2003). *The mechanical design process*. New York: McGraw-Hill. Consulté le 20 Avril 2017 à l'adresse: ftp://210.212.172.242/Digital_Library/Mechanical/MACHINE%20DESIGN/The%20Mechanical%20Design%20Process.pdf

[V]

- Viswanathan, V. K., & Linsey, J. S. (2012). Physical models and design thinking: A study of functionality, novelty and variety of ideas. *Journal of Mechanical Design*, 134(9), pp.091004.

[W]

- Ward, A., Liker, J. K., Cristiano, J. J., & Sobek, D. K. (1995). The second Toyota paradox: How delaying decisions can make better cars faster. *Sloan management review*, 36(3), 43.
- Weisberg, D. E. (2008). The engineering design revolution: the people, companies and computer systems that changed forever the practice of engineering. *Cyon Research Corporation*, 1-26.
- Weisstein, E. W. (2009). *Concise Encyclopedia of Mathematics*. CRC Press/Taylor.
- Wendland, D. (2000). Model-based formfinding processes: free forms dans *structural and architectural design*. Allemagne: Université de Stuttgart.
- Woodbury, R. (2010). *Elements of parametric design*. Routledge, London & New York.

[Y]

- Yang, M. C. (2005). A study of prototypes, design activity, and design outcome. *Design Studies*, 26(6), pp. 649-669.

Yessios, C. (2003). Is there more to come? Architecture in the digital age, édité par Branko Kolarevic, pp. 259-268. New York: Spon Press.

Yu, R., Gu, N., Ostwald, M., & Gero, J. S. (2015). Empirical support for problem-solution coevolution in a parametric design environment. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 29(01), 33-44.

[Z]

Zhang, J., Norman, D.A. (1994). Representation in Distributed Cognitive Tasks. *Cognitive Science*, vol. 18, 87-122.

Zeiler, W., Savanovic, P., & Quanjel, E. (2007). Design decision support for the conceptual phase of the design process. Consulté sur <https://pure.tue.nl/ws/files/1697054/Metis213998.pdf>

Zeisel, J. (1981) *Inquiry by design*, W.W. Norton and Company, New York - London

INTERVIEWS, REVUES ET RESSOURCES INTERNET

Fillion, O. (7 janvier 1999). Emergence de l'architecture virtuelle. Consulté en ligne à l'adresse <http://www.ciren.org/ciren/conferences/070199/>

Herzog, J. (Mai 2004). Regard inédit sur le travail d'Herzog & de Meuro. Consulté le 10 Mai 2017 à l'adresse <http://www.swissinfo.ch/fre/regard-in%C3%A9dit-sur-le-travail-d-herzog---de-meuron/3892370>

Maniaque, C. (2017). Hooke Park: les architectes de l'Architectural Association et la forêt. *D'Architectures* (250), pp. 86-89.

Picon, A. (2013) Post-histoire de l'architecture : la révolution numérique. *Le courrier de l'architecte*. Consulté le 15 Mars 2017 à l'adresse https://www.lecourrierdelarchitecte.com/article_4634

Sutherland, I. (1963). *Ivan Sutherland Sketchpad Demo*. Massachusetts Institute of Technology. Consulté à l'adresse https://www.youtube.com/watch?v=USyoT_Ha_bA

Trotec. (2017). <https://www.troteclaser.com/fr-be/machines-laser/machines-decoupe-laser-sp/>

ANNEXES

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1: Enoncé du Workshop Matérialités Numériques de Mons.....	139
Annexe 2: Questionnaire soumis au workshop de Nancy	142
Annexe 3: Accord d'utilisation de production et de droit d'image.....	146
Annexe 4: Version N°1 de la grille d'observation (Groupe M1 le 15/02/16).....	147
Annexe 5: Version N°2 de la grille d'observation (Groupe M1 le 16/02/16).....	148
Annexe 6: Version n°3 de la grille d'observation (Groupe M4, le 21/02/2017).....	149
Annexe 7: Grille de transcription du groupe M1.....	150
Annexe 8: Grille de transcription du groupe M2.....	153
Annexe 9: Grille de transcription du groupe M3.....	156
Annexe 10: Grille de transcription du groupe M4	161
Annexe 11: Ligne du temps du processus de conception du groupe M1	165
Annexe 12: Description des artefacts réalisés par le groupe M1	166
Annexe 13: Ligne du temps du processus de conception du groupe M2	168
Annexe 14: Description des artefacts réalisés par le groupe M2.....	169
Annexe 15: Ligne du temps du processus de conception du groupe M3	172
Annexe 16: Description des artefacts réalisés par le groupe M3.....	173
Annexe 17: Ligne du temps du processus de conception du groupe M4	176
Annexe 18: Description des artefacts réalisés par le groupe M4.....	177
Annexe 19: Ligne du temps du processus de conception du groupe N1	179
Annexe 20: Description des artefacts réalisés par le groupe N1	180
Annexe 21: Ligne du temps du processus de conception du groupe N2	181
Annexe 22: Description des artefacts réalisés par le groupe N2	182
Annexe 23: Ligne du temps du processus de conception du groupe N3	183
Annexe 24: Description des artefacts réalisés par le groupe N3	184
Annexe 25: Ligne du temps du processus de conception du groupe N4	185
Annexe 26: Description des artefacts réalisés par le groupe N4	186
Annexe 27: Profils des étudiants participants au workshop matérialité numériques [Mons]	189
Annexe 28: Profils des étudiants participants au workshop CFD [Nancy]	189
Annexe 29: Réponses des groupes M1 et M2 au questionnaire.....	190
Annexe 30: Réponses des groupes M3 et M4 au questionnaire.....	196
Annexe 31: Réponses des groupes N1 et N2 au questionnaire.....	202
Annexe 32: Réponses des groupes N3 et N4 au questionnaire.....	205
Annexe 33: Processus de conception des étudiants montois interrogés le 11/02/2017	208
Annexe 34: Processus de conception des étudiants Nancéiens interrogés le 06/02/2017	209
Annexe 35: réponse à la question 3/ du questionnaire par les participants	210
Annexe 36: réponse à la question 21/ concernant les principales difficultés rencontrées.....	211

Annexe 1: Enoncé du Workshop Matérialités Numériques de Mons



Dr. Mohamed-Anis GALLAS
Service Conception Architecturale
Faculté d'Architecture et d'Urbanisme
Université de Mons



Ar. Frédéric DELVAUX
Laboratoire de Culture Architecturale Numérique (LNA)
Faculté d'Architecture
Université de Liège



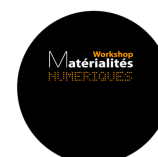
MATÉRIALITÉS NUMÉRIQUES

Objectifs

- Sensibilisation à la **culture architecturale numérique**
- Mise en oeuvre du principe de **Continuum Numérique**
- Questionner **le lien entre Matérialité / Numérique**
- Intégration des **techniques de fabrication numérique**
- Intégration de la **culture architecturale numérique** dans un **contexte de conception**

MATÉRIALITÉS NUMÉRIQUES

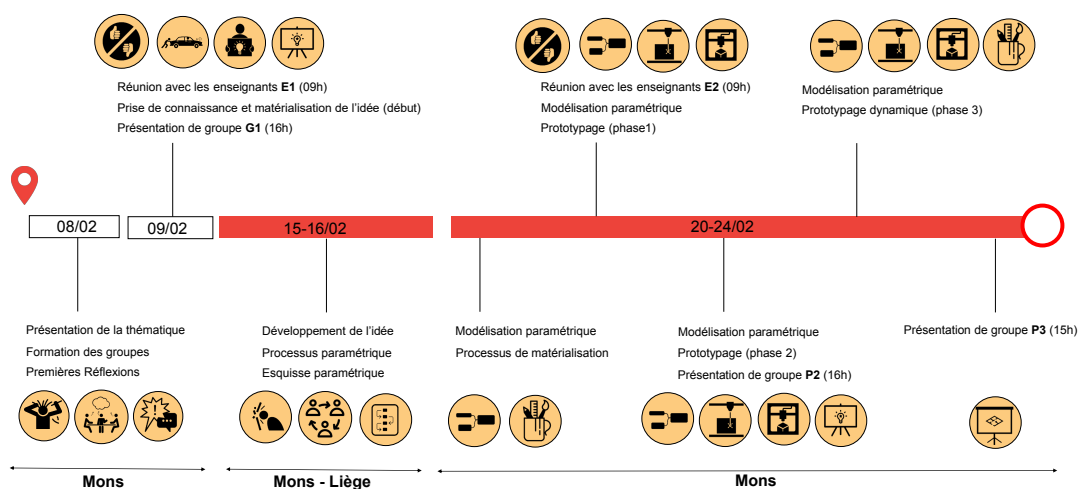
Enseignant	Mohamed-Anis GALLAS Chargé de Cours Centre URBAInE Faculté d'Architecture et d'Urbanisme Université de Mons	Frédéric DELVAUX & Romuald BIANCHI Chargé de Cours Informaticien Laboratoire de Culture Numérique en Architecture Faculté d'Architecture Université de Liège
Etudiant	Jacques COLLIN Etudiant Ir-Ar / Observation Faculté des Sciences Appliquées Université de Liège	
Partenaire	FabLab de Mons	
Outils	Rhinoceros + Grasshopper Modélisation paramétrique ContextCapture Photogrammétrie MarkerBot Desktop Impression 3D SketchFab Partage et annotation de modèle 3D sur le web Lucidchart Création et partage de graphes en ligne	
Dispositifs	MakerBot Replicator 2 Impression 3D Cyborg Découpe laser	



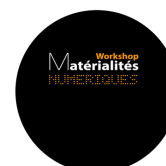
MATÉRIALITÉS NUMÉRIQUES



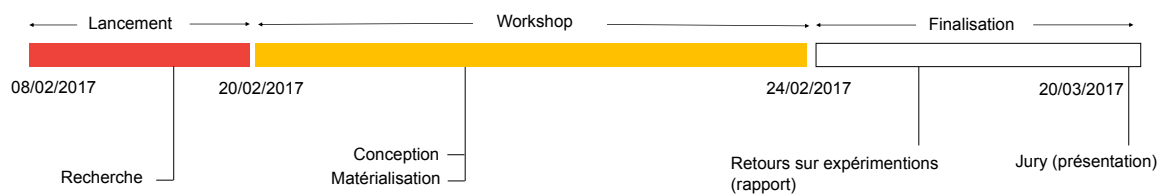
Organisation



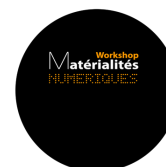
MATÉRIALITÉS NUMÉRIQUES



Organisation



MATÉRIALITÉS NUMÉRIQUES



Evaluation

Présentation finale

Présentation de 15-20 min / groupe

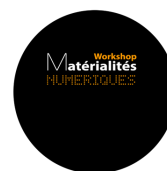
Rédiger rapport

Rapport de synthèse, retours sur expérience, intégration d'une démarche de conception numérique

Participation au workshop

Présence, degré d'investissement, participation aux activités de conception et de matérialisation

MATÉRIALITÉS NUMÉRIQUES



Sujet

Ecran acoustique dynamique

Proposer une intervention à l'intérieur de la Chapelle du Bélian pour améliorer ses performances acoustiques dans différents contextes d'utilisation

Intégration de la dimension dynamique

Utiliser le potentiel de la modélisation paramétrique et des outils de prototypage rapide pour proposer une nouvelle matérialité au écrans

Respect de la dimension patrimoniale

Apporter une valeur ajoutée au projet sans nuire à son identité

Recherche d'une nouvelle matérialité

Recherche de liens entre matérialité et culture numérique

MATÉRIALITÉS NUMÉRIQUES



Observation

Jacques Collin étudiant Ir-Ar Faculté des Sciences Appliquées (Université de Liège)

Récolte d'informations

Récupérer des informations utiles pour améliorer l'organisation des cours et pour réaliser des études scientifiques (caractérisation du processus de matérialisation numérique)

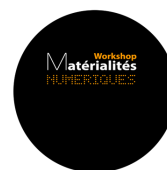
Questionnaires

Questionnaire en ligne permettant d'avoir vos retours à des moments charnières du processus de matérialisation

Prise de photos, capture d'écran et capture vidéo

Capture des sessions de conception, des échanges et des supports produits

MATÉRIALITÉS NUMÉRIQUES



Démarche

Phénomène acoustique

Chercher des références physiques concernant le traitement acoustique des espaces

Formes / comportement acoustique

Explorer les typologies de traitements acoustiques – identifier des pistes à développer

Proposer des configurations innovantes

Réflexion sur la forme, le matériaux et leurs interaction avec la dimension numérique – Proposer un modèle (modélisation paramétrique)

Contextualiser et matérialiser la proposition

Lier le modèle proposé au contexte étudié et le matérialiser (prototypage - fabrication numérique)

Annexe 2: Questionnaire soumis au workshop de Nancy

QUESTIONNAIRE _ Fabrication Digitale

Ce questionnaire a pour objet d'identifier l'influence de la présence de la « fabrication digitale » sur votre manière de concevoir un projet architectural, et d'identifier son impact sur l'innovation et la «constructibilité».

Votre avis est précieux pour ce travail de recherche. Il restera strictement confidentiel et ne servira qu'à des fins scientifiques.

Informations générales

Nom: Age:
Prénom: Niveau d'étude actuel:
Groupe: Formation d'origine:
Nombre d'années de pratique architecturale:

Expérience

A/ Avez-vous déjà utilisé la modélisation paramétrique pour un projet d'architecture?

Oui
Non

Si oui, combien de fois?

B/ Avez-vous déjà utilisé la fabrication digitale pour un projet d'architecture?

Oui
Non

Si oui, combien de fois?

C/ Habituellement, quelles sont les grandes étapes de votre processus de conception architectural? Quels sont les outils associés à chaque étape? (Décrivez brièvement ces étapes)

(Exemple: Etape 1: schéma fonctionnel + crayon)

Pour le Mardi 07/02 - à remplir en début de séance

Questionnaire N°1

L'exercice de conception demandé ici, implique l'utilisation de deux outils: la modélisation paramétrique et la fabrication digitale (découpe laser, impression 3D,...). La première étape de votre travail a été la réalisation de croquis, d'esquisses, ou autre représentations de votre structure.

1/ Par rapport à un processus de conception traditionnel, la présence des outils de fabrication digitale dans le processus vous oriente vers des formes:

beaucoup plus simples plus complexes
sans impact plus complexes
beaucoup plus complexes

2/ Par rapport à un processus de conception traditionnel, la présence des outils de modélisation paramétrique dans le processus de conception vous oriente vers des formes:

beaucoup plus simples plus complexes
sans impact plus complexes
beaucoup plus complexes

3/ La modélisation paramétrique vous paraît-elle être un outil adéquate pour modéliser votre projet ? (cochez une case)

pas du tout adéquate peu adéquate sans impact assez adéquate très adéquate

pouvez-vous donner la ou les raison(s)?

4/ A ce stade de la conception, quelle est la raison principale qui justifie l'utilisation des **outils de fabrication** digitale pour votre projet? (cochez une case)

- ☐ les formes sont complexes
- ☐ les éléments sont nombreux et répétitifs
- ☐ le nombre de prototypes à réaliser est important
- ☐ autre raison:

5/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le **niveau d'innovation global** de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?

☐	☐	☐	☐	☐
beaucoup moins innovant	moins innovant	équivalent	plus innovant	beaucoup plus innovant

6/ A ce stade de la conception, à combien estimez vous le **niveau de « constructibilité*»** de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?

☐	☐	☐	☐	☐
très inférieur	inférieur	équivalent	supérieur	très supérieur

* Constructibilité: facilité de construction d'un projet d'architecture en tenant compte des aspects techniques et économiques.

7/ Avez-vous déjà réfléchi à une manière possible de construire votre structure à l'échelle 1:1? (cochez une case)

- ☐ oui
- ☐ non
- ☐ je ne sais pas

si oui, pouvez-vous la décrire brièvement?

10/ Le plan d'algorithme imaginé vous permet : (Classez de 1 à 4 les propositions suivantes: 1=la plus important et 4= la moins important)

- ☐ de mettre en place les étapes de la modélisation
- ☐ de comprendre les étapes de construction de la structure
- ☐ de créer une modélisation « souple » au changement
- ☐ autre:

11/ Pensez-vous qu'il existe des liens entre l'algorithme et les étapes de constructions? (cochez une case)

- ☐ oui
- ☐ non
- ☐ pourquoi?

➡ Pour le Mercredi 08/02_ à remplir à la fin de la modélisation

Questionnaire N°2
A ce stade, la modélisation paramétrique devrait être finalisée.

12/ Ressentez-vous le besoin de fabriquer physiquement votre modèle pour valider vos choix? (cochez une case)

- ☐ oui
- ☐ non
- ☐ je ne sais pas

13/ Selon vous, la maquette physique vous permettra principalement: (cochez une ou plusieurs cases)

- ☐ d'avoir la preuve que le modèle est réalisable
- ☐ de valider l'esthétique
- ☐ de tester le fonctionnement de chaque version
- ☐ de tester un assemblage
- ☐ autre:

14/ Pensez-vous que votre modèle 3D est facilement réalisable en maquette physique sans les outils de fabrication digitale? (cochez une case)

- ☐ impossible
- ☐ difficilement réalisable
- ☐ facilement réalisable
- ☐ je ne sais pas

comment feriez vous?

15/ A ce stade de la conception, à combien estimez vous le niveau d'innovation global de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?

☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

beaucoup moins innovant	moins innovant	équivalent	plus innovant	beaucoup plus innovant
☐	☐	☐	☐	☐
très inférieur	inférieur	équivalent	supérieur	très supérieur

16/ A ce stade de la conception, à combien estimez vous le niveau de « constructibilité » de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?

➡ Pour le Vendredi 10/02 - à remplir à la fin de la fabrication.

Questionnaire N°3

Vous avez à présent terminé la fabrication de votre structure.

17/ Parmi les outils de conception ci-dessous, lequel a le plus favorisé votre créativité?
(classez les propositions suivantes de 1 à 4 par ordre d'importance: 1=le plus important et 4=le moins important)

- ☐ le croquis d'esquisse
- ☐ les références architecturales
- ☐ la modélisation 3D sur Grasshopper
- ☐ les outils de fabrication digitale

18/ La modélisation paramétrique vous a permis dans votre projet:
(classez les propositions suivantes de 1 à 5 par ordre d'importance: 1= le plus important et 5=le moins important)

- ☐ de générer des formes innovantes
- ☐ de faciliter la fabrication digitale
- ☐ de faire varier la géométrie facilement
- ☐ de créer une structure plus constructible
- ☐ rien de plus qu'une modélisation traditionnelle

19/ Quelle est la raison principale qui justifie l'utilisation des outils de fabrication digitale pour votre projet? (cochez une case)

- ☐ les formes sont complexes
- ☐ les éléments sont nombreux et répétitifs
- ☐ le nombre de prototypes à réaliser est important
- ☐ autre raison:

20/ Les contraintes des outils de fabrication digitale ont-elles influencé la conception de votre projet? (cochez une case)

- ☐ pas du tout
- ☐ légèrement
- ☐ fortement
- ☐ totalement
- ☐ je ne sais pas

Pouvez-vous dire pourquoi?

21/ Pouvez-vous citer trois principales difficultés rencontrées lors de la fabrication de votre maquette?

- ▶
- ▶
- ▶

22/ A ce stade de la conception, à combien estimez vous le **niveau d'innovation global** de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?

☐ beaucoup moins innovant	☐ moins innovant	☐ équivalent	☐ plus innovant	☐ beaucoup plus innovant
--	---	-------------------------------------	--	---

23/ A ce stade de la conception, à combien estimez vous le **niveau de « constructibilité »** de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?

☐	☐	☐	☐	☐
très inférieur	inférieur	équivalent	supérieur	très supérieur

24/ Par rapport à un processus de conception traditionnel, la présence des outils de **fabrication digitale** dans le processus vous a orienté vers des **formes**:

☐	☐	☐	☐	☐
beaucoup plus simples	plus simples	sans impact	plus complexes	beaucoup plus complexes

25/ Par rapport à un processus de conception traditionnel, la présence des outils de **modélisation paramétrique** dans le processus vous a orienté vers des **formes**:

☐	☐	☐	☐	☐
beaucoup plus simples	plus simples	sans impact	plus complexes	beaucoup plus complexes

26/ Êtes-vous satisfait de votre projet?

☐	☐	☐	☐	☐
pas satisfait	peu satisfait	sans avis	satisfait	très satisfait

Annexe 3: Accord d'utilisation de production et de droit d'image

ACCORD D'UTILISATION
DE PRODUCTION ET DE DROIT D'IMAGEJe soussigné(e) LESIRE Robin

participant(e) au Workshop « Matérialités Numériques » du 15 Février au 24 Février 2017 ainsi qu'à la journée de présentation finale du 20 Mars 2017, autorise M. Gallas, M. Delvaux et M. Collin à utiliser librement, à des fins de recherche et d'enseignement, tout contenu, toute image fixe ou animée me représentant, ainsi que toutes mes productions graphiques et textuelles réalisées dans le cadre de ce travail de conception.

Fait à Mons, le 20 Février 2017

Signature



Annexe 4: Version N°1 de la grille d'observation (Groupe M1 le 15/02/16)

G. Tules toulous

Observation_Groupe N° le 15/02/2016 PHASE:

Séquence	Observation	Sujet abordé	Support utilisé	Actions
1)	• Contraintes			
2)	• Les étudiants réfléchissent à comment peindre la mapette	Atelier des Arches	Maquette physique	Expliciter cela le avec le groupe
3)	• Réflexion de la stratégie de modélisation	Modèles des Toiles	Graphique	→ Travaux de paramétrisation des Arches → Modélisation sur Graphique
4)	• Réviser si liaz pour les triangles → le groupe se rassemble - c'est bien	Lien entre les sommets du triangle		
5)	• Réflexion sur le maillage			
6)	• Analogie			

Annexe 5: Version N°2 de la grille d'observation (Groupe M1 le 16/02/16)

Grille d'observation « état d'avancement »_ Le 19/02/2016 à 10 h 36

Notes sur la conversation (GROUPE)

Activité de l'étudiant	Activité du professeur	Sujet					MAT	Mod	ASS	FORM	FAB	CONS	Aut
L'étudiant reformule ce qu'il a dit : "on a rien à faire ici il faut qu'on aille à l'école" I dit des observations "vagues" "On ne peut pas descendre trop bas sinon on étouffe le gaz" "Comment la maison se dirige-t-elle ?" "Si on est en ascension à chaque fois on s'élève" L'étudiant explique ce qu'il remarque Comment on va s'élever ? Comment on va monter ? le lycée	La prof (information) explique le fonctionnement du module : Système de glissière ... Il s'agit d'un système ! Amorceur métallique avec les câbles propulsés" On fait un rail, une poutre et une corde." Analogie avec une série circulaire pour le fonctionnement." C'est le système comme on voit de l'extérieur" Quand le bus se déplace avec" Comment on le bloque ? Il faut savoir comment on va la monter" "il nous faut un système à plusieurs ascenseurs" "Pis on descend il en faut 8" L'ascension → on va être limité pour la hauteur → Ascension avec un autre ascenseur pas facile. "On regarde le plan de la chapelle pour identifier les dimensions"												
										X			
										X			
												X	
												X	
													X

Annexe 6: Version n°3 de la grille d'observation (Groupe M4, le 21/02/2017)

OBSERVATION GROUPE Labo Le 21/02/2017 à h

et 21/02/2017

Activités/Observations

H

Sujet abordé

Outil utilisé

F F A C F M M
O A S O O A
R B S N D T
M E S C E L

G P M M R
H E A A E
/ N K C F
A₀ E H
T I

16.11 Après le test, les étudiants observent la préparation de la fabrication sur autoclave.

21/02/17 → Les étudiants place la découpe de motif et sur autoclave pour braver le motif
fonctionnement de l'autoclave. @ sur 6H pour braver la grande

10H15 → Découpe du 6e et 7e Prototype. → Présence de découpe insuffisante

10H30 → Test de la découpe n'a pas été assez profond pour pouvoir tester → on renouvelle

→ Test 8 et 9 → Même problème → découpe ne traverse pas -
(quel pb? machine? bois?)

11H05 → Les étudiants essayent d'ajuster son motif pour améliorer de la découpe dans 6H avec
l'ajout de soudure car ils ne peuvent pas le faire sur autoclave

Test d'un motif (Prototype 10) → Très net → impressionnant

Test d'un Prototype (11) → Plus nette mais simple

11H30 → Test d'un élément tout entier après découpe → Prototype 12 → Pas tout dans les
bois mais marqué

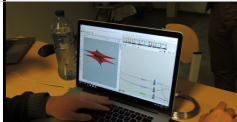
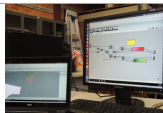
→ On est limité par la taille de la machine pour le prototype à l'échelle 1:1. Motif
→ les machines jouent vraiment dans cette technique

→ Les étudiants ne sont capables qu'on peut améliorer le plateau par gravitation
Totalement et celle par son brage

17H15

Annexe 7: Grille de transcription du groupe M1

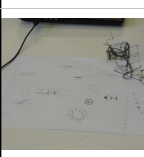
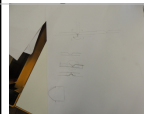
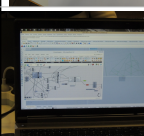
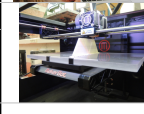
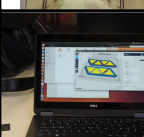
GRILLE D'ANALYSE _GROUPE M1																	[Tensions acoustiques]																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
3 étudiants montois + 2 étudiant liégeois [E1, E2, E3, E4, E5] + 2 enseignants [P1,P2] + 1 Informaticien [I]_ FacArchi/FabLab																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
DATE	MO ME NT	HO T SP OT	QUI?	QUOI?	ILLUSTRATION	SUJETS ABORDÉS										OUTILS UTILISÉS																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
						F O M E	F O R M E	C A R T E	C A R T E	F O R M E	M A T I È R E	M A T I È R E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E	C A R T E

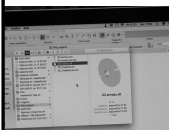
GRILLE D'ANALYSE _GROUPE M1										[Tensions acoustiques]									
3 étudiants montois + 2 étudiant liégeois [E1, E2, E3, E4, E5] + 2 enseignants [P1,P2] + 1 Informaticien [I]_ FacArchi/FabLab																			
DATE	MO ME NT	HO T SP OT	QUI?	QUOI?	ILLUSTRATION	SUJETS ABORDÉS					OUTILS UTILISÉS								
						F O R M	C A S E M B	F M S O O A N D T E L	M A C H I N E	C O U R T	MAK NUM	MACH INE	M A K E F N	R E P R O D U C T I O N					
	32		E4	Remise en question du système de poulie . L'étudiant fait un schéma de crochet pour prouver qu'ils en ont pas besoin.			x	x		x									x
	33			3 étudiants réfléchissent encore sur le mécanisme par des croquis . Un étudiant demande « comment tu fais passer ton anneau dans la poulie »?			x	x		x									x
	34			Les étudiants testent la résistance de l' élastane .					x							x			x
	35		E1+E2	2 étudiants travaillent sur la modélisation sur Grasshopper					x					x					
	36		E3+E4	Finalement la réflexion sur le mécanisme aboutit à 2 solutions: une simple et pas chère. L'autre plus complexe.			x	x											x
	37		E3+E4	La réflexion sur le mécanisme et la pose de la structure se poursuit. L'explication se fait par les schémas .			x	x		x									x
21/02/2017	38		E1+E2 +E4 +P1	Les 3 étudiants travaillent sur le modèle GH qui ne rends pas la forme souhaitée. L'enseignant leur propose de changer le type de « loft » puis finalement d'adopter une autre stratégie de modélisation.			x		x					x					x
	39		I	L'informaticien travaille en parallèle sur le modèle , il ajoute un plug-in permettant de visualiser les zones très tendues ou moins tendues . Le but étant d'avoir de la tension partout pour que la forme soit visuellement acceptable. Ce plug-in fonctionne en calculant la taille des mailles par rapport à la taille d'origine.			x		x	x				x					x
	40		E3+E4	Testent le découpage du tissu en élastane (cf.photo). Ils découpent un rectangle qu'ils tendent aux 4 pieds d'une chaise. L' assemblage est réalisé par des oeillets.			x	x		x							x		
	41			Réalisation de 4 prototypes sur des tabourets retournés. « notre projet se voit tout aussi bien en maquette physique que sur Grasshopper mais GH nous permet de chiffrer . »			x		x								x		x
	42		E1	Coud le tissu d'une prochaine maquette			x										x		
	43		E2	Travaille le modèle GH					x						x				
	44		Tous	Les étudiants se mettent d'accord sur le type de rendu qu'ils souhaitent, et quel logiciel ils vont utiliser.			x												x
45		I	Tous +P2	Réunion autour des prototypes . L'enseignant les met en garde sur la tension que cela va représenter à l' échelle 1:1				x	x	x							x		x
46			E4	Travail sur le modèle GH pour trouver la forme la plus intéressante esthétiquement (form finding)			x			x					x				x
22/02/2017	47		E2	Travaille sur GH pour adapter leur modèle aux dimensions de la chapelle.				x	x					x					
	48		E5	Travaille sur les schémas de représentation. Les autres étudiants sont en train d'acheter le matériel.			x												
	49		E3+E4	Préparent une maquette qui correspond mieux aux proportions de la chapelle en utilisant deux tabourets retournés. Se demande quelle forme prendre au départ, rectangle ou carré?				x										x	
	50		E1	Test de couture dans l'élastane avec une machine à coudre. Marche partiellement mais un peu trop élastique.				x	x									x	
	51		E2+E3	Mise en place de la toile sur les tabourets. Discussion sur le forme, « le trou est fort ovale » Ils ne sont pas satisfait de la forme trop rectangle, et propose de détacher les toiles du mur par des câbles tendus. (cf.schémas)				x	x									x	
	52		E4	Incorporation du modèle Grasshopper dans archicad , début de la phase de rendu. (ch.photo)						x								x	
	53		Tous	Début du montage de la maquette de site découpée auparavant en découpe laser				x											x
	54		I	E4	Décomposition de la forme sur grasshopper pour pouvoir la réaliser à l' échelle 1:1 (cf.photo)				x	x									

GRILLE D'ANALYSE_GROUPE M1											[Tensions acoustiques]							
3 étudiants montois + 2 étudiant liégeois [E1, E2, E3, E4, E5] + 2 enseignants [P1,P2] + 1 Informaticien [I]_ FacArchi/FabLab																		
DATE	MO ME NT	HO T SP OT	QUI?	QUOI?	ILLUSTRATION	SUJETS ABORDÉS					OUTILS UTILISÉS							
						F O R M	F A B	C A S E	M M S E	M M D T L	C O R	MAK NUM	MACH INE	M A K E R E F N	O + G			
												A A U R O H I	S R B K H L P I E G N D	I D A M L U T Y R				
23/02/2017	55		E3+E4	Discutent sur la préparation des patrons pour couper les toiles définitives		x										x	x	
	56		E5	Travaille sur Lumion pour générer des images de rendu.		x												
	57		E1	Maquette de site terminée		x	x									x		
	58		E3+E4	Découpent les patrons pour réaliser une maquette à plus grande échelle qui sera tendue sur une table retournée.(cf.photo)		x										x		
	59		E3	La maquette de site est perforée à l'aide d'une perceuse pour fixer et tendre les toiles. « on ne fera pas comme ça dans la réalité évidemment c'est juste pour la maquette »		x	x	x								x	x	
	60		E3+E4	La toile blanche est tendue entre les pieds de la table (cf.photo)		x										x		
61			E3+E4	Placement d'une toile dans la maquette finale		x	x									x		
24/02/2017	62		E1+E2 +E3	La maquette finale se termine progressivement. Les deux toiles restantes sont placées.		x										x	x	
	63		E1+E2 +E3	Maquette terminée		x										x	x	
Fin du workshop																		

Annexe 8: Grille de transcription du groupe M2

GRILLE D'ANALYSE __ GROUPE M2										[Cocon]									
3 étudiants montois + 1 étudiant liégeois [E1, E2, E3, E4] + 2 enseignants [P1,P2] + 1 Informaticien [I]_ FacArchi/FabLab																			
DATE	MOMENT	HOTSPOT	QUI ?	QUOI?	ILLUSTRATION	SUJETS ABORDÉS					OUTILS UTILISÉS								
						FORM	OBS	CASEMB	FMODEL	CRO	MAK NUM			MACHINE	MAKPHY	REFN			
											AURCHOI	SRHLP3D	BLM						
15/02/2017	1		Tous	Le concept est l'origami. Une première maquette est réalisée avec des feuilles de papiers pliées . Un premier prototype est réalisé par des languettes de bois associées à un textile et du fil de fer. (cf.photo) Une maquette en carton mousse a été créé pour tester un assemblage . L'articulation entre les facettes est réalisée par des anneaux de fil de fer, mais les étudiants ont un problème d' articulation entre les facettes . Ils pensent qu'ils vont devoir réaliser des biseaux pour que le mouvement puisse se faire .		X		X	X										
	2		E1+ E2+ E3	« D'habitude on ne va pas directement dans ces détails d' assemblages , car il n'y a pas de concrétisation à la fin. ici c'est ça qui est bien dans ce projet car on y est contraint . » « On doit faire simple pour que ça coute le moins cher. Dans les autres projets d'archi, le budget n'est jamais pris en compte, on est trop libre . »			X	X											
	3		tous	Un autre type d' articulation est réalisé, par un système en créneaux reliés par une tige de fer / aiguille de couture mais le résultat n'est pas concluant. (Cf.photo)					X							X			
	4		E2	La forme est découpée en papier . « on devra tout de même faire une petite entaille dans le papier si on veut que ça se plie ». Les étudiants sont satisfaits de la forme . « c'est beau la forme en triangle »		X		X								X			
	5	!	E1	L' échelle trop petite de la maquette pose problème pour la réalisation « d'entailles à la main ».				X								X			
	6		E3	Propose de donner une forme bombée aux facettes en triangle par un traçage à la découpe laser en montrant une référence . L'autre étudiante, pas convaincue, demande à quoi ça servirait. Réponse: « pour donner un autre esthétique. » Mais pas de suite à cette proposition.		X	X	X								X	X		
	7		E1+ E2+ E3	Les étudiants regardent des références de formes en origami « triangle » sur internet. (cf.photo)		X											X		
16/02/2017	8		E4	L'étudiant liégeois entame la conversation sur le modèle Grasshopper . Il explique qu'il a commencé à chercher une manière de simuler les différentes formes possibles. L'étudiant propose de partir d'une forme de base à plat puis simuler la déformation dans GH		X				X			X						
	9		E3	Côté montois, l'étudiant E3, explique une référence d'un modèle Grasshopper qu'il a trouvé sur internet.						X								X	
	10		P2	Les enseignants leur proposent d'utiliser le modèle de base fournit en changeant les angles des arêtes. L'autre solution est de ne pas partir d'un modèle rectangulaire.						X			X						
	11	!	P2	L'enseignant leur demande de réfléchir à la faisabilité , à un prototypage , à un type d'assemblage pour l' articulation des facettes. Il faut trouver un système simple qui puisse être découpé et assemblé . « on devrait pouvoir transposer l'articulation à l'échelle 1:1 »		X	X	X											
	12		E3	L'étudiant explique qu'ils ont déjà réalisé quelques prototypes au 1:50. Il parle du matériau qu'il envisage, à savoir une plaque de plexiglass .		X				X									
	13	!	P	« Il faudrait pouvoir les découper pour être efficace et rationnel » « dans la vraie vie les éléments découpés doivent contenir tous les éléments nécessaires à l'assemblage »		X	X	X											
	14		E1	L'étudiante justifie le choix du système d'articulation par anneaux en expliquant qu'il permet d'avoir un entre-axe et du jeu permettant le mouvement.			X	X											
	15		E3	On a pas de problème de frottements entre les plaques avec ce système.			X	X											
	16	!	P2	Rappelle une idée évoquée par le professeur qui est un système de feuille située entre les plaques et contraindre l'angle maximal par un système de biseaux. Le seul problème avec cette technique c'est que pour réaliser ce chanfrein « ça va être un peu compliqué ». « C'est une valeur angulaire très précise, et on est pas sur d'avoir les moyens de le faire avec les machines à disposition » Si il y a une CNC à disposition c'est facilement réalisable . Il faudrait tester Lundi sur des morceaux à petite échelle.		X		X											
	17	!	P1	L'enseignant résume les deux solutions en deux schémas qu'il montre au groupe. Mais il est moins convaincu par le système en anneaux. Il propose une 3ème solution basée sur un système de charnière . Il y a donc plusieurs pistes et il faut « checker » et les valider . « tu peux même imprimer les anneaux rapidement »		X		X		X									
18		E2	« Il faut voir en 3D comment on va mettre les anneaux dans les plaques »		X		X												
19		P2	Avec le système d'anneaux, l'enseignant soulève la question du nombre d'anneaux qu'il va falloir faire. Si on imagine qu'il faut placer 200 anneaux, dans la réalité c'est lourd. Il faut bien réfléchir à choisir un système simple. Préférer une solution « facile à mettre en oeuvre » .			X	X												
20		E2	L'étudiant se met à faire une nouvelle maquette en carton mousse à l'aide d'un scalpel .		X		X									X			
20/02/2017	21		E1+ E2+ E3	Une nouvelle maquette est terminée, et l'assemblage a été réalisé avec une nappe textile noire . (cf.photo). On s'est rendu compte que les anneaux posaient des problèmes d'articulation. On compte utiliser une bache type « Ferrari » dans la réalité.		X	X	X								X			
	22			Il faut qu'on réalise un biseau de 60° sur les facettes. On se demande comment on va le faire.			X	X											
	23			Discussion sur la toile apparente ou non, sur la couleur de la toile pour l' esthétique . La toile sera aussi pratique pour retenir la poussière .		X			X										
	24	E2		Continu la maquette en y ajoutant une tige de métallique et des fils attachés à chaque facette pour pouvoir l'accrocher et voir la forme générale finale. Puis répète l'opération pour les deux autres structures.		X	X	X								X			
	25	E4		Modélisation sur GH. On par d'une grille de triangle, puis on en sélectionne aléatoirement avec Grasshopper .						X				X					

GRILLE D'ANALYSE _ GROUPE M2											[Cocon]														
3 étudiants montois + 1 étudiant liégeois [E1, E2, E3, E4] + 2 enseignants [P1,P2] + 1 Informaticien [I]_ FacArchi/FabLab																									
DATE	MO ME NT	H O T S P O T	QUI ?	QUOI?	ILLUSTRATION	SUJETS ABORDÉS					OUTILS UTILISÉS														
						F O R M	F O A B M	C A S O S E M B	F O S E C E L	M M O A T O	C R O	MAK NUM					MACHI NE					M A K E R B O T	R E F I N	O + G	
												A U T O C A D I	S K E T C H U P	R E L I E F I N G	B L E N D I N G	I M P 3 D	D I L U T R	A U T O C A D I	S K E T C H U P	R E L I E F I N G	B L E N D I N G				
	26		P1+ E3	Parle d'une technique de modélisation pour parvenir à modéliser ce que l'on souhaite. L'enseignant propose de récupérer les sommets dans GH et d'y ajouter un déplacement en Z. L'intérêt est ensuite d'utiliser Kangourou qui va vous permettre de découvrir les choses et de simuler ce que peut se passer dans la réalité.						X					X										
31/02/201	27		E1+ E2	Deux étudiants réfléchissent au système dynamique. Ils se demandent comment réaliser un système qui permette que chaque triangle puisse bouger indépendamment. Ils évoquent alors un système de rails .		X			X	X															X
	28		E4	Modélisation sur GH / Intégration de la gravité						X				X											
	29		E1	L'étudiant rappelle une priorité: celle de valider l'assemblage réalisé par la matière textile. « Il faut vérifier que l'on puisse bien articuler les panneaux entre eux ». La seconde priorité est de définir la forme finale de chaque structure pour chaque travée de la chapelle. On se demande quel espace mettre entre les facettes?		X			X	X														X	
	30		E1	Parlent des matériaux. Ils pensent utiliser du polycarbonate opaque, transparent. « On a vu qu'il y avait toutes les couleurs possibles, donc on envisage de faire un patchwork de couleurs.		X					X														X
	31		Tous	On réfléchit à comment assembler et mettre en oeuvre la structure dans la chapelle. « il faut tout penser d'un coup par rapport à d'habitude »				X	X																X
	32		Tous	On réfléchit une nouvelle fois à comment réaliser le biseau ? Avec quelle machine ? A la découpe Laser c'est pas possible de le faire car il n'y a pas d'angle d'inclinaison.				X	X																X
	33		E4	L'étudiant travaille en parallèle sur la modélisation paramétrique . Il peut tester le comportement de la matière avec l'élément Kangourou .							X	X			X										
	34		E1	L'enseignant demande comment le mécanisme permettant de changer de position, fonctionne. Les étudiants expliquent qu'ils ont pensé au système utilisé dans le parapluie (cf.croquis). Ici, ils pensaient utiliser une tige filetée reliée à des câbles. Les enseignants leur propose de créer une pièce imprimée en 3D qui puisse se mettre autour de la tige filetée. D'autre part, ils proposent d'imprimer chaque facette biseautée . Par contre cette technique n'est pas transposable à l'échelle 1:1 car il faudrait plutôt utiliser une fraiseuse. L'impression 3D nous limite aux petites échelles .			X	X		X															X
	35		P1+ E2	L'enseignant explique comment modéliser une facette en biseau sur grasshopper : Faire un décalage (offset) + Diminuer l'échelle (scale) + Relier les faces (loft) Mais finalement E2 commence la modélisation des facettes sur sketchup en modélisant les biseaux. Un croquis montrant le fonctionnement des biseaux est dessiné.							X	X		X	X										X
	36		E4+I	Travaille en parallèle les formes finales sur Grasshopper et mise en place de Kangourou						X				X											
	37		E1+ E3	Préparent la maquette de site sur Autocad avant d'utiliser la découpe laser			X						X					X							
	38		E2	L'étudiant continue la maquette de site (découpe laser + assemblage)			X				X		X					X	X						
	39		E1+ E3+ E4	Préparent impressions 3D de deux facettes biseautées modélisées la veille sur Sketchup . Ces deux facettes sont ensuite imprimées sur la Makerbot . On discute sur le décollage de la matière une fois l'impression terminée.			X			X				X		X									
	40		P1	Lancement de l' impression 3D (durée de l'impression 1h15)			X									X									
	41		P1	Lancement de la seconde impression 3D			X									X									
22/02/201	42		P1+ E2+ E3	Discussion sur le système de tige filetée, les étudiants pensent que ça ne marchera pas. Les enseignants leur propose de faire un essai pour tester .				X	X															X	
	43		E4	L'étudiant estime que le modèle GH est terminé. Il simule le mouvement et la forme finale.		X			X	X					X									X	
	44		E3	Travaille sur la modélisation (sketchup) de la pièce qui permettra de réaliser le mouvement le long de la tige filetée.						X				X											
	45		E1+ E2	La maquette de site est terminée Les 3 modèles réalisés à la main sont terminés, on les place dans la chapelle. Le résultat est peu convaincant . « c'est moins propre que l'impression 3D ». On se rend compte que la taille des structure est ridicule par rapport à la chapelle et décident donc d'augmenter la taille des structures			X	X												X					
	46		E3	Prépare l' impression 3D des autres facettes sur Ultimaker/Sketchup			X				X			X		X									
47		E1+ E2	Polissent les facettes déjà imprimées			X														X					

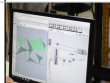
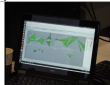
GRILLE D'ANALYSE __GROUPE M2										[Cocon]										
3 étudiants montois + 1 étudiant liégeois [E1, E2, E3, E4] + 2 enseignants [P1,P2] + 1 Informaticien [I]_ FacArchi/FabLab																				
DATE	MO ME NT	H O T S P O T	QUI ?	QUOI?	ILLUSTRATION	SUJETS ABORDÉS					OUTILS UTILISÉS									
						F O R M	F A B	C O N S	C A S E M B	F O N C E L	M M O A T	C R O	MAK NUM			MACH NE	M A K P H Y	R E F N	O + G	
													A U T O H I	A R K I C P	B H I E N G H D					I M P 3 D
13/02/201	48		P1	Les facettes sont lancées en impression 3D		X										X		X		
	49		E1+ E2	Réalisent la maquette finale à la main et en carton mousse . Les facettes de l'impressions 3D prennent trop de temps. Les facettes imprimées en 3D serviront à expliquer le fonctionnement du système sur une seule structure et non les 3. Légère déception de ne pas pouvoir tout faire en impression 3D car le résultat est plus « précis et plus propre »		X														
	50		E3	Réalise les vues 3D sur artlantis												X				
	51		E3	Préparation du modèle 3D pour intégrer l'écrou. (cf.photo).							X			X		X				
	52		E1+ E2	Test du premier élément terminé dans la chapelle. Satisfaction. Les deux étudiants se remettent à la finalisation des autres structures à la main.		X	X											X		X
	53		E3	4 faces sont imprimées		X											X			
	54		E1+ E2	Finalisation de la maquette finale par le perçage du carton mousse pour symboliser la fonctionnalité acoustique.		X					X							X		
14/02/201	55		E2	Début de l'assemblage de la maquette servant à montrer le fonctionnement du système. Les faces imprimées en 3D sont assemblées entre elles par un film collant de type nylon.		X												X		
	56		E1+ E3	Travail sur les rendus visuels et PPT en parallèle												X				
	57		E1+ E2	Assemblage de la nappe de triangle avec le mécanisme (tige filetée+câbles)			X											X		
	58		Tous	Maquette terminée		X					X							X		
Fin du workshop																				

Annexe 9: Grille de transcription du groupe M3

GRILLE D'ANALYSE __ GROUPE M3														[Ailes de Bélian]														
Présence des 4 étudiants montois + 1 étudiant liégeois [E1, E2, E3, E4] + 2 enseignants [P1,P2] + 1 Informaticien [I]_ FacArchi/FabLab																												
DATE	MO MEN T	HOT SPOT	QUI ?	QUOI?	ILLUSTRATION	SUJETS ABORDÉS										OUTILS UTILISÉS												
						F O R M	F A B	C O N S	A O N S E M B	F O N C	M O D E L	M A T	C R O	MAK NUM					MACHIN E					M A K P H Y	R E F	R E F N	O + G	
														A U T O	A R C H I	S K P	R H I G H	B L E N D	I M P 3 D	D L U T R								
15/02/2017			E1+ E2+ E3	Présentation du concept et des intentions. Les étudiants présentent leur projet à l'aide d'une maquette réalisée les premiers jours du projet. Discussion de la construction et de la mise en place dans la chapelle. Discussion aussi de la forme « j'aime bien les triangles ». « On fait le modèle au sol et on le monte grâce à des rails verticales le long des colonnes de la chapelle »		x		x															x			x		
			E1+ E2+ E3	Regardent une référence.		x																		x				
			E1+ E2+ E3	Si les triangles se superposent? Ils seront indépendant dans Grasshopper? « Imaginons qu'on met les toiles à plat, et qu'on les soulèvent, il doit en avoir qui se chevauchent »				x		x	x															x		
			E1+ E2+ E3	Regarde la référence et l' algorithme utilisé pour y parvenir.							x														x	x		
			E1+ E2+ E3	Discussion autour de la maquette sur la méthode de modélisation sur GH. A mon avis il faut d'abord définir la méthode: d'abord dessiner les triangles, puis savoir quel point s'associe avec quel point » « Les endroits où ça donne bien dans la maquette c'est quand ça se mélange un peu » « Oui c'est vrai, il faudrait garder se principe là » « Au final on a fait la forme de la maquette un peu au hasard mais ça rend bien »		x					x												x			x		
			E1+ E2+ E3	Aborde la fonctionnalité . « il faut que ça casse le son mais il ne faut pas que ça gêne la personne qui est assise sur le banc. » Les étudiants parlent des différents scénarios possibles de fonctionnement de la chapelle et des possibilités possible pour améliorer l'acoustique selon chaque situation. « Si on fait des travaux de groupe on pourra baisser la toile ici... »							x															x		
			E3	« On a les hauteurs de la chapelle ou pas? »				x		x																	x	
			E2	« Notre référence principale c'était ça » (cf.photo)		x																			x			
			E1	Dessine des croquis (cf.croquis)									x															
			E3	Propose de définir les points d'accroche. Il y a les points d'accroches sur le murs et sur la clé de voute mais aussi entre les toiles. Et ceux-là vont permettre de créer l'interdépendance entre les toiles			x	x			x													x			x	
			E1	C'est cette interdépendance qui va être difficile dans le modèle , car si tout est lié ça va alourdir le calcul de la machine. Si je bouge une seule partie de la toile , tout le modèle va bouger ». Il va falloir gérer cette complexité							x	x												x			x	
			E1+ E2+ E3+ P	Arrivé de l'enseignant. Explication de l'avancement et des questions que les étudiants se posent.							x	x															x	
			P1	« Abordez la complexité progressivement. Commencez par modéliser quelques voiles 2 ou 3 et essayer de tester le comportement grâce à quelques sliders » Il pose la question de la matérialisation: matériaux prévus?								x	x														x	
			E1+ E2+ E3	Regardent les photos de la chapelle , et se rendent compte que le point le plus haut est beaucoup plus haut que celui prévu dans la maquette. « ça va être encore plus déformé , donc ça sera encore mieux »		x																			x			
			E1	Notre projet va être fort aéré , alors que le but 1er est la performance acoustique , mais on peut faire plus de modules »		x					x														x			x
			E1+ E2	Réfléchissent à comment ils pourraient commencer le modele Grasshopper								x															x	
			E1+ E3	Recherche sur le matériau utilisé, et le prix									x												x			
			E2	Travaille en parallèle sur la modélisation des premières triangles								x							x									
			E1	« De manière extrême on peut régler le problème acoustique en utilisant des tapis qui recouvrent tout le sol et tout le plafond. On peut aussi utiliser du bois qui fait rebondir les ondes mais ça ne donnera pas ça. »		x					x		x														x	
			E1 + E3	« On ne peut pas imprimer des surfaces courbes en 3D? » Si mais avec des échafaudages. Le problèmes c'est qu'on ne peut plus bouger les toiles, ce n'est plus modulable. »			x				x																x	
			E2 + E3	Répond « ou alors en découpe laser mais il faut voir si cette matière on peut la découper. Mais ça va prendre feu.. ou alors on fait juste les patrons en découpe laser ».			x					x															x	
			E1 + E3	« t'imagines le nombre de patrons qu'il faudrait? » « justement on en fait qu'un et la matière élastique nous permet d'avoir de la liberté sur la forme ensuite »			x	x					x														x	
			E1+ E2	Cherchent une méthode pour modéliser leur forme sur GH								x														x		
			E1	Commente le modèle générique fournit par l'informaticien. « Les triangles ont été fait sur rhino donc ils ne sont pas paramétrables »								x								x							x	
			E3	Recherche de matériaux									x												x			

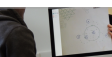
GRILLE D'ANALYSE __ GROUPE M3											[Ailes de Bélian]											
Présence des 4 étudiants montois + 1 étudiant liégeois [E1, E2, E3, E4] + 2 enseignants [P1,P2] + 1 Informaticien [I]_ FacArchi/FabLab																						
DATE	MOMENT	HOTS SPOT	QUI ?	QUOI?	ILLUSTRATION	SUJETS ABORDÉS						OUTILS UTILISÉS										
						FORM	FAB	CONS	ASSEMB	FONC	MODEL	MAT	CRO	MAK NUM				MACHINE		MAKPHY	REFN	O+G
														AUTO	ARCH	SKPH	RHLEND	IMP3D	DULTR			
			Tous	Comment faire un triangle ? Discutent sur comment modéliser , quelle méthode?						x						x						
			E1+ E2+ E3	J'ai réussi à faire un losange, je vais bien réussir à faire un triangle. Pour le losange j'ai pris l'outil « 4 points surfaces » mais il n'y a pas « 3 points surfaces » « j'ai fait 3 points, je les ai relié. » Je vais essayer de faire une polygone »							x					x					x	
			E1+ E2	« J'ai réussi à faire des triangles mais je ne sais pas comment le remplir »							x					x					x	
			E2	A terminé deux triangles paramétrables complètement. Utilisation de loft entre deux lignes							x					x					x	
16/02/2012			Tous	Les étudiants commencent par présenter le concept en modules triangulaires et de l'utilisation de kangourou		x					x							x			x	
				Ils parlent du principe constructif en utilisant des rails le long des colonnes pour développer la forme.					x												x	
			E2+I	Parle de la modélisation sur GH avec l'informaticien. « Au lieu d'avoir un trait sur rhino j'ai préféré paramètre chaque point »							x						x				x	
			I	L'informaticien informe que dans le modèle rhino on peut déplacer les points et tester certaines formes.							x										x	
				Les étudiants expliquent qu'il souhaitent que les toiles soient toujours tendues. L'enseignant leur explique que le modèle GH permet de simuler ça, et de voir jusqu'où on peut bouger les toiles.		x					x										x	
			I	L'informaticien propose de « baker » une première forme puis de la réinsérer dans le modèle GH. On aura alors des triangles déjà déformés dans le modèle . Vous pouvez implémenter une élasticité de 1, ce qui vous permettra de voir des froissements dans la matières s'il y a des endroits non tendus		x					x										x	
			P2	L'enseignant montre le matériau élastane.								x							x			x
			I	Le coté patron pour la fabrication m'inquiète moins car on commence à savoir le faire.			x															x
			I	L'informaticien propose l'outil grasshopper « point on curve ». « Si vous déplacer vos points uniquement verticalement sur les colonnes votre matière ne dépassera jamais le plafond ».							x							x				x
			E1	« Dans tous les cas on voulait que les toiles puisse atteindre le haut des voutes »		x		x														x
			P2	Assemblage de construction?				x	x													x
			E1	Propose deux solutions, soit avec des oeilletons que l'on vient accrocher. Soit avec un système de câbles.				x	x													x
			E3	L'étudiante montre des exemples de réalisations en toiles (cf.photos)					x	x										x		x
			E3	Référence de crémaillère pour le glissement, câbles en fibre de verre.				x	x											x		x
			E3	Aborde le matériaux utilisé dans la référence « festival pukkelpop 2014 » qui ressemble beaucoup à l'élasthane proposé par l'enseignant.								x								x		x
			P1	L'enseignant demande, « ça se découpe comment le l'élasthane ? » Les autres enseignants répondent au ciseaux en blaguant. Référence à projet découpé tout à la main, qui a pris beaucoup de temps car pas d'approche numérique.			x	x														x
			P2	Ici on pourra imprimer les patrons sur un traceur .			x															x
			P1	Cherchent une technique pour découper un tissu à la découpeuse laser . Mais problème car le tissu bouge beaucoup.			x															x
			I	Propose une idée, celle de découper le tissu entre deux plaques de verre.			x															x
			P2	Conseil les étudiants d'utiliser le modèle numérique pour valider les formes.								x										x
			E1	« Les arches sont maintenant modélisé sur GH , mais de façon aléatoire, il faut maintenant amener le plan réel de la chapelle dans rhino pour positionner les points aux bonnes coordonnées. Ensuite on souhaite intégrer les toiles tendus aux points d'ancrages de la chapelle ». (cf.photos)							x						x					
				« L'objectif est d'avancer dans le modèle Grasshopper pour pouvoir tester les scénarios possibles et voir si la forme de chaque toile est bonne. »								x										
				« L'assemblage n'est pas encore définit. On pense à des oeillet ou bien au cuire »						x											x	
				Un premier assemblage de 2 toiles a été réalisé avec de l'élasthane et des du fil. Les étudiants testent le matériaux en tirant dessus.						x									x			
			E5	Regarde des références de projets en toile tendue		x															x	
			E4+ P	Travail sur le modèle GH commencé pour modéliser les arches								x										
			E1+ E5	Comment fabriquer leur toiles? Font référence à la découpe laser . Mais il faut d'abord avancer le modèle pour pouvoir ensuite poser les toiles à plat et connaître les dimensions exactes .			x					x										
			E1	travaille sur GH								x										

GRILLE D'ANALYSE __ GROUPE M3											[Ailes de Bélian]																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Présence des 4 étudiants montois + 1 étudiant liégeois [E1, E2, E3, E4] + 2 enseignants [P1,P2] + 1 Informaticien [I]_ FacArchi/FabLab																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
DATE	MO MEN T	H O T S P O T	QUI ?	QUOI?	ILLUSTRATION	SUJETS ABORDÉS					OUTILS UTILISÉS																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
						F O R M	F A B	C O N S	A S S E M B	F O N C	M O D E L	C R O	MAK NUM				MACHIN E		M A K P H Y	R E F	O + G																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
													A U T O	A R C H	S K P	R H G H	B L E N D	I M P 3 D				D L A U T R																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
16/02/2011			E1+ E4+ E5	Travaillent tous sur le modele GH						x						x																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		

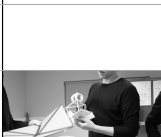
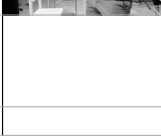
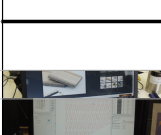
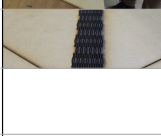
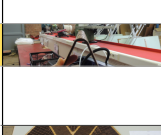
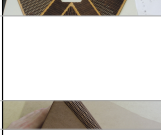
GRILLE D'ANALYSE __ GROUPE M3											[Ailes de Bélian]																
Présence des 4 étudiants montois + 1 étudiant liégeois [E1, E2, E3, E4] + 2 enseignants [P1,P2] + 1 Informaticien [I]_ FacArchi/FabLab																											
DATE	MO MEN T	H O T S P O T	QUI ?	QUOI?	ILLUSTRATION	SUJETS ABORDÉS							OUTILS UTILISÉS														
						F O R M	F A B	C O N S	A S S E M B	F O N C	M O D E L	M A T	C R O	MAK NUM				MACHIN E			M A K P H Y	R E F	R E F	O +			
														A U T O	A R C H	S K P	R H I G H	B L E N D	I M P 3 D	D L A U T R							
11/02/2011			E1+ E5	Reprennent leur travail sur Grasshopper							x				x												
			E1+I	E1 Explique le problème qu'il a au niveau d'une arrête qui reste accrochée. Les triangles sont bien modélisés mais certaines arrêtes de ceux-ci sont jointifs alors qu'elles ne le devraient pas. Ils travaillent sur le modèle pour corriger ça.							x				x											x	
			E4	Un autre étudiant modélise la chapelle sur sketchup pour préparer le rendu final et l'intégration des modèles grasshopper							x				x											x	
	I		E1+ E5	Fusionne leur modèles Grasshopper. Les toiles sont intégrés à la chapelle							x				x											x	
			E4	L'étudiant continue la modélisation sur sketchup de la chapelle							x				x											x	
			E1+ E5	La fusion fonctionne bien dans Grasshopper. « Il y a juste notre problème des deux triangles qui se joignent »							x				x											x	
			E1+ E5	Cherchent une solution pour déjoindre sur GH							x				x												
			E1+ E5+ P1	E1 explique le problème au professeur.							x				x											x	
			E5+ P1	Une fois qu'on aura les bonne forme dans l'espace, on pourra les remettre à plat pour les découper			x	x																		x	
			P1	Leur propose de chercher des référence d'algorithme permettant d'aplatir des formes sur Grasshopper. Il propose une composant dans Grasshopper.							x																
			E1+ E4+ E2	Recherchent de la forme souhaité sur Grasshopper en se référant à la 1ere maquette. Teste de différentes formes																					x		
			P2	Explique qu'en augmentant l'échelle, les tensions vont augmenter de manière exponentielle et non proportionnelle.				x																		x	
			E1+ E2+ E5+I	L'informaticien apporte une solution à leur problème.							x					x											
	I		I	Explique qu'il peuvent décomposer chaque toile en mailles/ bandes mais que cela représentera beaucoup d'éléments. On peut augmenter la maille pour avoir moins de bande mais la forme sera moins continue. Pour modifier la maille il suffit de changer un chiffre.							x					x									x		
			E5	"On ne sait pas sortir les arc »? « Les arcs? il n'y a pas d'arcs, on est en mailles. » « Pour aplatir il y a un outil c'est « unroll ». Si on sait aplatir c'est bon »							x					x									x		
		E1+ E4	E1 Travaille sur le modèle GH et E5 travaille sur le modèle sketchup								x				x	x											
		Tous	Regardent des références de toiles tendues			x																					
		E1+ E5	Regarde la perspective du modèle et ajoutent une toile à leur modèle								x					x											
		E2+ E3	Regarde une référence de toile tendue			x																x			x		
		E1+ E5	Regarde la perspective du modèle et font bouger les points en faisant varier la forme;			x										x											
		I	L'informaticien leur propose de vérifier les élasticités					x								x											
		E1+ E5+I	« ça c'est la position la plus haute de laquelle on partira pour descendre les points. Mais dans ce modèle-ci on a enlevé le moteur, mais on va le remettre juste pour tester »								x					x											
		I +E1 +E5	L'informaticien prend la main sur le modèle Grasshopper. Il définit les points d'ancrage qui sont les clés de voute.								x					x											
		I +E1 +E5	L'informaticien déplace les points dans des positions extrêmes et évalue la tension dans les toiles								x					x											
		I +E1 +E5	L'informaticien explique une manière de connaître si les mailles se sont allongées ou raccourcis après la mise en tension avec un système de couleur. « Vous pouvez extraire les valeurs extremum »					x			x					x											
		E1+ E5	Testent la tension avec la nouvelle fonction du modèle. « Il faut voir si on a pas des toiles trop tendues »					x			x					x											
		E1	Récupère la valeur maximale en tension								x					x											
		E1	Diminue l'élasticité, et regarde ensuite les valeurs de tensions								x					x											
		E2	Regarde des références d'accroches						x													x					
		P2+ E1+ E5	Il s'aperçoivent qu'il y a de trop forte tension. « Il faut contraindre le modèle à ne pas dépasser la valeur 2 »				x				x					x											
		P2	Propose d'implémenter une valeur d'élasticité de 3 et de voir ce que ça donne dans le modèle. c'est une expérimentation mais ça permet de démontrer avec le modèle.								x	x				x											
		E1	Change l'élasticité à 1 et regarde la forme du modèle. « Ca n'a pas l'air de tirer trop tôt ça donne déjà une forme intéressante » »								x	x				x											

GRILLE D'ANALYSE __ GROUPE M3											[Ailes de Bélian]														
Présence des 4 étudiants montois + 1 étudiant liégeois [E1, E2, E3, E4] + 2 enseignants [P1,P2] + 1 Informaticien [I]_ FacArchi/FabLab																									
DATE	MOMENT	HOTSPOT	QUI?	QUOI?	ILLUSTRATION	SUJETS ABORDÉS							OUTILS UTILISÉS												
						FORM	FAB	CONS	ASSEMB	FONC	MODEL	MAT	CRO	MAK NUM				MACHINE			MAKPHY	REF	O+		
														AUTO	ARCHI	SKP	RHIGH	BLEND	IMP3D	DLL				AUTR	
			E1+E5	Regarde l'allongement, il est à 4. « on pourrait descendre plus bas ». Remonte les points variables et regarde la valeur maximale d'allongement. Il faudrait pouvoir voir avec des couleurs.			x				x						x								
			E1+E5	Teste en descendant à 1 m du sol, puis vérification de l'allongement				x				x						x							
			E1	Regarde la forme en perspective sur le modèle et discutent sur le rendu		x												x							
			E1+I	Encodage du gradient de couleur. Il permet de savoir de combien fois la matière s'est déformée				x				x						x							
			E1	Aplati les patrons des toiles			x					x						x							
			E1	Export sur autocad			x					x			x										
			E3+E5	Début de l'assemblage de la maquette de site			x															x			
			E2	Assemblage de la maquette de site et mise en place des crochets			x		x													x			
			E5	Découpage des patrons à la main			x															x			
			E4	Poursuit la modélisation sketchup de la chapelle								x						x							
			E1	Prépare les exports « bake » sur Rhino								x							x						
			E3	Mise en place des fils d'accroche sur chaque toile			x		x													x			
			E1+E4	Intégration du modèle 3D dans sketchup								x						x							
			Tous	Discussion sur le choix de la couleur. La majorité préfère le blanc mais le tissu est différent et ondule sur les cotés lorsqu'il est mit en tension		x						x										x			x
			Tous	Assemblage de la maquette de site et poursuite de la préparation des toiles			x															x			
			E2+E3	Poursuite de la préparation des toiles,			x															x			
			E2+E3	Mise en place des toiles dans la maquette finale			x															x			

Annexe 10: Grille de transcription du groupe M4

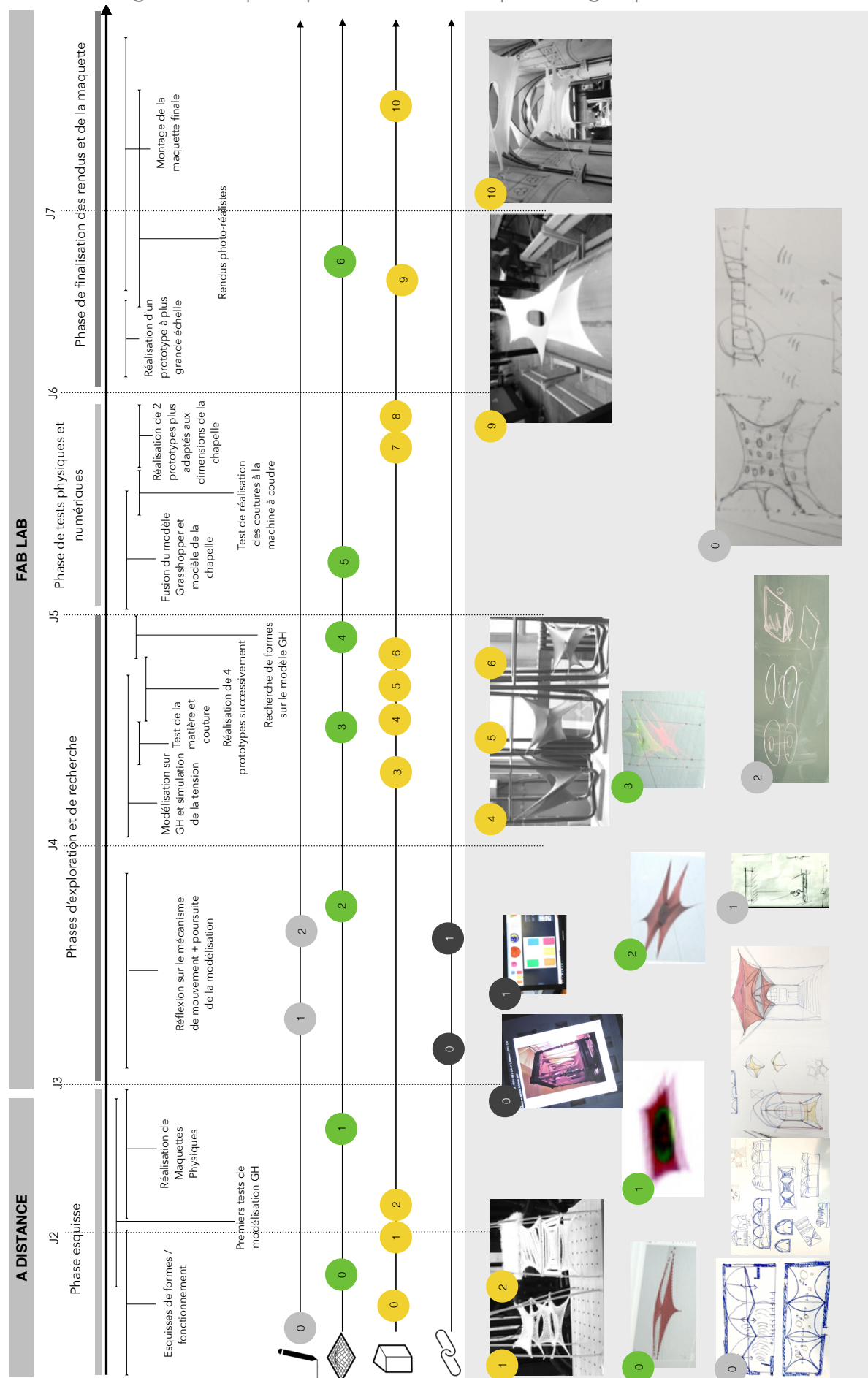
GRILLE D'ANALYSE __ GROUPE M4											[Lustre								
Présence des 3 étudiants montois + 1 étudiant liégeois [E1, E2, E3, E4] + 2 enseignants [P1,P2] + 1 Informaticien [I]_ FacArchi/FabLab																			
DATE	MOMENT	HOTS POINT	QUI?	QUOI?	ILLUSTRATION	SUJETS ABORDÉS					OUTILS UTILISÉS								
						F O R M	F A C	C A S	F O N	M O D	C R O	MAK NUM			MACHI NE		M A K	R E F	O + G
												A U T O	A R C H	S R B I	M P L D	A U T R Y			
5/02/2011	1		E1+ E2+ E3	Travaille de pliage de papier		x											x		
	2		E1+ E2+ E3	Recherche de références		x												x	
	3		E1	Explication du concept et de la forme « On a gardé l'idée de lustre, à priori il y aurait 3 lustres par travée. Ils pourraient évoluer indépendamment en hauteur. »		x											x		
16/02/2011	4		E2	C'est pas bien compliqué de faire varier les hauteurs			x		x										
	5		E1	Pour le système constructif on a pensé faire ça avec des câbles et à priori ça devrait fonctionner			x												
	6		P2	L'enseignant dessine un schéma (cf.schéma) de triangles liés entre eux. Il demande si les étudiants ne veulent pas faire quelque-chose de plus continu , et remet le lustre en question.		x					x								
	7		E1+ E2+ E3	Les étudiants « assument » l'idée du lustre		x													
	8		P2	Propose une organisation en réseaux et propose un schéma (cf.schéma). Envisager le motif dans une continuité.		x					x								
	9		E1+E2+E3	Les étudiants eux pensent que ça va trop cacher les voutes		x													
	10		E1	Un étudiant explique la mise en oeuvre : « un seul point d'accroche à la clé de voute qui maintient le système et les autres sont liés par des câbles. »			x												
	11		P2	L'enseignant n'est pas convaincu et leur demande s'ils ont testé en maquette . Ensuite il communique avec un schéma (cf.schéma) pour vérifier qu'ils ont bien compris.			x				x								
	12		P2	Propose un autre schéma en coupe pour mieux comprendre. Ce qui permet aussi aux étudiants d'imaginer.					x	x	x								
	13		P2	Demande comment ils ont réalisé le pliage ? L'autre enseignant explique qu'ils ont utilisé de « TESA ». Suite à cela, l'enseignant aborde la technologie de matérialisation . Il faut trouver un matériau ou une technique qui remplace le « TESA » (un textile par exemple? du cuire? charnière métallique?)			x	x			x								
	14		!!!	L'enseignant demande à l'autre enseignant s'il se rappelle d'un pliage réalisé par soustraction de matière . « oui oui oui, mais je ne sais pas si ça va bien fonctionner » Il paraît septique et réalise un schéma pour expliquer pourquoi (cf.schéma).			x	x			x	x							
	15		I	L'informaticien explique qu'il s'agit du principe du métal déployé			x	x			x								
	16		P2	« On vide pour affaiblir la matière et puis on pli. Mais je ne sais pas avec quel type de matériau on peut faire ça... ». « je ne sais pas ce que ça peut donner au niveau de la fatigue du matériau »			x	x			x								
	17		P1	« Moi j'ai déjà vu ce principe sur un matériau du type MDF et ça marchait très bien. »				x			x							x	
	18		P2	« Mais sur ce que tu as vu il y avait souvent du mouvement ? ou c'était juste une chaise ? »				x	x										
	19		P1	« On s'amuse à le faire bouger sans arrêt et ça tenait bien »				x	x									x	
	20		P2	« Alors il faut trouver les motif et tester . »			x	x											
	21		P1	« Ça pourrait être intéressant pour garder l'uniformité du matériau ici »		x		x											
	22		P2	« Oui je trouve que c'est encore mieux car on travaille qu'une seule matière »		x					x								
	23		E1	L'étudiant est d'accord que ça pourrait être intéressant « Oui c'est vrai si ça tient »			x	x	x										
	24		P1	Explique aux étudiants le fonctionnement de cette méthode: « c'est un motif que l'on vient faire sur la surface, en coupant et ça permet le pliage. »			x	x											
	25		I	« Pour les étudiants qui ont l'air septique, c'est le principe d'affaiblir la matière sans rupture »			x	x			x								
	26		P2	« On ne déchire pas les fibres du bois, mais on coupe . Ici l'enjeu intéressant est de venir injecter ce motif dans le modèle paramétrique . Sur les arrêtes. »							x								
	27		P2	« Avez vous réfléchi à un mécanisme d'activation du mouvement ? »				x		x									
	28		E3	« On tire juste sur des câbles qui sont reliées aux facettes »							x								
	29		P1	"Plus précisément quel câble agit sur quelle face? »				x		x									
	30		E3	« On numérote chaque câble »				x											
	31		P1	« Oui mais il y'a moyen de créer une interdépendance entre les mouvements »				x		x									
	32		E2	« On peut faire des scénarios mais on voudrait qu'ils soient tous possibles »							x								
	33		P2	« Ce qui est intéressant dans les autres propositions des autres groupes c'est l'interdépendances entre les éléments . C'est une caractéristique de la conception paramétrique »		x				x									

GRILLE D'ANALYSE __ GROUPE M4											[Lustre												
Présence des 3 étudiants montois + 1 étudiant liégeois [E1, E2, E3, E4] + 2 enseignants [P1,P2] + 1 Informaticien [I]_ FacArchi/FabLab																							
DATE	MO ME NT	HOT SP OT	QUI ?	QUOI?	ILLUSTRATION	SUJETS ABORDÉS						OUTILS UTILISÉS											
						F O R M	F A B R I C A T I O N	C O N S T R U C T I O N	A S S E M B L A G E	F O N C T I O N N E M E N T	M O D E L I S A T I O N	C A D	MAK NUM			MACHI NE		M A K P H Y	R E F	O + G			
													A U T O C A D	A R K I T E C T U R E	S K I N G	B L E N D	I M P 3 D				D L T R		
	34		E3	« Propose de faire un paramétrage du mouvement qui réagit au son »				x		x											x		
	35		P1	« Propose de placer un capteur sur chaque face et d'avoir un mouvement différent de chaque face. On peut déjà le faire sur modèle numérique et pourquoi pas trouver une interprétation après physiquement ».				x		x												x	
	36		P2	« Je trouve qu'il serait dommage de rester sur un objet unique (le lustre) qui se pli alors qu'on pourrait travailler sur une interdépendance au sein de la chapelle ». « L'interdépendante va aussi avoir une implication sur la conception de l'élément. »			x				x											x	
	37		P1	La priorité est de trouver la technique permettant de remplacer le TESA						x												x	
	38		P2	« Il faut réfléchir à la structure du modèle pour pouvoir intégrer cette histoire de pliage en découpe laser »								x										x	
	39		E3+ P +E2	Travaille sur le mécanisme et le fonctionnement en maquette . L'enseignant propose d'utiliser une chaise retournée afin de pouvoir se mettre en condition de gravité.						x									x			x	
	40		E1	Cherche des références							x									x			
	41		E2+ E3	Testent le mouvement sur la chaise retournée. « C'est vraiment le parapluie à l'envers »				x		x									x			x	
20/02/ 2017	42		E1	« Le plus gros à faire c'est la modélisation » « Finalement on a un mécanisme beaucoup plus lourd que prévu » « La technique de pliage est encore à préciser »			x			x	x											x	
	43		P1+ E1+ E4	Travaillent sur la modélisation paramétrique , sur GH. L'enseignant l'aide dans la recherche des outils et des étapes de modélisation.							x												
	44		E1+ E4	Réfléchissent à un assemblage en charnière avec un axe qu'ils veulent tester une impression 3D. E4 a modélisé cet assemblage sur Archicad . Ils se rendent compte qu'ils n'ont pas besoin de faire des créneaux sur toute la longueur de la face.						x		x											
	45		P2	Comment la charnière va s'associer? Il propose de retrouver le comportement du TESA par l'utilisation d'une bache. L'enseignant estime que c'est dommage d'utiliser l'imprimante 3D pour des éléments plans .						x		x										x	
	46		E1+ E3+ E4	Font des croquis d'assemblages						x			x										
	47		P1	L'enseignant soumet à nouveau l' idée d'un assemblage par soustraction de matière et apporte un exemple trouvé sur internet en tapant [laser cut pattern]						x											x	x	
	48		Tou s	Les étudiants sont assez impressionnés , et se mettent aussi à chercher des références.						x											x	x	
	49		E1+ E2	Regardent des motifs téléchargés dans un fichier autocad modifiable et mis à disposition.						x												x	
	50		E3	« L'étudiant se demande si l' angle de pliage à une limite? Il faut tester . »							x	x									x	x	
	51		P2	L'enseignant résume qu'il y'a 3 solutions possibles pour leur technique de pliage .							x			x									
	52		E1	Présentation d'un premier motif de découpe laser appliqué à leur forme hexagonale							x											x	x
	53		P1	L'enseignant conseille de tester différentes géométrie de motifs pour valider la technique utilisé pour le pliage aujourd'hui .							x												x
	54		E2	« On a aussi regardé le système de toile/bache »							x			x								x	x
	55		P1	« Quelqu'un doit essayer de matérialiser ces motifs et quelqu'un d'autre essaye de intégrer dans kangourou » P1 leur conseil de chercher des références de ces motifs intégrés à Grasshopper. « Le but est de pouvoir simuler le comportement de cette technologie dans le modèle numérique »							x		x										x
	56		E3	Explique le mécanisme de 3 hexagones. L'enseignant leur demande aussi de réfléchir à comment ils vont le mettre en oeuvre .						x													x
	57		Tou s	Première série de prototypes à la découpe laser			x			x			x										x
	58		Tou s	L' échelle est trop petite pour pouvoir obtenir le résultat souhaité car le laser « crame » tout et laisse peu de matière seigne.			x																x
	59		Tou s	Second test sur une échelle plus grande. Les plis sont réussis mais la maquette ne se pli pas beaucoup .			x			x													x
	60		E1+ E2+ E4	Préparation d'un découpe à plus grande échelle et avec plusieurs motifs différents . Travail sur Autocad + Travail sur le modèle 3D						x		x		x									

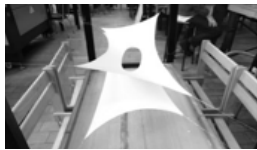
GRILLE D'ANALYSE __ GROUPE M4											[Lustre									
Présence des 3 étudiants montois + 1 étudiant liégeois [E1, E2, E3, E4] + 2 enseignants [P1,P2] + 1 Informaticien [I]_ FacArchi/FabLab																				
DATE	MO ME NT	HOT SP OT	QUI ?	QUOI?	ILLUSTRATION	SUJETS ABORDÉS					OUTILS UTILISÉS									
						F O R M	F A B S	C O N S	A S S E M B	F O N C E L	M A T R O	MAK NUM			MACH INE	M A K P H Y	R E F N	R E F G		
												A U T O H I	A R C H P	S K I G H					B L E N D	I M P 3 D
1/02/2017	61	E1+ E2+ E3+ E4	!! !	Découpe à plus grande échelle sur une forme en losange et sur la forme hexagonale final de l'élément. A plus grande échelle le prototype se plie bien. Test de différents motifs de découpe. Le losange fonctionne assez bien. Dans l'ensemble cette technique a des chances de fonctionner. Les étudiants sont enthousiastes et les enseignants aussi. Il faut cependant optimiser le motif et l'échelle . En effet, l'épaisseur du matériaux utilisé est assez élevé par rapport à l'échelle global de l'élément découpé.		x		x	x	x						x	x			x
	62	E1+ E2		On s'aperçoit que de la matière reste coincée dans les zones découpées et empêche l'élément de se plier. Les étudiants essayent d'aspirer ou de pousser la matière résiduelle.		x				x					x	x				
	63	Pi +E1 +E2 +E3 +E4		Réflexion sur le mécanisme qui permettra de faire bouger les faces entre elles. Les étudiants évoquent des « cordes », des « câbles ». On se rend compte que les trous générés par la découpe laser pourrait aussi servir pour emprisonner le son de manière performante. « Pourquoi ne pas l'utiliser partout? »			x		x	x						x			x	
	64	E1+ E2+ E3+ E4+ Pi		L'enseignant remet en question leur système dynamique. Il estime qu'une fois qu'on atteint un équilibre acoustique on ne bougera plus beaucoup le système.						x							x			x
	65	"		Discussion sur l' acoustique d'une salle avec l'enseignant.						x										x
	66	E1+ E4		Deux étudiants travaillent sur le modèle grasshopper						x				x						
	67			On décide d'utiliser qu'un seul « lustre » par travée car plus « constructible » et plus « fonctionnel ».		x	x		x											x
	68			Recherche d'autre motifs de découpe laser sur internet. (cf.photo)		x		x												x
	69			Finalisation d'un nouveau prototype à découper en intégrant aussi des motifs sur les face pour assurer l'absorption acoustique.		x		x		x		x								
	70		!	Nouveau prototype réalisé, très concluant. Enthousiasme des étudiants et des professeurs. Les étudiants veulent refaire un test pour optimiser encore.		x				x						x	x			x
	71	P2		Se demande si en « arrondissant les bouts du prototype il n'y aurait pas moins de contraintes. »		x	x			x	x						x			
	72	E1		Préparent une nouvelle découpe sur autocad pour le lendemain.					x	x		x								
	73	E4		Travaillent sur le modèle GH en parallèle						x				x						
2/02/2017	74	E1+ E2+ P		Travaillent sur deux fichiers autocad différents pour préparer deux modèles à découper et tester le meilleur.				x		x		x								
	75	E4		Travaille sur le modèle Grasshopper pour modéliser la gravité .						x				x						
	76	E1+ E2+ P		Découpent des prototypes en forme triangulaire. (cf photos). La machine a eu un problème et a brûlé trop de matière ce qui ne permettait pas de comparer. Problème de machine (réglage...) L'enseignant essaye de régler le problème en faisant des tests.		x		x		x						x	x			
	77	E1+ E2+ P		Test du prototype mais même problème. D'une part la découpe n'est pas traversante et elle « brûle » trop la matière.		x		x		x						x	x			
	78	E4		L'étudiant essaye d' intégrer un motif paramétrable dans le modèle Grasshopper car ils se rendent compte qu'il passent beaucoup de temps à changer la taille du motif.						x				x						
	79	E2		Prépare un autre prototype pour la découpe sur autocad avec un autre motif.		x		x		x		x								
	80	E2+ P	!!!	Prototype très souple. Tout monde est impressionné par la souplesse.		x		x		x						x	x			x
	81	E1+ E2+ P		Découpe d'un nouveau prototype n°11 plus solide mais moins souple.		x		x		x						x	x			
	82			Prototype découpé. Intégration du motif sur toutes les faces. (cf.photo) Mais le motif choisi n'est pas le plus optimal pour la pliure.		x		x								x	x			
	83	E1	!! !	Aborde la réalisation de cet objet à l'échelle 1:1. « On est limité par la taille de la machine pour réaliser ces éléments à grande échelle. De plus le matériau utilisé a une grande influence en utilisant cette technique. »		x	x	x		x										x
	84			Prototype découpé avec un nouveau motif plus allongé.		x		x				x				x	x			
	85	E4		A une nouvelle idée de mécanisme qui utiliserait le propre poids de l'élément pour faire déplier le lustre.			x		x		x									x
	86	E2		Modélise le système sur sketchup pour présenter le mécanisme.						x	x		x							
	87	E1		Préparation d'une découpe sur autocad pour réaliser un prototype.		x		x		x		x								
	88	E1		On cherche le matériau que l'on va utiliser. Les matériaux restant sont différents de ceux utilisés dans les premiers jours. L'étudiant se demande si ce matériau est adéquat.						x								x		x
	89	E1+ E2+ E3+ E4		Les étudiants testent finalement sur seulement un triangle avec la nouvelle matière mais celle-ci casse beaucoup plus facilement.		x		x								x	x			x

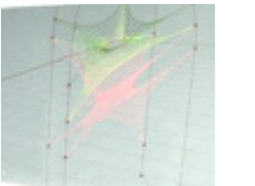
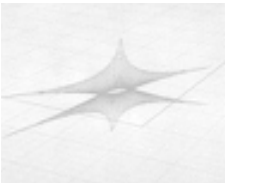
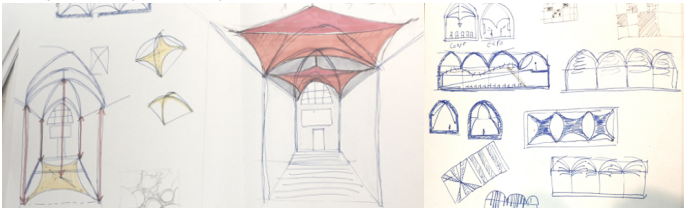
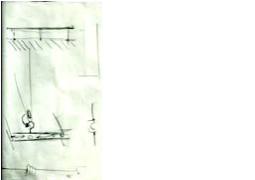
GRILLE D'ANALYSE __ GROUPE M4											[Lustre]										
Présence des 3 étudiants montois + 1 étudiant liégeois [E1, E2, E3, E4] + 2 enseignants [P1,P2] + 1 Informaticien [I]_ FacArchi/FabLab																					
DATE	MO ME NT	HOT SP OT	QUI ?	QUOI?	ILLUSTRATION	SUJETS ABORDÉS					OUTILS UTILISÉS										
						F O R M	F A B R I C A T I O N	C O N S T R U C T I O N	A S S E M B L A G E	M O D E L E	C R O Q U I	MAK NUM			MACHI NE		M A K P H Y	R E F	O + G		
												A U T O C A D	A R K I T E C T U R E	S H I E L D I N G	I M P 3 D	D L A U T R					
3/02/2017	90		E1+ E2+ E3	Réfléchissent à la manière de plier l'élément. Quel mécanisme? Réalisation d'un croquis (cf.croquis)			x		x		x									x	
	91		E1+ E2	Ils font finalement un test sur un lustre en entier . Ce dernier fonctionne bien.			x		x	x		x			x		x				
	92		E4+ I	Travaille sur l' intégration du motif dans le modèle grasshopper avec l'informaticien .						x				x							
	93		E4	Mais finalement l' étudiant intégrera le motif sur archicad de manière figée et non paramétrable.						x				x							
	94		E1+ E2+ E3	Tentent de réaliser le mécanisme de pliage puis font un test . Ils doivent régler la longueur des câbles pour que cela fonctionne correctement.				x		x							x			x	
	95	!	E1+ E2+ E3+ E4	Le système fonctionne, les étudiants sont très satisfaits . Ils sont moins satisfait de la vue du dessous à cause de la pièce qui maintient l'élément. Inesthétique à leur goût et peu pratique au fonctionnement.		x				x							x			x	
	96		P2+ E1+ E2+ E3+ E4	L'enseignant leur propose d' optimiser le design de l'élément de manière à ne pas avoir un pièce rond vu du dessous qui permet de retenir l'élément mais de l'intégrer directement dans le design. Réalisation de plusieurs croquis .		x				x		x					x			x	
	97		E1	Prépare le nouveau modèle sur autocad en essayant d' intégrer les remarques .							x										
	98		E1+ E2+ E3	Test du prototype avec le nouveau design mais le même motif de pliage qui a été validé auparavant . Prototype-> Déjà très satisfaisant cf.photos			x		x	x		x									
	99		E1+ EP +I	Discussion avec l'enseignant et l'informaticien pour optimiser le design et limiter les concentrations de contraintes lors du pliage . (cf.photo)						x											
100		E1	Prépare et optimise un futur prototype sur autocad . Réfléchis à la répartition des contraintes.							x											
4/02/2017	101		E1 +P	Découpe d'un prototype préparé la veille pour optimiser les répartitions de contraintes et solidifier l'élément. L'étudiant laisse une jonction dans la même configuration que précédemment et change les deux autres. Le prototype casse aux niveau de l'ancienne configuration . Il remarque aussi que l'espace vide permet de mieux plier . Il en conclut qu'il faut revenir à plus d'espace libre.			x		x		x				x		x			x	
	102		E1	Préparation d'un nouveau prototype avec la nouvelle configuration et plus d'espace vide. Ajout des alvéoles pour capter le son, ajout des trous d'accroche des câbles en vu de réaliser le modèle final.							x		x								
	103	!	E1	Modèle final découpé, l'étudiant enlève la matière en trop .			x		x							x		x			
	104		E1+ E2+ E3	Montage et assemblage du mécanisme sur cette l'élément .			x			x								x			x
	105		E1+ E2+ E3	Test de pliage et du fonctionnement du mécanisme concluant, les étudiants sont satisfaits .							x							x			x

Annexe 11: Ligne du temps du processus de conception du groupe M1

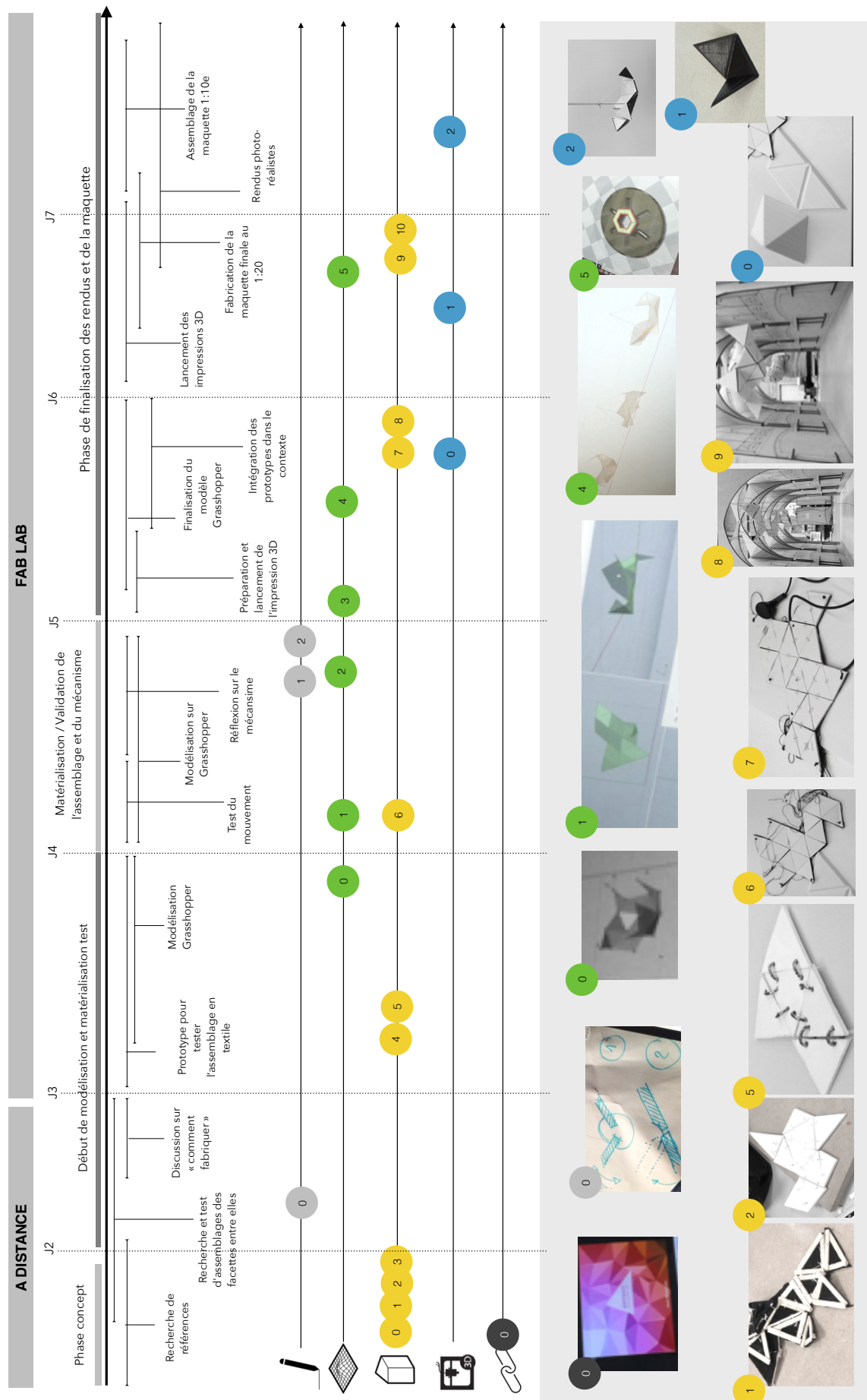


Annexe 12: Description des artefacts réalisés par le groupe M1

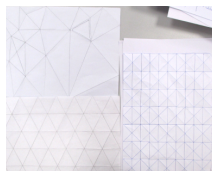
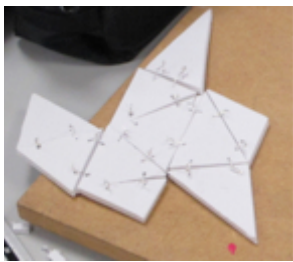
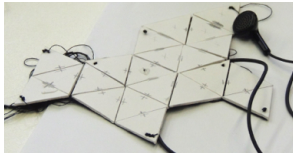
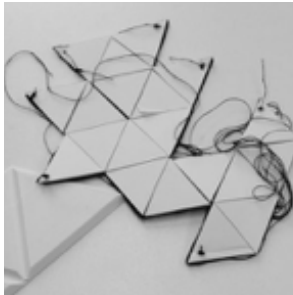
N°	Description	Rôle	Photo
0	Maquette physique réalisé avec des chaussettes « collants » pour matérialiser la première forme	- Visualiser la forme - Communiquer une idée	
1	Maquette physique réalisée en mousse « ouate » pour l'aspect formel et fonctionnel (acoustique)	- Visualiser la forme - Communiquer une idée - Référence pour la modélisation paramétrique	
2	Maquette physique réalisée en mousse « ouate » pour tester le comportement de la matière en tension dans différentes directions	- Communiquer une idée	
3	Maquette physique réalisée pour tester le matériau Lycra en tension, évaluer la forme et la couture. La couture casse.	- Tester le matériau - Visualiser/Evaluer la forme - Tester un assemblage couture	
4	Maquettes physiques réalisées sur 3 tabourets retournés, symbolisant les 3 travées de la chapelle. Elles ont pour but de tester la forme générale de l'ensemble des 3 toiles mais aussi de tester un première système d'accroche	- Tester la forme - Tester l'accrochage	
5			
6			
7	Maquette physique réalisée pour évaluer la forme avec un plus grand trou dans la toile	- Tester la forme	
8	Maquette physique réalisée à l'aide de deux tabourets pour obtenir une proportion plus proche de la chapelle.	- Visualiser la forme	
9	Maquette physique réalisée à l'échelle 1:10e	- Tester le comportement à plus grande échelle - Tester le forme à plus grande échelle	
10	Maquette physique finale réalisée au 1:20e intégrée au contexte.	- Visualiser la forme dans son contexte	
N°	Description	Photo	
0	Référence du lit chewing-gum		
1	Référence de forme en accordéons		

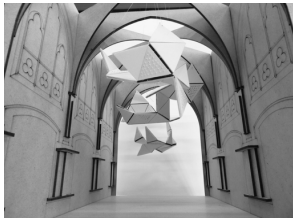
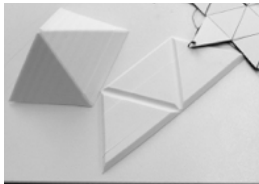
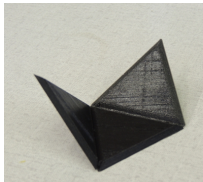
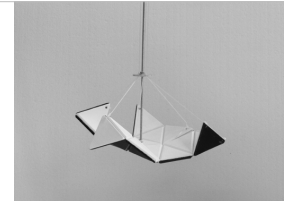
0	Premier essai de modélisation sur Grasshopper avec la forme prévue au départ	
1	La forme sur Grasshopper a été adaptée à la forme proposée en maquette physique	
2	Travail sur la liaison des deux toiles sur le modèle Grasshopper mais incohérence entre la forme obtenue en maquette physique et celle obtenue en maquette numérique	
3	Simulation de la tension dans le modèle Grasshopper	
4	Intégration du modèle Grasshopper aux dimensions de la chapelle et recherche des formes les plus intéressantes	
5	Intégration des toiles « bakées » à la chapelle sur archicad	
6	Réalisation des rendus photoréalistes sur Lumion	
0	Croquis d'esquisse, exploration des formes, des fonctions	
1	Croquis de recherche du mécanisme de mouvement	
2	Croquis de stratégie de modélisation	

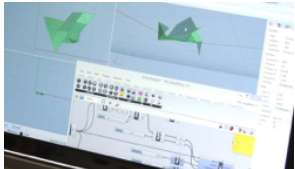
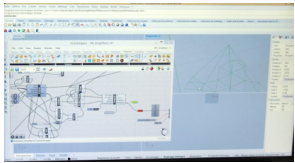
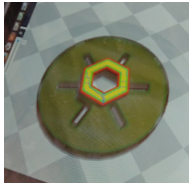
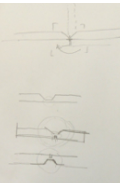
Annexe 13: Ligne du temps du processus de conception du groupe M2



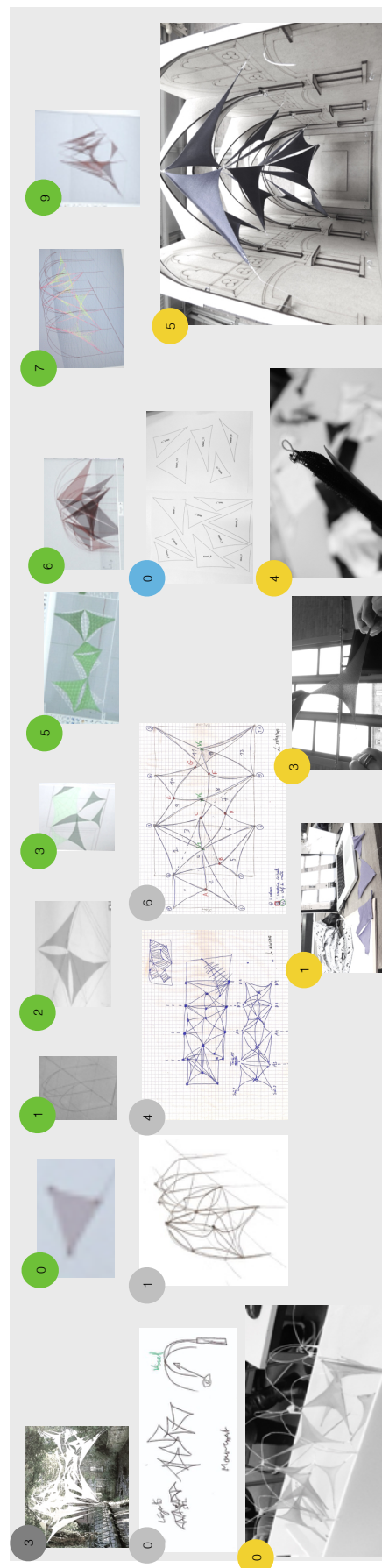
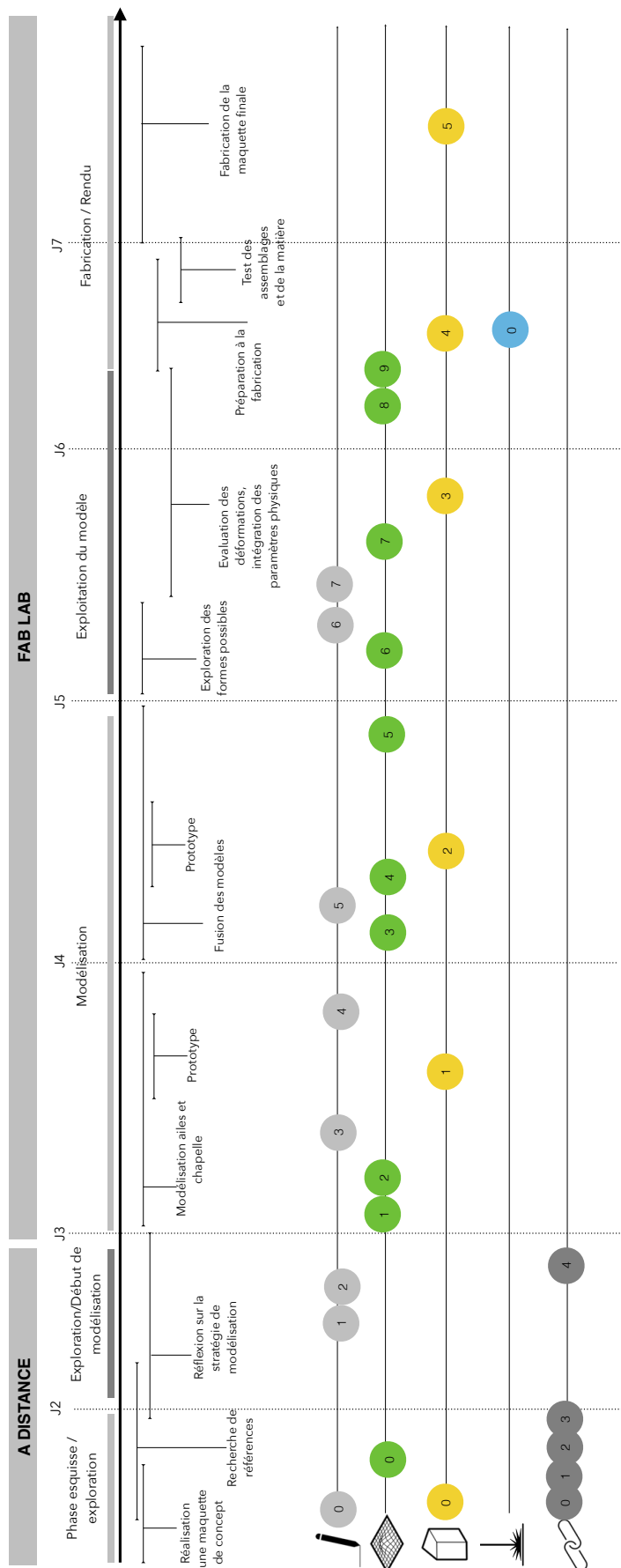
Annexe 14: Description des artefacts réalisés par le groupe M2

N°	Description	Rôle	Photo
0	Maquette « concept » en papier sur le principe de l'origami	- Exploration du concept - Recherche de forme	
1	Maquette en bois, tissu et fil de fer. Les triangles sont matérialisés en bois et reliés au tissu par un fil de fer	- Tester un assemblage - Visualiser l'aspect	
2	Maquette réalisée en carton mousse et fil de fer. Les facettes en carton mousse sont reliées par deux éléments de fil de fer	- Tester un assemblage - Visualiser l'aspect	
3	Prototype d'assemblage en « queue droite » réalisé à partir de carton mousse et d'une aiguille	- Tester un assemblage	
4	Prototype d'une nappe dont l'assemblage est réalisée à l'aide d'un tissu	- Tester un assemblage - Visualiser l'aspect	
5	Prototype d'un assemblage par deux anneaux	- Tester un assemblage	
6	Prototype d'une nappe complète en carton mousse et assemblage tissu	- Tester le fonctionnement du projet	
7	Prototype d'une seconde nappe complète en carton mousse et assemblage tissu	- Visualiser l'aspect	

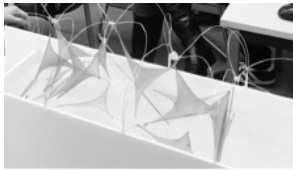
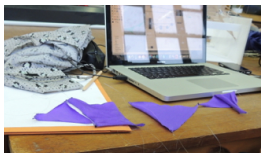
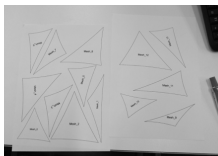
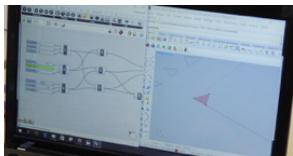
8	Intégration des nappes dans la maquette contexte	- Visualiser l'aspect	
9	Prototype carton mousse et tissu en plus grande dimensions	- Visualiser l'aspect	
10	Perçage des facettes	- Visualiser l'aspect	
0	Réalisation de quelques facettes pour tester le fonctionnement du biseau	- Tester un assemblage -Préparer la maquette finale	
1	Réalisation de quelques facettes pour tester le fonctionnement du biseau	- Tester un assemblage -Préparer la maquette finale	
2	Prototype final à l'échelle 1:10e réalisé en impression 3D (+/- 32h)	- Vérifier le fonctionnement - Vérifier l'aspect	
N°	Description	Photo	
0	Grille de triangle modélisée		

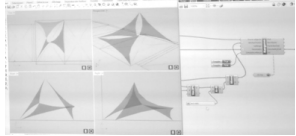
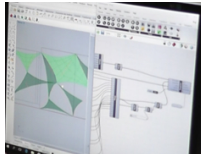
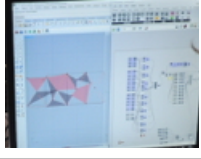
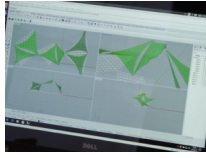
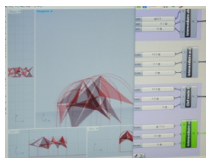
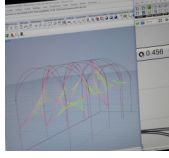
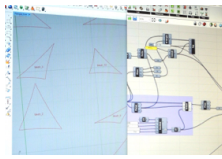
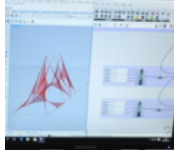
1	Ajout du module Kangaroo au modèle permettant de simuler la gravité	
2	Ajout des « câbles » permettant le mouvement	
3	Modèle réalisé sur sketchup pour être imprimé en 3D	
4	Les 3 nappes sont modélisées sur Grasshopper et peuvent varier reliées à des câbles	
5	La pièce du mécanisme modélisée sur Sketchup	
0	Croquis d'exploration des possibilités d'assemblage	
1	Croquis d'exploration d'un système de mécanisme permettant le mouvement	
2	Croquis de détail des différentes manières de concevoir les jonctions	
0	Référence des facettes	

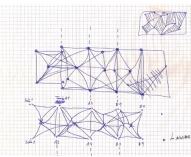
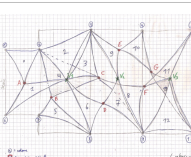
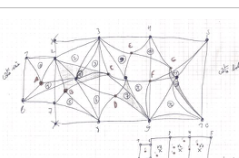
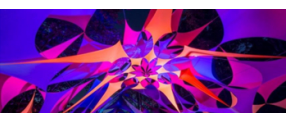
Annexe 15: Ligne du temps du processus de conception du groupe M3

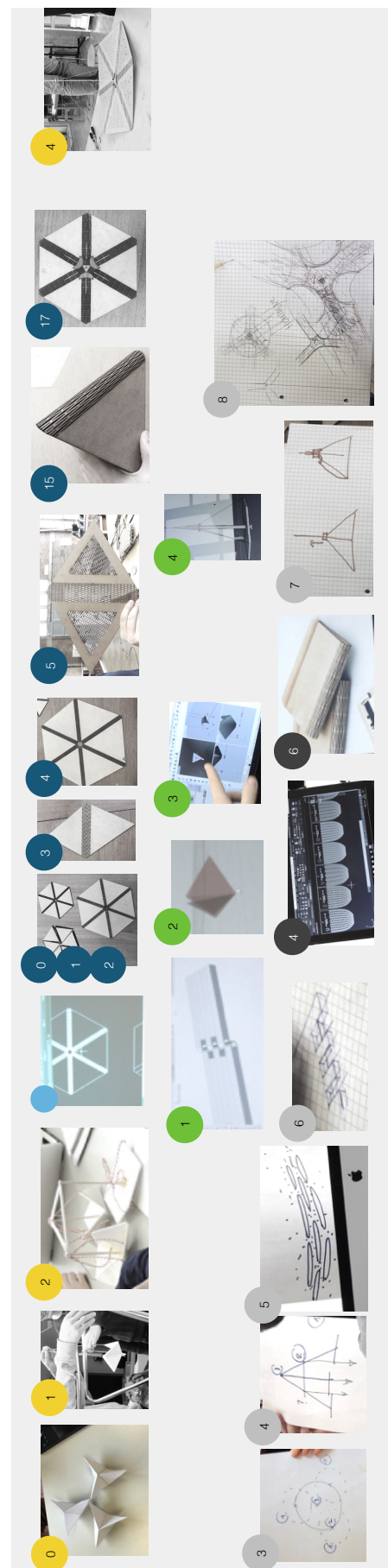


Annexe 16: Description des artefacts réalisés par le groupe M3

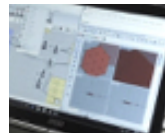
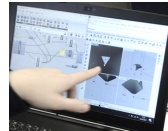
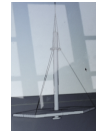
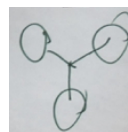
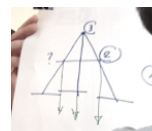
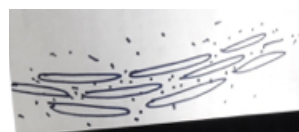
N°	Description	Rôle	Photos
0	Maquette d'intention réalisée en carton mousse (contexte), fil de fer (voutes), tissu flexible (toiles).	-Communiquer une idée -Chercher et visualiser une forme - Support de réflexion sur la mise en oeuvre -Support de modélisation paramétrique	
1	Maquette testant la forme avec 3 toiles connectées	-Visualiser l'aspect -Tester le fonctionnement	
2	Test d'un assemblage en oeillet	-Tester un assemblage	
3	Test de la matière en tension	Tester la matière	
4	Test d'un nouvel assemblage cousu	Tester un assemblage	
5	Maquette finale	Visualiser le rendu final du projet dans son contexte	
0	Patrons imprimés exporté du modèle Grasshopper	Vérifier la matérialisation fabrication	
N°	Description	Photos	
0	Modélisation d'une toile « à plat »		

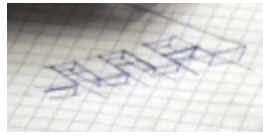
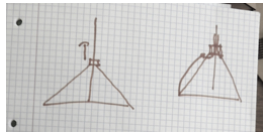
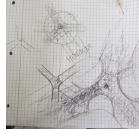
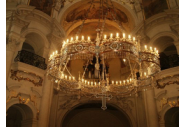
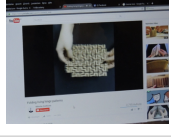
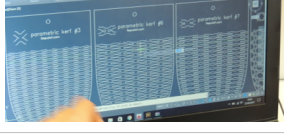
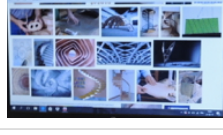
1	Modélisation de la chapelle sur grasshopper	
2	Modèle formé de 3 toiles, module kangaroo intégré	
3	Modèle formé de 3 toiles. Problème avec deux toiles liées.	
4	Modèle plus évolué, problème de liaison non réglé	
5	Création du maillage des toiles (Mesh)	
6	Fusion des toiles avec le modèle de la chapelle	
7	Visualisation des toiles tendues	
8	Mise à plat des toiles et numérotation	
9	Test des limites du modèle	
0	Croquis d'intentions expliquant le concept du projet	
1	Esquisse 3D du projet intégré à son contexte	

2	Esquisse du rendu en plafond de la chapelle avec le projet	
3	Esquisse 3D des toiles dans une autre configuration	
4	Schémas résumé des différentes toiles présentes avec numérotation	
5	Coupe schématique du projet pour définir les hauteurs	
6	Schéma résumé des toiles à mettre en place	
7	Schéma résumé des toiles à mettre en place	
0	<i>Pukkelpop 2014</i>	
1	<i>Membrane Arrays - Londres 2005-2006</i>	
2	<i>Pukkelpop 2014</i>	
3	<i>Tensile Fabric - Jens Meyer, Allemagne</i>	
4	Exemple de crémaillère	

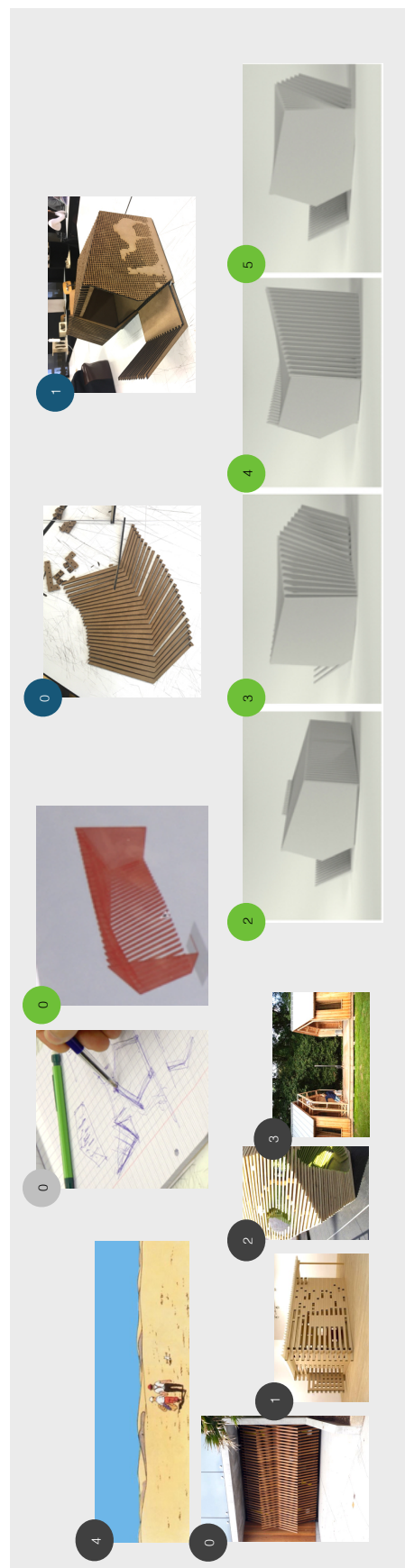
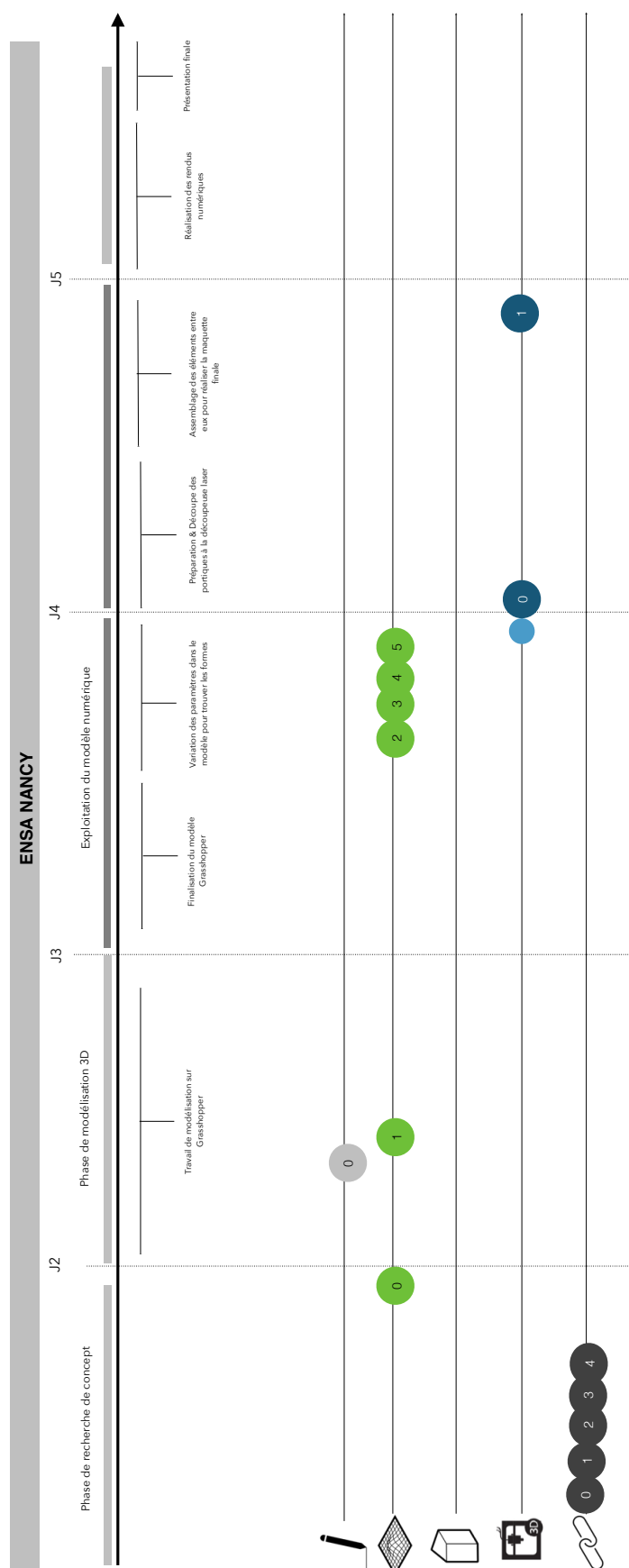


Annexe 18: Description des artefacts réalisés par le groupe M4

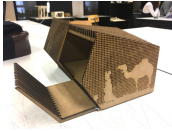
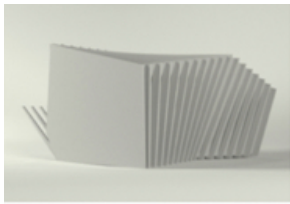
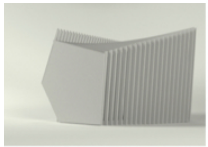
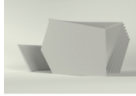
N°	Description	Photos
0	Première étape de modélisation sur Grasshopper	
1	Modélisation d'un assemblage pour le pliage des faces sur archicad	
2	Seconde étape de modélisation sur Grasshopper: modélisation du pliage	
3	Troisième étape de modélisation sur Grasshopper: ajout de la gravité dans le modèle	
4	Modélisation du rendu final sur sketchup	
0	Premières esquisses, et réflexions sur le projet. Elaboration du concept	
1	Seconde esquisse du projet. Mise en place d'une structure à trois modules	
2	Schéma réalisé par un des encadrants pour vérifier la bonne compréhension du projet	
3	Second schéma réalisé par un des encadrants pour vérifier la bonne compréhension du projet	
4	3ème schéma réalisé par un des encadrants pour vérifier la bonne compréhension du projet	
5	4ème schéma réalisé par un des encadrants pour expliquer la méthode de pliage par soustraction	

6	Esquisse d'un assemblage	
7	Esquisse d'un système mécanique	
8	Esquisse d'une partie du lustre	
0	Référence de lustre pliable	
1	Référence d'anciens lustres	
2	Référence de lustres acoustiques	
3	Vidéo Youtube d'exemple de pliage par soustraction de matière	
4	DXF permettant la découpe pour obtenir un pliage	
5	DXF permettant la découpe pour obtenir un pliage	
6	Exemple de pliage par soustraction de matière	
7	Références	
8	Lustre pliable	

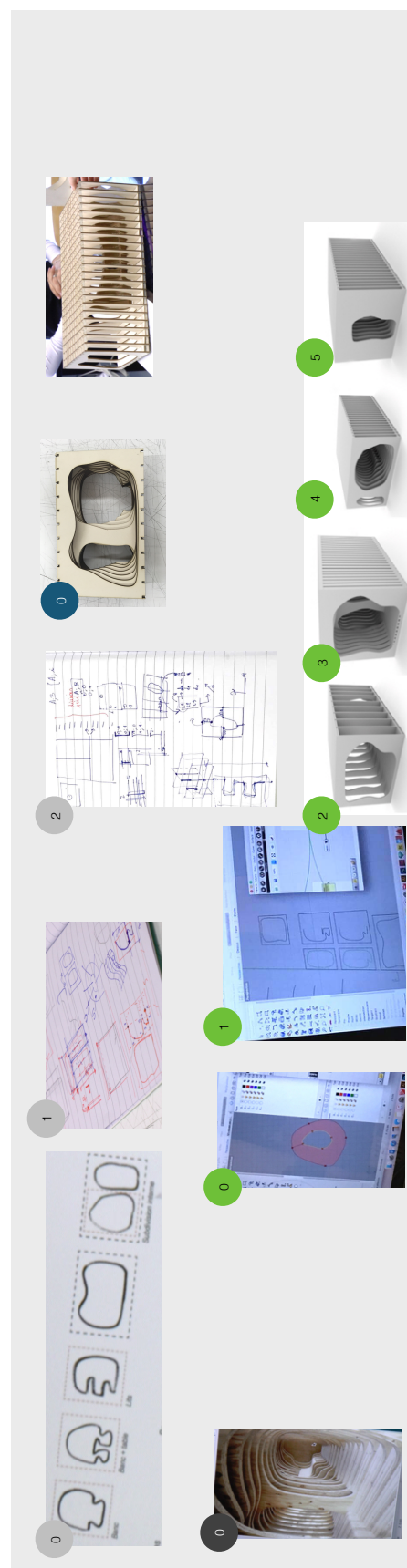
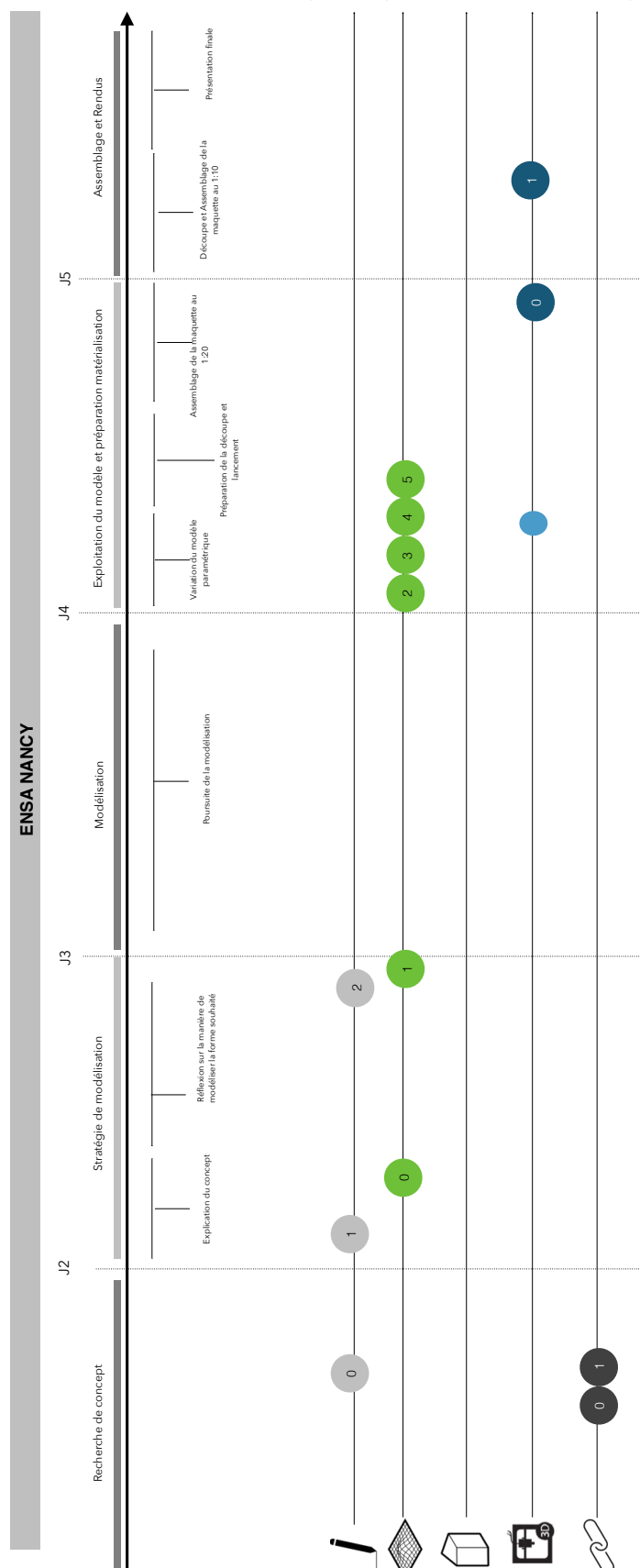
Annexe 19: Ligne du temps du processus de conception du groupe N1



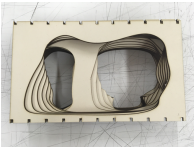
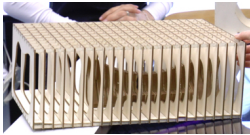
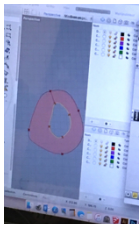
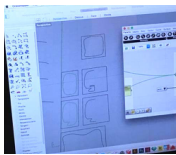
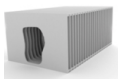
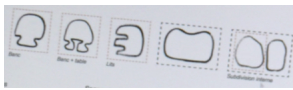
Annexe 20: Description des artefacts réalisés par le groupe N1

N°	Description	Rôle	Photos
	/	/	/
0	Portiques et pièces découpés prêts à être assemblés	Vérifier la matérialisation	
1	Maquette finale	Communiquer	
N°	Description	Photos	
2	Essai de forme		
3	Essai de forme		
4	Essai de forme		
0	Croquis réalisé pendant la modélisation paramétrique		
0	Références de projets en portiques bois		
1			
2			
3			

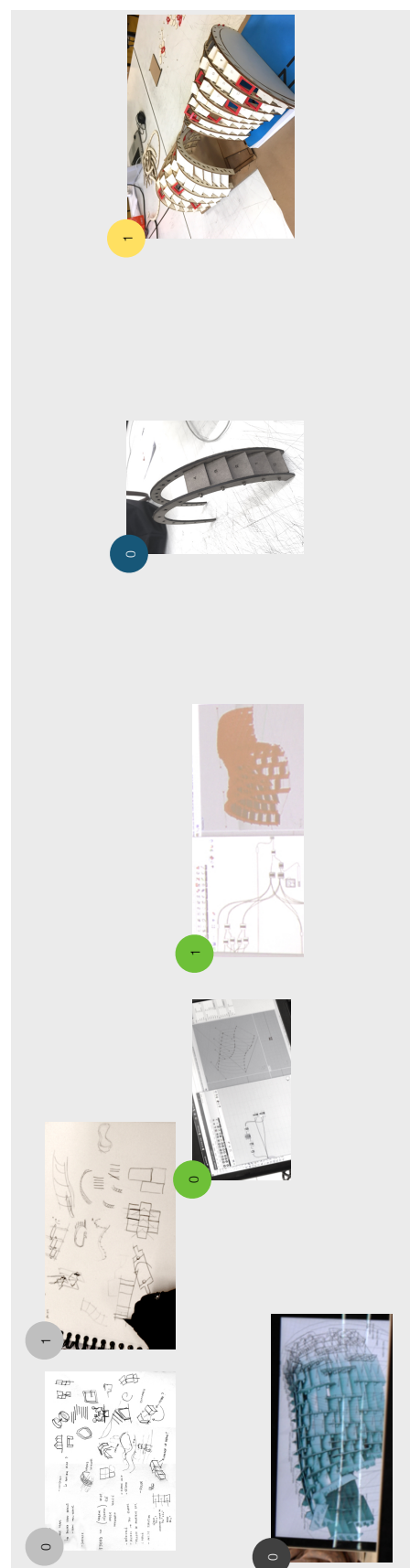
Annexe 21: Ligne du temps du processus de conception du groupe N2



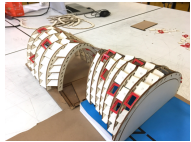
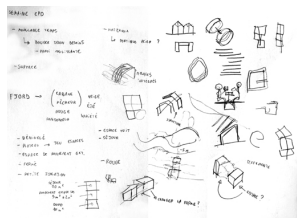
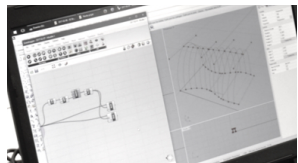
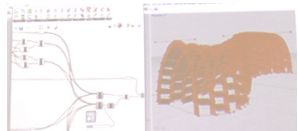
Annexe 22: Description des artefacts réalisés par le groupe N2

N°	Description	Rôle	Photos
0	Préparation des fichiers pour la découpe laser		
0	Premier essai de fabrication et d'assemblage		Vérifier la matérialisation
1	Maquette finale		Communiquer le projet
N°	Description	Photos	
0	Premier essais de modélisation de formes sur Grasshopper		
1	Intégrations de courbes 2D dessinées dans Grasshopper		
2	Modèle final variante n°1		
3	Modèle final variante n°2		
4	Modèle final variante n°3		
5	Modèle final variante n°4		
0	Référence d'un pavillon basé sur le même le concept que ce groupe		
0	Dessins de courbes de références pour commencer la modélisation		
1	Explication d'une méthode de modélisation		
2	Croquis réalisés pendant la modélisation		

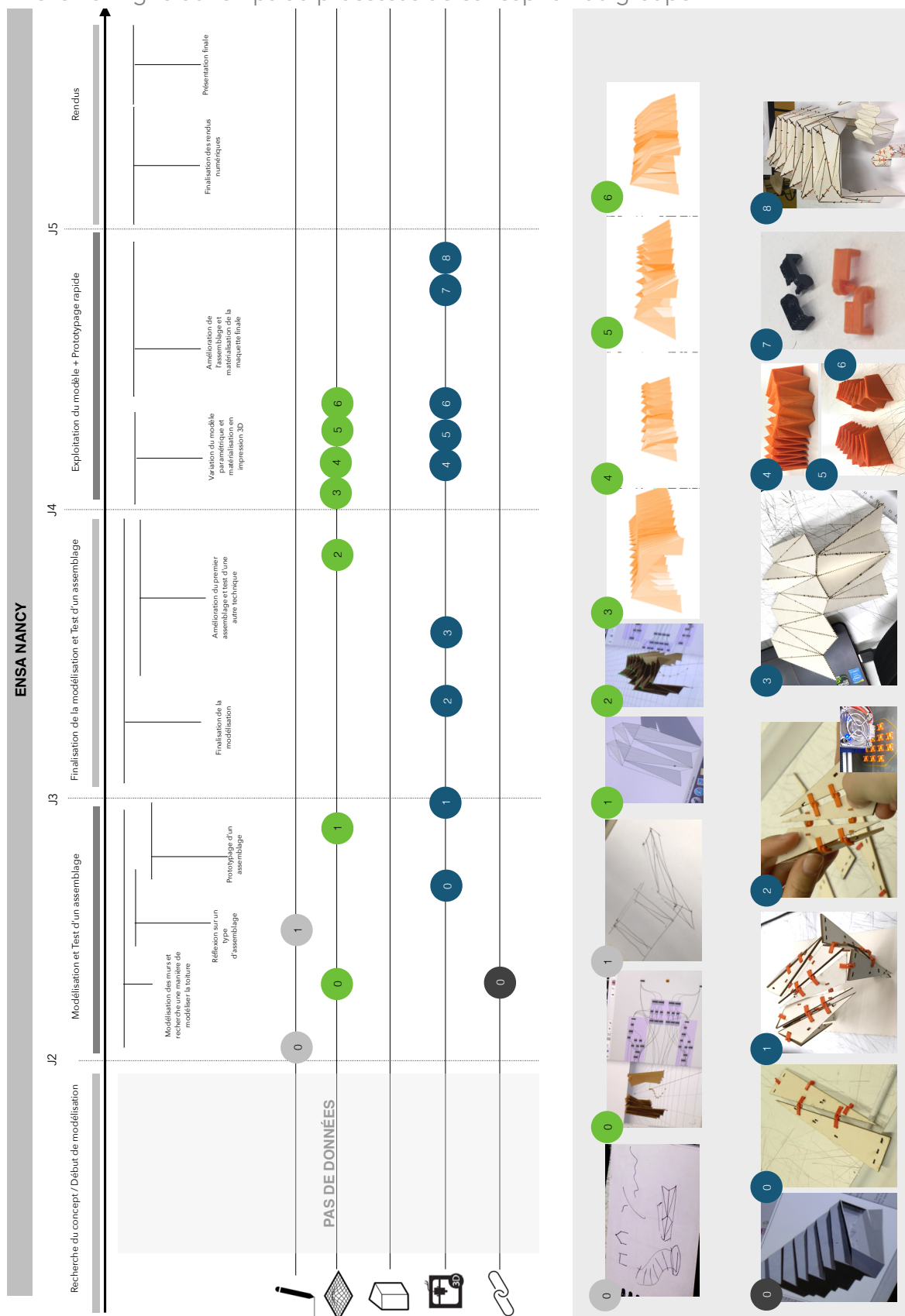
Annexe 23: Ligne du temps du processus de conception du groupe N3



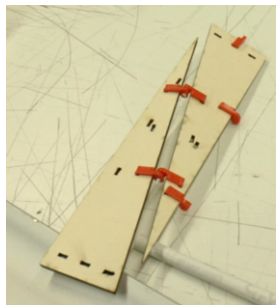
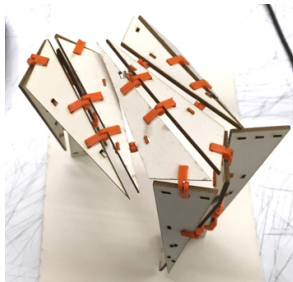
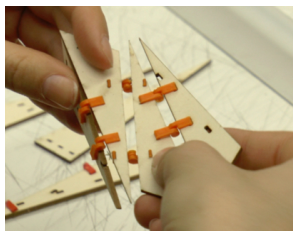
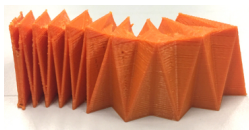
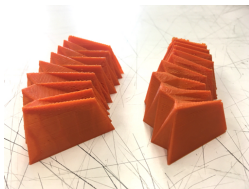
Annexe 24: Description des artefacts réalisés par le groupe N3

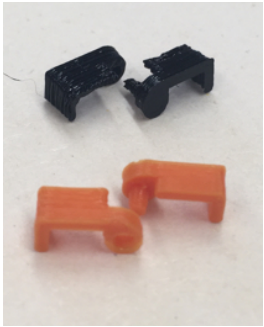
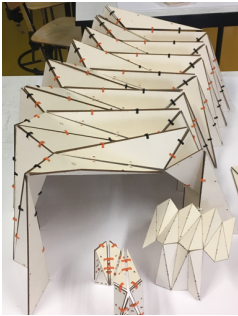
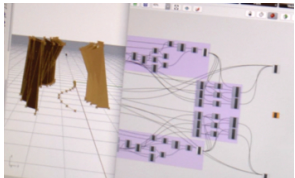
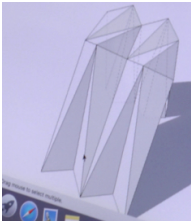
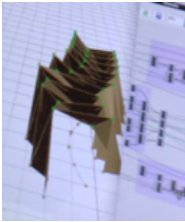
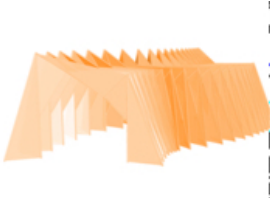
N°	Description	Rôle	Photos
0	Premier essai d'un portique. Assemblage des portiques avec les tuiles		Vérifier la fabrication Tester un assemblage
1	Maquette finale		Visualiser l'aspect
N°	Description	Photos	
0	Esquisses d'intentions		
1	Croquis réalisés pendant la modélisation numérique pour expliquer une méthode		
0	Modélisation de la forme globale du projet		
1	Les tuiles sont modélisés		

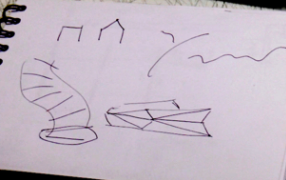
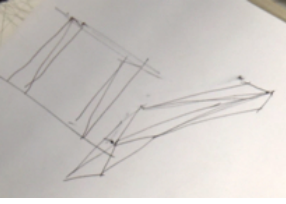
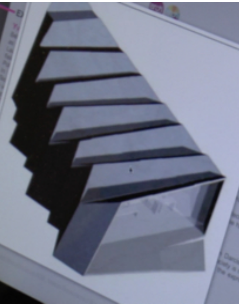
Annexe 25: Ligne du temps du processus de conception du groupe N4



Annexe 26: Description des artefacts réalisés par le groupe N4

N°	Description	Rôle	Photos
0	Premier prototype permettant de tester la technique de charnière (imprimées en 3D)	Tester le fonctionnement d'un assemblage	
1	Second prototype comprenant plus de facettes	Tester l'assemblage des pièces Vérifier le fonctionnement	
2	Test du mouvement	Tester le fonctionnement d'un assemblage	
3	Prototype réalisé pour tester un pliage par soustraction de matière	Tester un assemblage	
4	Impression 3D du volume global à partir du modèle Grasshopper	Recherche de forme Visualisation de forme	
5 6	Impression 3D du volume global à partir du modèle Grasshopper. Test de formes	Recherche de forme Visualisation de forme	

7	Impression 3D de deux types de charnières permettant l'assemblage des facettes	Vérifier la matérialisation Vérifier le fonctionnement	
8	Maquette finale au 1:10e	Visualiser le rendu final Tester la constructibilité	
N°	Description		Photos
0	Modélisation des murs sur Grasshopper		
1	Export d'une portion de mur sur sketchup		
2	Modèle final		
3	Version de forme N°1		

4	Version de forme N°2		
5	Version de forme N°3		
6	Version de forme N°4		
0	Esquisse réalisée pendant la modélisation paramétrique pour chercher une méthode		
1	Esquisse réalisée pendant la modélisation paramétrique pour chercher une méthode		
0	Référence d'une chapelle basée sur l'origami (localarchitecture)		

Annexe 27: Profils des étudiants participants au workshop matérialité numériques [Mons]

Groupe	M1					M2				M3					M4			
Concepteur	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18
Âge	23	23	23	23	23	22	24	25	23	22	23	23	23	24	22	24	25	23
Formation d'origine	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte
Niveau d'étude actuel	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2
Nombre d'année de pratique architecturale	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Utilisation de la modélisation paramétrique pour un projet d'architecture?	1 à 2 fois	Jamais	Jamais	1 à 2 fois	Jamais	Jamais	1 à 2 fois	1 à 2 fois	1 à 2 fois	1 à 2 fois	1 à 2 fois	Jamais	1 à 2 fois	Jamais	Jamais	1 à 2 fois	1 à 2 fois	1 à 2 fois
Utilisation de la fabrication digitale pour un projet d'architecture	1 à 2 fois	Jamais	1 à 2 fois	1 à 2 fois	Jamais	Jamais	Jamais	Jamais	1 à 2 fois	Jamais	Jamais	Jamais	1 à 2 fois	1 à 2 fois	Jamais	Jamais	Jamais	1 à 2 fois

Annexe 28: Profils des étudiants participants au workshop CFD [Nancy]

Groupe	N1			N2			N3				N4		
Concepteur	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13
Âge	25	25	23	23	23	24	22	22	23	24	26	22	23
Formation d'origine	Architecture	Architecture	Ingénieur Construction	Architecture	Architecture	Ingénieur Construction	Ingénieur Construction	Architecture	Architecture	Architecture	Architecture	Ingénieur Construction	Architecture
Niveau d'étude actuel	M2	M2	M2	L3	M2	M2	M2	M2	M2	M2	M2	M2	M2
Nombre d'année de pratique architecturale	5	5	0	3	5	0,5	0	5	6	4,5	7	1	5
Utilisation de la modélisation paramétrique pour un projet d'architecture?	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Utilisation de la fabrication digitale pour un projet d'architecture	6	0	0	1	1	0	0	0	3	3	0	0	4

Annexe 29: Réponses des groupes M1 et M2 au questionnaire

Groupe		TENSIONS ACOUSTIQUES					COCON			
Nom	Pierret	Loucheu	Roisin	Korostovskiy	Denamur	Bangert	Alaimo	Brognez	Dethier	
Âge	23	23	23	23	23	22	24	25	23 ans	
Sexe	M	F	M	M	M	F	F	M	M	
Formation d'origine	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	
Niveau d'étude actuel	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	
Nombre d'année de pratique architecturale	6	6	5	5	5	0	5	5	5	
A/ Combien de fois avez-vous déjà utilisé la modélisation paramétrique pour un projet d'architecture?	1 à 2 fois	Jamais	Jamais	1 à 2 fois	Jamais	Jamais	1 à 2 fois	1 à 2 fois	1 à 2 fois	
B/ Combien de fois avez-vous déjà utilisé la fabrication digitale pour un projet d'architecture?	1 à 2 fois	Jamais	1 à 2 fois	1 à 2 fois	Jamais	Jamais	Jamais	Jamais	1 à 2 fois	
C/ Habituellement, quelles sont les grandes étapes de votre processus de conception architectural? Quels sont les outils associés à chaque étape?	Etape 1 : Analyse du contexte Etape 2 : Définition des atouts du lieu et des objectifs du projet en lien avec celui ci Etape 3 : Schémas d'idées et organigrammes Etape 4 : Vérification et dimensionnement sur archicad Etape 5 : Confrontation des idées mises en place et mise à jour après auto critique	1. Schémas grandes orientations croquis, 2. Mise en place de l'implantation numériquement (autocad, photoshop), 3. Réflexion sur l'architecture à proprement parlé (croquis -> sketchup -> autocad)	1. Organigramme + crayon 2. Décalquage de prises de vues + esquisse du projet 3. Aménagement des plans + logiciel (ArchiCad) 4. Rendu + logiciels (Artlantis, LumiOn, PhotoShop, LightRoom, etc.)	/	/	Etape 1: Notes + schémas (exemple organigramme) Etape 2: Croquis, plans sur calque et maquette brouillon Etape 3: plans + coupes+ élévations (sur outils informatiques) + maquette brouillon Etape 4: Documents détaillés + perspectives (sur outils informatiques) + maquette à la main	Esquisse au crayon et calques Remise au propre sur pc	1. Références (crayon) 2. Programmation (crayon) 3. Schémas (crayon) 4. Esquisse (crayon +CAD) 5. Projet (CAD)	1 : esquisse croqui (crayon + maquette) 2 : modélisation 3D (Informatique) 3 : modélisation de rendu (Render - Artlantis)	
1/ Par rapport à un processus de conception « traditionnel », la présence des outils de fabrication digitale dans le processus vous oriente vers des formes:	Plus complexes	Plus complexes	Plus complexes	Plus complexes	Plus simples	Plus complexes	Equivalentes	Equivalentes	Equivalentes	
2/ Par rapport à un processus de conception traditionnel, la présence des outils de modélisation paramétrique dans le processus de conception vous oriente vers des formes:	Plus complexes	Plus complexes	Beaucoup plus innovantes	Beaucoup plus innovantes	Plus innovantes	Beaucoup plus innovantes	Equivalentes	Plus innovantes	Plus innovantes	
3/ La modélisation paramétrique vous paraît-elle être un outil adéquat pour modéliser votre projet ?	Adéquat	Peu adéquat	Très adéquat	Adéquat	Peu adéquat	Adéquat	Adéquat	Equivalent	Adéquat	

[illegible]

8/ Le "plan d'algorithme" imaginé vous permet : [De comprendre les étapes de construction de la structure]	2								2	2	2	1
8/ Le "plan d'algorithme" imaginé vous permet : [De créer une modélisation « souple » au changement]	1								1	3	3	2
9/ Pensez-vous qu'il existe des liens entre l'algorithme et les étapes de construction?	Non								Oui	Oui	Oui	Non
Si oui, à quoi pensez-vous?	Nous avons du établir plusieurs prototypes en maquette pour pouvoir nous rendre compte de l'élasticité réelle de notre projet et de la forme qu'elle peut prendre suivant les différentes tensions.	/	/	/	/	/	/	Par exemple, pour notre projet, nous avons pu déterminer quels angles étaient en biseau et d'autres pas, grâce au mécanisme sur Grasshopper	Les plis générés grâce à l'algorithme nous permettent de mieux comprendre comment le construire	On décompose nos formes en première étape et c'est aussi ces formes que l'on doit créer pour le réaliser	/	
10/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau d'innovation global de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?	Plus innovant								Plus innovant	Beaucoup plus innovant	Plus innovant	Plus innovant
11/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau de « constructibilité » de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?	Supérieur								Supérieur	Equivalent	Equivalent	Equivalent
QUESTIONNAIRE N°3												
12/ Ressentez-vous le besoin de fabriquer physiquement votre modèle pour valider vos choix?	Pas tellement								Oui, beaucoup	Oui, beaucoup	Oui, beaucoup	Oui, un peu
13/ Selon vous, la maquette physique vous permettra principalement:	de tester le fonctionnement de chaque version								d'avoir la preuve que le modèle est réalisable; de valider l'esthétique; de tester le fonctionnement de chaque version; de tester un assemblage	de tester le fonctionnement de chaque version; de tester un assemblage	d'avoir la preuve que le modèle est réalisable; de valider l'esthétique	de tester le fonctionnement de chaque version
14/ Pensez-vous que votre modèle 3D est facilement réalisable en maquette physique sans les outils de fabrication digitale?	facilement réalisable								facilement réalisable	facilement réalisable	difficilement réalisable	difficilement réalisable

comment feriez-vous?	exactement de la même façon que pour les maquettes, un patron en toile, le coudre et le mettre en tension	/	On travaille avec l'élasticité et donc avec du tissu. On pourrait utiliser les outils pour réaliser un patron mais on a préféré faire le patron à la main puisque c'est quelque chose d'assez simple (rectangle avec ovale dedans - toujours la même taille).	Notre modèle se porte principalement sur l'élasticité du lycra, il en convient alors de réaliser ce modèle de manière physique et non digitale.	/	maquette en carton	avec tout les outils et matériels de maquette dont on dispose (carton mousse, colle, ficelle, épingle,...)	Il faudrait utiliser différentes machines pour la découpe des triangles et leurs angles en impression 3D tout est réalisé en une seule fois, même si la fabrication est longue.... et parfois peu esthétique.	/
15/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau d'innovation global de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?	Plus innovant	Plus innovant	Equivalent	Plus innovant	/	Plus innovant	Equivalent	Plus innovant	Plus innovant
16/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau de « constructibilité » de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?	Supérieur	Supérieur	Très supérieur	Très supérieur	/	Supérieur	Très supérieur	Supérieur	Inférieur
QUESTIONNAIRE N°4									
17/ Parmi les outils de conception ci-dessous, lequel a le plus favorisé votre créativité? [Le croquis d'esquisse]	1	1	1	1	/	3	1	2	/
17/ Parmi les outils de conception ci-dessous, lequel a le plus favorisé votre créativité? [Les références architecturales]	3	3	2	2	/	2	2	1	/
17/ Parmi les outils de conception ci-dessous, lequel a le plus favorisé votre créativité? [La modélisation 3D sur Grasshopper]	2	2	3	3	/	1	3	3	/
17/ Parmi les outils de conception ci-dessous, lequel a le plus favorisé votre créativité? [Les outils de fabrication digitale]	4	4	4	4	/	4	4	4	/
18/ La modélisation paramétrique vous a permis dans votre projet: [De générer des formes innovantes]	2	1	2	2	/	2	3	2	/
18/ La modélisation paramétrique vous a permis dans votre projet: [De faciliter la fabrication digitale]	3	4	5	5	/	3	1	3	/
18/ La modélisation paramétrique vous a permis dans votre projet: [De faire varier la géométrie facilement]	1	2	1	1	/	4	5	1	/
18/ La modélisation paramétrique vous a permis dans votre projet: [De créer une structure plus constructible]	4	3	4	4	/	1	2	4	/
18/ La modélisation paramétrique vous a permis dans votre projet: [Rien de plus qu'une modélisation traditionnelle]	5	5	3	3	/	5	4	5	/

19/ A ce stade de la conception, quelle est la raison principale qui justifie l'utilisation des outils de fabrication digitale pour votre projet?	Le nombre de prototypes à réaliser est important	Pour réaliser notre modèle, seule la maquette de la chapelle a été réalisée au moyen d'une machine (découpe laser)	Les formes sont complexes	/	/	Les formes sont complexes	Légèrement	Les formes sont complexes	Légèrement	Les éléments sont nombreux et répétitifs	/
20/ Les contraintes des outils de fabrication digitale ont-elles influencé la conception de votre projet? Pouvez-vous dire pourquoi?	Pas du tout	Pas du tout	Pas du tout	/	/	On a travaillé sur un projet qui n'avait pas réellement besoin des outils de fabrication digitale pour fonctionner.	Le temps d'impression 3D étant assez long, on a du adapter la taille et le nombre des modules pour optimiser le temps d'impression	ce n'est pas pour la forme du projet mais plus pour la réalisation en maquette. Nous aurions voulu avoir des prototypes à plus petites échelles en impression 3D, nous avons dû les faire avec des outils traditionnels car l'impression était trop longue.	Fortement		/
21/ Pouvez-vous citer trois principales difficultés rencontrées lors de la fabrication de votre maquette?	nous n'avions pas besoin d'outils de fabrication digitale	La recherche du lycra en magasin, avoir recours à diverses astuces pour tendre les câbles (vis serrantes).	1. trouver la bonne élasticité/la bonne forme, 2. savoir comment accrocher notre structure au lieu, 3. Appliquer notre idée sur Grasshopper sans la dénaturer	/	/		Premièrement, le mécanisme mis en place qui permet de mettre en mouvement le module n'était pas au point, certainement par manque de temps. Deuxièmement, le temps assez long de l'impression 3D. Troisièmement, une fois les modules imprimés en 3D, nous étions obligés de les nettoyer car il y restait toujours des résidus non désirés.		Le temps (impression trop longue), améliorer l'esthétique (pièce mal imprimée), réussir à trouver un mécanisme facile à réaliser pour ouvrir et fermer le module	Le temps, la variation et la coordination	/
22/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau d'innovation global de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?	Plus innovant	Plus innovant	Plus innovant	/	/				Plus innovant	Plus innovant	/
23/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau de "constructibilité" de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?	Supérieur	Supérieur	Très supérieur	/	/		Très supérieur	Supérieur	Supérieur	Equivalent	/
24/ Par rapport à un processus de conception traditionnel, la présence des outils de fabrication digitale dans le processus vous a orienté vers des formes:	Plus complexes	Equivalentes	Plus complexes	/	/		Plus complexes	Plus complexes	Plus complexes	Equivalentes	/

[illegible]

Annexe 30: Réponses des groupes M3 et M4 au questionnaire

Groupe		AILES DU BELIAN					LUSTRE				
Nom	Gonzalez-Vargas	Lesire	Lestrade	Schils Sophie	Taminiaux	Louges	Hoffmann	Vanden Dooren	Wouters		
Âge	22	23	23	23	24	23	25	23	22		
Sexe	F	M	M	M	M	M	M	M	F		
Formation d'origine	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte		
Niveau d'étude actuel	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master 2		
Nombre d'année de pratique architecturale	0	5	5	5	5	5	0	6	4		
A/ Combien de fois avez-vous déjà utilisé la modélisation paramétrique pour un projet d'architecture?	1 à 2 fois	1 à 2 fois	Jamais	1 à 2 fois	Jamais	1 à 2 fois	1 à 2 fois	1 à 2 fois	Jamais		
B/ Combien de fois avez-vous déjà utilisé la fabrication digitale pour un projet d'architecture?	Jamais	Jamais	Jamais	1 à 2 fois	1 à 2 fois	1 à 2 fois	1 à 2 fois	1 à 2 fois	Jamais		
C/ Habituellement, quelles sont les grandes étapes de votre processus de conception architectural? Quels sont les outils associés à chaque étape?	Etape 1 : premières réflexions : croquis à la main Etape 2 : esquisse : croquis et organigramme pour la répartition des fonctions Etape 3 : avant-projet : début du dessin à l'ordinateur et aménagements		Etape 1 : recherches de références + recherches à la main (schémas d'intention crayon) Etape 2 : passage à l'ordinateur pour affiner la conception Etape 3 : recherche des fonctions graphique pour la présentation (à la main) et finalisation des documents (ordinateur)		/		Etape 1: organigram fonctionnel Etape 2: schéma en crayon Etape 3: plan et coupe en crayon Etape 4: plan, coupe, 3D... dessiné en ArchiCad		analyse territoriale - réflexions - diagnostics - croquis - 3D photoshop Schema-plan-3D-maquette physique		1) Etude du milieu: alentours et paramètres intervenant, manquement du territoire,... 2) Terrain même: recherches des points forts alentours, points d'accroche,... (pour la recherche d'implantation et volumétrie) 3) Détails de programmation, recherche des superficies nécessaires 4) Recherche de logique d'aménagement, connexion avec l'extérieur (// étape 2)(Où mettre quoi? travail par zone) 5) Aménagement de l'ensemble 6) Scénarios de vérification pour la fonctionnalité du projet
1/ Par rapport à un processus de conception « traditionnel », la présence des outils de fabrication digitale dans le processus vous oriente vers des formes:	Plus simples	Plus simples	Equivalentes	Equivalentes	Equivalentes	Plus simples	Plus complexes	Plus complexes	Plus complexes		
2/ Par rapport à un processus de conception traditionnel, la présence des outils de modélisation paramétrique dans le processus de conception vous oriente vers des formes:	Equivalentes	Beaucoup plus complexes	Plus complexes	Beaucoup plus complexes	Equivalentes	Plus simples	Plus complexes	Beaucoup plus complexes	Beaucoup plus complexes		
3/ La modélisation paramétrique vous paraît-elle être un outil adéquat pour modéliser votre projet ?	Adéquat	Equivalent	Equivalent	Equivalent	Equivalent	Equivalent	Très adéquat	Adéquat	Equivalent		

[illegible]

8/ Le "plan d'algorithme" imaginé vous permet : [De comprendre les étapes de construction de la structure]	3	1	3	/	/	2	1	1	3
8/ Le "plan d'algorithme" imaginé vous permet : [De créer une modélisation « souple » au changement]	1	3	1	/	/	3	2	3	1
9/ Pensez-vous qu'il existe des liens entre l'algorithme et les étapes de construction?	Oui	Non	Non	/	/	Oui	Oui	Oui	Oui
Si oui, à quoi pensez-vous?									
10/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau d'innovation global de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?	La création des patrons de découpes	/	/	/	/	On garde le même concept mais il a évolué et donc a été légèrement modifié	cela nous donne des premières idées pour la réalisation future	Cela nous permet de penser différemment notre méthode de construction	Les charnières, le système de réalisation
11/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau de « constructibilité » de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?	Plus innovant	Equivalent	Plus innovant	/	/	Equivalent	Plus innovant	Plus innovant	Plus innovant
	Supérieur	Inférieur	Inférieur	/	/	Très supérieur	Très supérieur	Supérieur	Equivalent
QUESTIONNAIRE N°3									
12/ Ressentez-vous le besoin de fabriquer physiquement votre modèle pour valider vos choix?	Oui, un peu	Oui, beaucoup	Oui, beaucoup	Oui, beaucoup	Oui, beaucoup	Oui, beaucoup	Oui, un peu	Oui, beaucoup	/
13/ Selon vous, la maquette physique vous permettra principalement:	d'avoir la preuve que le modèle est réalisable; de tester le fonctionnement de chaque version	de valider l'esthétique	d'avoir la preuve que le modèle est réalisable	d'avoir la preuve que le modèle est réalisable; de valider l'esthétique; de tester un assemblage	d'avoir la preuve que le modèle est réalisable; de valider l'esthétique; de tester un assemblage	d'avoir la preuve que le modèle est réalisable; de valider l'esthétique; de tester un assemblage	d'avoir la preuve que le modèle est réalisable; de valider l'esthétique; de tester le fonctionnement de chaque version	d'avoir la preuve que le modèle est réalisable que le modèle est réalisable	/
14/ Pensez-vous que votre modèle 3D est facilement réalisable en maquette physique sans les outils de fabrication digitale?	facilement réalisable	difficilement réalisable	facilement réalisable	facilement réalisable	facilement réalisable	difficilement réalisable	facilement réalisable	Impossible	/

comment feriez-vous?	l'outil numérique aide à voir le mouvement mais on peut construire sans lui	plusieurs tests en maquette	On n'aurait juste à découper les triangles sans utiliser les patrons	Impression de patrons papier et découpe tissu à la main	dans notre cas, nous pouvons découper du tissu à la main et l'assembler assez facilement	/	essayer avec les découpe laser	/	/
15/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau d'innovation global de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?	Plus innovant	Plus innovant	Equivalent	Plus innovant	Plus innovant	Plus innovant	Plus innovant	Plus innovant	/
16/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau de « constructibilité » de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?	Inférieur	Equivalent	Equivalent	Equivalent	Equivalent	Supérieur	Equivalent	Supérieur	/
QUESTIONNAIRE N°4									
17/ Parmi les outils de conception ci-dessous, lequel a le plus favorisé votre créativité? [Le croquis d'esquisse]	2	3	2	1	/	4	2	3	/
17/ Parmi les outils de conception ci-dessous, lequel a le plus favorisé votre créativité? [Les références architecturales]	1	1	1	3	/	1	3	4	/
17/ Parmi les outils de conception ci-dessous, lequel a le plus favorisé votre créativité? [La modélisation 3D sur Grasshopper]	3	2	3	2	/	3	4	2	/
17/ Parmi les outils de conception ci-dessous, lequel a le plus favorisé votre créativité? [Les outils de fabrication digitale]	4	4	4	4	/	2	1	1	/
18/ La modélisation paramétrique vous a permis dans votre projet: [De générer des formes innovantes]	3	2	3	2	/	2	3	1	/
18/ La modélisation paramétrique vous a permis dans votre projet: [De faciliter la fabrication digitale]	2	5	1	4	/	5	4	4	/
18/ La modélisation paramétrique vous a permis dans votre projet: [De faire varier la géométrie facilement]	1	1	2	1	/	1	2	2	/
18/ La modélisation paramétrique vous a permis dans votre projet: [De créer une structure plus constructible]	4	3	4	3	/	3	5	3	/
18/ La modélisation paramétrique vous a permis dans votre projet: [Rien de plus qu'une modélisation traditionnelle]	5	4	5	5	/	4	1	5	/

19/ A ce stade de la conception, quelle est la raison principale qui justifie l'utilisation des outils de fabrication digitale pour votre projet?	Les éléments sont nombreux et répétitifs	Le nombre de prototypes à réaliser est important	/	Les formes sont complexes	Les éléments sont nombreux et répétitifs	Le nombre de prototypes à réaliser est important	/
20/ Les contraintes des outils de fabrication digitale ont-elles influencé la conception de votre projet?	Légèrement	Légèrement	Fortement	/	Pas du tout	Fortement	/
Pouvez-vous dire pourquoi?	On avait plus facile pour réaliser les formes et pour les fabriquer	modèle complexe	Le temps imparti rendait difficile la génération aléatoire des formes	0	Non Car on pensait à l'idée avant le programme	Sans ces outils de fabrication, il nous aurait été difficile de réaliser notre projet	/
21/ Pouvez-vous citer trois principales difficultés rencontrées lors de la fabrication de votre maquette?	L'échelle petite pour les raccords entre les toiles	les patrons - jonction des formes - système d'accroche miniature	Patrons (échelle), coutures, système câbles miniatures	la liaison entre les tissus pour qu'il ne se déchire pas, cette liaison serait plus facile à réaliser en taille réelle qu'en taille réduite, créer le mouvement par un "mécanisme" et créer le site!	Le système mécanique Les charnières	L'élaboration des différents prototypes. Le calibrage de la découpeuse laser qu'il fallait modifier.	/
22/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau d'innovation global de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?	Plus innovant	Plus innovant	Plus innovant	Plus innovant	Plus innovant	Beaucoup plus innovant	/
23/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau de "constructibilité" de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?	Supérieur	Supérieur	Equivalent	Equivalent	Equivalent	Supérieur	/
24/ Par rapport à un processus de conception traditionnel, la présence des outils de fabrication digitale dans le processus vous a orienté vers des formes:	Plus complexes	Equivalentes	Equivalentes	Equivalentes	Plus complexes	Plus complexes	/

25/ Par rapport à un processus de conception traditionnel, la présence des outils de modélisation paramétrique dans le processus vous a orienté vers des formes:	Plus complexes	Equivalentes	Plus complexes	Plus complexes	Plus complexes	/	Plus complexes	Plus complexes	Plus complexes	/
26/ Êtes-vous satisfait de votre projet?	4	5	4	4	4	/		5	5	/
Pouvez-vous dire pourquoi?	Je suis fier du résultat pour le travail investi	résultat à la hauteur de nos espérances	Manque de temps pour développer le concept à fond			/	Nous sommes contents d'avoir concrétiser notre objet	Nous avons réalisé quelque chose que nous pensions impossible a réaliser au debut du workshop		/

Annexe 31: Réponses des groupes N1 et N2 au questionnaire

GROUPE	DESERT						WOOD CAVE			
	Goffard	Calderon	Martins	Chen	Mertes	Lemaire				
NOM										
Âge	25	25	23	23	23	24				
Formation d'origine	Architecture	Architecture	Ingénieur Construction	Architecture	Architecture	Ingénieur Construction				
Niveau d'étude actuel	Master 2	Master2	Master 2	License 3	Master2	Master 2				
Nombre d'année de pratique architecturale	5	5	0	3	5	0,5				
A/ Combien de fois avez-vous déjà utilisé la modélisation paramétrique pour un projet d'architecture?	3	1	1	1	0	0				
B/ Combien de fois avez-vous déjà utilisé la fabrication digitale pour un projet d'architecture?	6	0	0	1	1	0				
C/ Habituellement, quelles sont les grandes étapes de votre processus de conception architectural? Quels sont les outils associés à chaque étape?	Esquisse / Modélisation Géométrique / Modélisation ??	Recherche de référence (Internet, livres, etc...) // Programme Excel // Schéma fonctionnel (crayon)/ Distribution de l'espace (Autocad) // Plans et volumétrie (Autocad, Sketchup ou archicad)	/	Schéma Fonctionnel (crayon)/ Forme (sketchup + CAD) / Mise à jours / Représentation	1/Schéma (calques + Canyons) 2/Esquisses (Archicad) 3/Mise au propre sur Archicad 4/Image de Synthèse + Doc finaux sur archicad	/				
QUESTIONNAIRE N°1										
1/ Par rapport à un processus de conception « traditionnel », la présence des outils de fabrication digitale dans le processus vous oriente vers des formes:	Plus complexes	Plus simples	Sans impact	Plus complexes	Plus complexes	Plus complexes				
2/ Par rapport à un processus de conception traditionnel, la présence des outils de modélisation paramétrique dans le processus de conception vous oriente vers des formes:	Plus complexes	Beaucoup plus complexes	Plus simples	Plus complexes	Sans impact	Plus complexes				
3/ La modélisation paramétrique vous paraît-elle être un outil adéquat pour modéliser votre projet ?	Assez adéquat	Peu adéquat	Peu adéquat	Assez adéquat	Assez adéquat	Assez adéquat				
Pouvez-vous donner la ou les raison(s)?	Changement de structure et de dimensions sans recommencer le modèle	/	/	/	- Modifications simple de certains paramètres - Possibilité de tester facilement différentes variantes	Formes courbes paramétrables, volume « creusant » paramétrable				
4/ A ce stade de la conception, quelle est la raison principale qui justifie l'utilisation des outils de fabrication digitale à la fin du processus pour votre projet?	Le nombre de prototypes à réaliser est important	Les formes sont complexes	Les éléments sont nombreux et répétitifs	Les formes sont complexes	Les formes sont complexes	Les formes sont complexes				
5/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau d'innovation global de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?	Equivalent	Plus innovant	Plus innovant	Plus innovant	Plus innovant	Plus innovant				
6/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau de « constructibilité » de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?	Supérieur	Supérieur	Equivalent	Supérieur	Supérieur	Equivalent				
7/ Avez-vous déjà réfléchi à une manière possible de construire votre projet à l'échelle 1:1?	Oui	Oui	Non	Non	Non	Oui				
Si oui, pouvez-vous la décrire brièvement?	Ordre de montage des pièces	Réalisation avec des éléments modulaires qui économisent les coûts et le temps de construction	/	/	/	/				
QUESTIONNAIRE N°2										

8/ Le "plan d'algorithme" imaginé vous permet : [De mettre en place les étapes de la modélisation]	2	3	3	3	3	2
8/ Le "plan d'algorithme" imaginé vous permet : [De comprendre les étapes de construction de la structure]	3	2	2	2	1	3
8/ Le "plan d'algorithme" imaginé vous permet : [De créer une modélisation « souple » au changement]	1	1	1	1	2	1
9/ Pensez-vous qu'il existe des liens entre l'algorithme et les étapes de construction ? Si oui, à quoi pensez-vous ?	Oui	oui	Oui et Non	Oui	non	oui
	Etapas de construction / Assemblage des pièces	Dépend de l'ordre et les étapes qu'on modélise, on doit penser aussi comment on va construire	On peut un algorithme en tenant compte des étapes de construction mais on peut le faire sans aussi	/	/	/
10/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau d'innovation global de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels ?	Plus innovant	Equivalent	Equivalent	Plus innovant	Plus innovant	Plus innovant
11/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau de « constructibilité » de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels ?	supérieur	supérieur	Equivalent	supérieur	supérieur	Equivalent
	0	0	0	0	0	0
QUESTIONNAIRE N°3						
12/ Ressentez-vous le besoin de fabriquer physiquement votre modèle pour valider vos choix ?	Pas tellement	Oui, un peu	Pas tellement	Pas tellement	Oui, un peu	Oui, un peu
13/ Selon vous, la maquette physique vous permettra principalement :	D'avoir la preuve que le modèle est réalisable De valider l'esthétique	De tester un assemblage De valider l'esthétique	De tester un assemblage De valider l'esthétique	De tester le fonctionnement de chaque version	D'avoir la preuve que le modèle est réalisable De valider l'esthétique De tester un assemblage	-De valider l'esthétique -De tester un assemblage
14/ Pensez-vous que votre modèle 3D est facilement réalisable en maquette physique sans les outils de fabrication digitale ? comment feriez-vous ?	Difficilement réalisable	Difficilement réalisable	Difficilement réalisable	Difficilement réalisable	Impossible	Difficilement réalisable
	Embaucher des ouvriers clandestins	/	On ne le ferait pas	/	P/	/
15/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau d'innovation global de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels ?	Plus innovant	Plus innovant	Equivalent	Plus innovant	Plus innovant	Plus innovant
16/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau de « constructibilité » de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels ?	Très supérieur	Equivalent	Equivalent	Supérieur	Supérieur	Supérieur
QUESTIONNAIRE N°4						
17/ Parmi les outils de conception ci-dessous, lequel a le plus favorisé votre créativité ? [Le croquis d'esquisse]	/	1	2	3	4	4
17/ Parmi les outils de conception ci-dessous, lequel a le plus favorisé votre créativité ? [Les références architecturales]	/	2	1	4	1	3
17/ Parmi les outils de conception ci-dessous, lequel a le plus favorisé votre créativité ? [La modélisation 3D sur Grasshopper]	/	3	3	1	3	1

17/ Parmi les outils de conception ci-dessous, lequel a le plus favorisé votre créativité? [Les outils de fabrication digitale]	/	4	4	2	2	2
18/ La modélisation paramétrique vous a permis dans votre projet: [De générer des formes innovantes]	/	5	2	3	1	
18/ La modélisation paramétrique vous a permis dans votre projet: [De faciliter la fabrication digitale]	/	3	3	2	4	
18/ La modélisation paramétrique vous a permis dans votre projet: [De faire varier la géométrie facilement]	/	1	1	1	3	
18/ La modélisation paramétrique vous a permis dans votre projet: [De créer une structure plus constructible]	/	2	5	4	2	
18/ La modélisation paramétrique vous a permis dans votre projet: [Rien de plus qu'une modélisation traditionnelle]	/	4	4	5	5	
19/ A ce stade de la conception, quelle est la raison principale qui justifie l'utilisation des outils de fabrication digitale pour votre projet?	Les éléments sont nombreux et répétitifs	Les éléments sont nombreux et répétitifs	Les éléments sont nombreux et répétitifs	Les formes sont complexes	Les formes sont complexes	Les formes sont complexes
20/ Les contraintes des outils de fabrication digitale ont-elles influencé la conception de votre projet?	légèrement	légèrement	légèrement	légèrement	légèrement	légèrement
Pouvez-vous dire pourquoi?	/	Il faut penser en un bâtiment paramétrique	On a fait en fonction de ce que l'on connaît	/	Choix d'une structure paramétrique	/
21/ Pouvez-vous citer trois principales difficultés rencontrées lors de la fabrication de votre maquette?	Assemblage des pièces	Problèmes des exportation principalement Problème d'échelle Problèmes de découpe laser (n'as pas coupé correctement)	1/ La création du fichier pour la découpe laser 2/ Problèmes de découpe 3/ Paramètres physiques incohérents	Problèmes avec Grashopper	Utilisation de Grashopper Temps imparti pour réaliser le projet Passage d'un logiciel à un autre	-Assemblage des éléments -Liaison entre les panneaux -Collage de certaines parties
22/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau d'innovation global de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?	Plus innovant	Plus innovant	Equivalent	Equivalent	Plus innovant	Plus innovant
23/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau de "constructibilité" de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?	Très supérieur	Très supérieur	Equivalent	Supérieur	Supérieur	Supérieur
24/ Par rapport à un processus de conception traditionnel, la présence des outils de fabrication digitale dans le processus vous a orienté vers des formes:	Plus complexes	Sans impact	Plus simple	Plus simple	Plus complexes	Plus complexes
25/ Par rapport à un processus de conception traditionnel, la présence des outils de modélisation paramétrique dans le processus vous a orienté vers des formes:	Beaucoup plus complexes	Plus complexes	Sans impact	Beaucoup plus complexes	Plus complexes	Plus complexes
26/ Êtes-vous satisfait de votre projet?	Satisfait	Satisfait	Satisfait	Très satisfait	Satisfait	Très satisfait
Pouvez-vous dire pourquoi?	Bonne cohésion de groupe Rendu final satisfaisant	Le projet est simple mais on a travaillé sur la texture. La découpe permet de faire plus facilement des éléments répétitifs	La découpe laser est plus simple et de meilleur qualité	/	Quelques problèmes de modélisation paramétrique sur Grashopper mais travail satisfaisant pour une semaine de conception	/

Annexe 32: Réponses des groupes N3 et N4 au questionnaire

GROUPE		TUILES FIORD				ORIGAMIQUE		
NOM		Hoffman	Huang	Ravry	Topuzova	Lakhdar	Canarelli	Sauvage
Âge		22	22	23	24	26	22	23
Formation d'origine		Ingénieur Construction	Architecture	Architecture	Architecture	Architecture	Ingénieur Construction	Architecture
Niveau d'étude actuel		Master 2	Master 2	Master 2	Master 2	Master2	Master 2	Master 2
Nombre d'année de pratique architecturale		0	5	6	4,5	7	1	5
A/ Combien de fois avez-vous déjà utilisé la modélisation paramétrique pour un projet d'architecture?		0	0	0	0	0	0	2
B/ Combien de fois avez-vous déjà utilisé la fabrication digitale pour un projet d'architecture?		0	0	3	3	0	0	4
C/ Habituellement, quelles sont les grandes étapes de votre processus de conception architectural? Quels sont les outils associés à chaque étape?		1/Schéma fonctionnel 2/ Esquisses dimensions 3/ Etude structure 4/ Modification des plans	1/ Schéma fonctionnel (crayon) 2/Diviser les espaces et aménager le plan 3/Faire des petites maquettes pour concevoir l'espace	1/ Idée (crayon) 2/ Calque Crayon 3/Ordinateur Cao 4/Ordinateur Rendu	1/ Visite de site et analyse 2/Schéma fonctionnel implantation (crayon) 3/ Conception en plan, coupe (autocad, crayon) 4/Travail en 3D + Archicad; Sketchup	Analyse- Programmation-Etude du concept	/	Recherche/Analyse/ Concept/Processus de Projet/Fin de projet
QUESTIONNAIRE N°1								
1/ Par rapport à un processus de conception « traditionnel », la présence des outils de fabrication digitale dans le processus vous oriente vers des formes:		Plus complexes	Sans impact	Plus complexes	Plus complexes	Beaucoup plus complexes	/	Sans impacts
2/ Par rapport à un processus de conception traditionnel, la présence des outils de modélisation paramétrique dans le processus de conception vous oriente vers des formes:		Plus complexes	Plus simples	Plus complexes	Plus complexes	Beaucoup plus complexes	/	Plus complexes
3/ La modélisation paramétrique vous paraît-elle être un outil adéquat pour modéliser votre projet ?		Assez adéquat	Peu adéquat	Peu adéquat	Assez adéquat	Très adéquat	/	Assez adéquat
Pouvez-vous donner la ou les raison(s)?		Trames dans le modèle de structure et objets répétitifs	/	L'outil paramétrique peut amener à des formes sans sens architectural	Formes complexes	Car cela nous permet de générer facilement plusieurs variantes	/	Modification et production de variantes du projet sans limites dans la mesure où les variables définies rentrent en jeu
4/ A ce stade de la conception, quelle est la raison principale qui justifie l'utilisation des outils de fabrication digitale à la fin du processus pour votre projet?		Les éléments sont nombreux et répétitifs	Les formes sont complexes	Les éléments sont nombreux et répétitifs	Les formes sont complexes	Les éléments sont nombreux et répétitifs	/	Les éléments sont nombreux et répétitifs
5/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau d'innovation global de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?		Plus innovant	Plus innovant	Equivalent	Plus innovant	Plus innovant	/	Plus innovant
6/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau de « constructibilité » de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?		Equivalent	Très supérieur	Equivalent	Equivalent	Equivalent	/	Supérieur
7/ Avez-vous déjà réfléchi à une manière possible de construire votre projet à l'échelle 1:1?		Oui	Je ne sais pas	Je ne sais pas	Je ne sais pas	non	/	Je ne sais pas
Si oui, pouvez-vous la décrire brièvement?		Modification des paramètres sous Grasshopper	/	/	/	/	/	/
QUESTIONNAIRE N°2								

8/ Le "plan d'algorithme" imaginé vous permet : [De mettre en place les étapes de la modélisation]	3	2	3	2	3	2	2	/	2
8/ Le "plan d'algorithme" imaginé vous permet : [De comprendre les étapes de construction de la structure]	1	1	1	1	1	1	1	/	3
8/ Le "plan d'algorithme" imaginé vous permet : [De créer une modélisation « souple » au changement]	2	3	2	3	3	3	3	/	1
9/ Pensez-vous qu'il existe des liens entre l'algorithme et les étapes de construction?	Oui	oui	oui	non	non	non	non	/	Oui
Si oui, à quoi pensez-vous?		L'algorithme c'est la logique de construire la maquette numérique et c'est peut-être comme une simulation de construction d'un bâtiment réel (mais pas forcément)	La manière de créer l'algorithme permet de projeter la construction	/	/	/	/	/	/
10/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau d'innovation global de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?	Plus innovant	Plus innovant	Equivalent	Plus innovant	Plus innovant	Plus innovant	Plus innovant	/	Plus innovant
11/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau de « constructibilité » de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?	Equivalent	supérieur	Equivalent	Equivalent	Equivalent	supérieur	supérieur	/	supérieur
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
QUESTIONNAIRE N°3									
12/ Ressentez-vous le besoin de fabriquer physiquement votre modèle pour valider vos choix?	Pas tellement	Oui, beaucoup	Oui, un peu	Oui, beaucoup	Oui, beaucoup	Oui, beaucoup	Oui, beaucoup	/	Oui, un peu
13/ Selon vous, la maquette physique vous permettra principalement:	D'avoir la preuve que le modèle est réalisable De tester un assemblage	D'avoir la preuve que le modèle est réalisable	D'avoir la preuve que le modèle est réalisable	De tester le fonctionnement de chaque version De tester un assemblage	D'avoir la preuve que le modèle est réalisable -De tester un assemblage	D'avoir la preuve que le modèle est réalisable -De tester un assemblage	D'avoir la preuve que le modèle est réalisable -De tester un assemblage	/	D'avoir la preuve que le modèle est réalisable -De tester un assemblage
14/ Pensez-vous que votre modèle 3D est facilement réalisable en maquette physique sans les outils de fabrication digitale?	Difficilement réalisable	Je ne sais pas	Je ne sais pas	Impossible	Difficilement réalisable	Difficilement réalisable	Difficilement réalisable	/	Difficilement réalisable
comment feriez-vous?	/	/	/	/	/	/	/	/	/
15/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau d'innovation global de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?	Plus innovant	Plus innovant	Equivalent	Equivalent	Equivalent	Plus innovant	Plus innovant	/	Plus innovant
16/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau de « constructibilité » de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?	Equivalent	Inférieur	Equivalent	Equivalent	Equivalent	Supérieur	Supérieur	/	Supérieur
QUESTIONNAIRE N°4									
17/ Parmi les outils de conception ci-dessous, lequel a le plus favorisé votre créativité? [Les croquis d'esquisse]	2	1	1	3	4	4	4	/	2
17/ Parmi les outils de conception ci-dessous, lequel a le plus favorisé votre créativité? [Les références architecturales]	3	3	2	1	3	3	3	/	1
17/ Parmi les outils de conception ci-dessous, lequel a le plus favorisé votre créativité? [La modélisation 3D sur Grasshopper]	4	2	3	2	2	2	2	/	3

17/ Parmi les outils de conception ci-dessous, lequel a le plus favorisé votre créativité? [Les outils de fabrication digitale]	1	4	4	4	1	/	4
18/ La modélisation paramétrique vous a permis dans votre projet: [De générer des formes innovantes]	1	3	2	3	3	/	4
18/ La modélisation paramétrique vous a permis dans votre projet: [De faciliter la fabrication digitale]	4	2	4	4	2	/	3
18/ La modélisation paramétrique vous a permis dans votre projet: [De faire varier la géométrie facilement]	3	1	1	1	1	/	1
18/ La modélisation paramétrique vous a permis dans votre projet: [De créer une structure plus constructible]	2	4	5	5	4	/	2
18/ La modélisation paramétrique vous a permis dans votre projet: [Rien de plus qu'une modélisation traditionnelle]	5	5	3	2	5	/	5
19/ A ce stade de la conception, quelle est la raison principale qui justifie l'utilisation des outils de fabrication digitale pour votre projet?	Les formes sont complexes	Très	Les éléments sont nombreux et répétitifs Le nombre de prototypes à réaliser est important	Les formes sont complexes	les éléments sont nombreux et répétitifs	/	Les formes sont complexes
20/ Les contraintes des outils de fabrication digitale ont-elles influencé la conception de votre projet?	légèrement	Fortement	pas du tout	légèrement	pas du tout	/	Fortement
Pouvez-vous dire pourquoi?	/	/	/	/	Car les solutions techniques adoptées nous a permis d'éviter toutes les contraintes techniques liées aux outils de fabrication digitale	/	Pouvoir « prototyper » rapidement
21/ Pouvez-vous citer trois principales difficultés rencontrées lors de la fabrication de votre maquette?	Difficultés d'assemblage à cause des courbes et de la distance entre portiques + Problème d'échelle	Trouver les séquences des tuiles Trouver les sens des plaques prendre en compte l'épaisseur de la plaque	Différence maquette 3D / Réalité Visualisation de construction non équivalente	Différences maquette 3D / Réalité	- La jonction entre les différentes parois// Rassembler les pièces non numérotées // La conformité	/	- L'assemblage - Formes variées - Délais
22/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau d'innovation global de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?	Plus innovant	Equivalent	Moins innovant	Equivalent	Plus innovant	/	Plus innovant
23/ A ce stade de la conception, à combien estimez-vous le niveau de "constructibilité" de votre projet par rapport aux projets réalisés dans des processus de conceptions traditionnels?	Inférieur	Supérieur	Très inférieur	Equivalent	Supérieur	/	Supérieur
24/ Par rapport à un processus de conception traditionnel, la présence des outils de fabrication digitale dans le processus vous a orienté vers des formes:	Plus complexes	Beaucoup plus complexes	/	Sans impact	Plus complexes	/	Plus complexes
25/ Par rapport à un processus de conception traditionnel, la présence des outils de modélisation paramétrique dans le processus vous a orienté vers des formes:	Plus complexes	Beaucoup plus complexes	/	Plus complexes	Plus complexes	/	Plus complexes
26/ Êtes-vous satisfait de votre projet?	Satisfait	Satisfait	/	Pas satisfait	Très satisfait	/	Très satisfait
Pouvez-vous dire pourquoi?	Globalement conforme à l'idée de départ + Mélange d'éléments imprimés en 3D avec des éléments découpés au laser	Nous avons réalisé ce que nous voulions faire	/	/	Car j'ai acquis une nouvelle expérience de conception et de fabrication digitale et surtout la génération de différentes variantes pour le même projet	/	Les différents tests ont validé la constructibilité

Annexe 33: Processus de conception des étudiants montois interrogés le 11/02/2017

	Etape 1	Etape 2	Etape 3	Etape 4	Etape 5	Outils mentionnés
	Légende:	 Croquis / Esquisses (au crayon)	 Modélisation 3D / Rendus	 Maquette physique	 Logiciels CAD (Archicad / Autocad)	
E1	Analyse du contexte	Définition des atouts du lieu et des objectifs du projet en lien avec celui-ci	Schémas d'idées et organigrammes	Vérification et dimensionnement sur archicad	Confrontation des idées mises en place et mise à jour après auto critique	
E2	Schémas grandes orientations croquis	Mise en place de l'implantation numériquement (autocad, photoshop)	Réflexion sur l'architecture à proprement parlé (croquis -> sketchup -> autocad)	/	/	
E3	Organigramme	Décalquage de prises de vues (esquisse du projet)	Aménagement des plans (ArchiCad)	Rendu (Artlantis, LumiOn, PhotoShop, LightRoom, etc.)	/	
E4	/	/	/	/	/	/
E5	/	/	/	/	/	/
E6	Organigramme (Notes + schémas)	Croquis, plans sur calque et maquette brouillon	Plans, coupes, élévations (sur outils informatiques) + maquette brouillon	Documents détaillés + perspectives (sur outils informatiques) + maquette à la main	/	
E7	Esquisse au crayon et calques	Remise au propre sur pc	/	/	/	
E8	Références	Programmation (crayon)	Schémas (crayon)	Esquisse (crayon + CAD)	Projet (CAD)	
E9	Esquisses et croquis (crayon + maquette)	Modélisation 3D (Informatique)	Modélisation de rendu (Render - Artlantis)	/	/	
E10	Premières réflexions (croquis à la main)	Esquisse : croquis et organigramme pour la répartition des fonctions	Avant-projet : début du dessin à l'ordinateur et aménagements	/	/	
E11	Recherches de références + recherches à la main (schémas d'intention crayon)	Passage à l'ordinateur pour affiner la conception	Recherche graphique pour la présentation (à la main) et finalisation des documents (ordinateur)	/	/	
E12	/	/	/	/	/	/
E13	/	/	/	/	/	/
E14	/	/	/	/	/	/
E15	Organigramme fonctionnel	Schéma (crayon)	Plan et coupe (crayon)	Plan, coupe, 3D,..(ArchiCad)	/	

E16	Analyse territoriale	Réflexions	Diagnostics	Croquis	3D photoshop	
E17	Schema	Plan	3D	Maquette physique	/	
E18	Etude du milieu: alentours et paramètres intervenant, manquement du territoire,...	Terrain même: recherches des points forts alentours, points d'accroche,... (pour la recherche d'implantation et volumétrie)	Détails de programmation, recherche des surfaces nécessaires	Recherche de logique d'aménagement, connexion avec l'extérieur (// étape 2) Zonage	Aménagement de l'ensemble Scénarios de vérification pour la fonctionnalité du projet	/

Annexe 34: Processus de conception des étudiants Nancéiens interrogés le 06/02/2017

	Etape 1	Etape 2	Etape 3	Etape 4	Etape 5	Outils mentionnés
	Légende:	 Croquis / Esquisses (au crayon)	 Modélisation 3D / Rendus	 Maquette physique	 Logiciels CAD (Archicad / Autocad)	
E1	Esquisse	Modélisation géométrique	Modélisation Objet	/	/	
E2	Recherche de références (livres, internet, etc...)	Programme (excel)	Schéma fonctionnel (crayon)	Distribution de l'espace (autocad)	Plans et volumétries (Autocad, Sketchup ou Archicad)	
E3	/	/	/	/	/	/
E4	Schéma fonctionnel (crayon)	Forme (sketchup +CAD)	Mise à jours	Réprésentation	/	
E5	Schéma (Calques + Crayons)	Esquisses (Archicad)	Mise au propre (Archicad)	Image de synthèse+ Docs finaux sur Archicad	/	
E6	/	/	/	/	/	/
E7	Schéma fonctionnel	Esquisses dimensions	Etude structure	Modification des plans	/	/
E8	Schéma fonctionnel (crayon)	Diviser les espaces et aménager le plan	Faire des petites maquettes pour concevoir l'espace	/	/	
E9	Idées (crayon)	Calques (crayon)	CAO	Rendus (ordinateur)	/	
E10	Visite de site et analyse	Schéma fonctionnel implantation (crayon)	Conception en plan (autocad, archicad, crayon)	Travail en 3D (Archicad +Sketchup)	/	
E11	Analyse	Programmation	Etude du concept	/	/	/
E12	/	/	/	/	/	/
E13	Recherche	Analyse	Concept	Processus de projet	Fin de projet	/

Annexe 35: réponse à la question 3/ du questionnaire par les participants

Réponses	MONS	NANCY
Très adéquat	- « L'exploration de formes » - « La possibilité de changer la conception sans tout recommencer » - « Pour la dynamique du projet »	- « Car cela nous permet de générer facilement plusieurs variantes »
Adéquat	- « Avoir aisément des variantes du projet » - « Expérimenter rapidement des essais » - « Modifier la forme facilement tout au long du processus » - « Permet l'intégration de contraintes » - « Modification plus faciles à toute étape du projet »	- « Modifications simple de certains paramètres » - « Possibilité de tester facilement différentes variantes » - « Changement de structure et de dimensions sans recommencer le modèle » - « Formes courbes paramétrables » - « Trames dans le modèle de structure et objets répétitifs » - « Formes complexes » - « Modification et production de variantes du projet sans limites dans la mesure où les variables définies entrent en jeu »
Sans impact	- « Très bien mais parait encore fort impossible de mon point de vue, donne une vision futur du possible. De nouvelles formes oui mais point de vue structure et ingénierie comment gérer ceci? » - « Dans l'état actuel de ma maitrise du logiciel, la modélisation paramétrique demande beaucoup de temps. » - « Je ne me sens pas encore capable de réaliser tout ce que je souhaite avec cet outil. »	/
Peu adéquat	- « Pas assez de maitrise des outils paramétriques ce qui nous bloque rapidement dans notre réalisation »	- « L'outil paramétrique peut amener à des formes sans sens architectural »

Annexe 36: réponse à la question 21/ concernant les principales difficultés rencontrées

MONS	NANCY
L'échelle petite pour les raccords entre les toiles	Assemblage des pièces
Les patrons Jonction des formes Système d'accroche miniature	Problèmes des exportation principalement Problème d'échelle Problèmes de découpe laser (n'as pas coupé correctement)
Patrons (échelle), coutures , système câbles miniatures	La création du fichier pour la découpe laser Problèmes de découpe Paramètres physiques incohérents
Le système mécanique	Problèmes avec Grasshopper
Les charnières	Utilisation de Grasshopper Temps imparti pour réaliser le projet Passage d'un logiciel à un autre
Trouver le bon type de perçement, arriver à voir une structure assez rigide, effectuer les coutures	Assemblage des éléments Liaison entre les panneaux Collage de certaines parties
La recherche du lycra en magasin Avoir recours à diverses astuces pour tendre les câbles (vis serrantes).	Difficultés d'assemblage à cause des courbes et de la distance entre portiques Problème d'échelle
Le mécanisme mis en place qui permet de mettre en mouvement le module n'était pas au point, certainement par manque de temps Le temps assez long de l'impression 3D Une fois les modules imprimés en 3D, nous étions obligés de les nettoyer car il y restait toujours des résidus non désirés.	Trouver les séquences des tuiles Trouver les sens des plaques Pendre en compte l'épaisseur de la plaque
Choix du matériau Découpage Trouver le motif de découpe	Différence maquette 3D / Réalité Visualisation de construction non équivalente
Le temps (impression trop longue) Améliorer l'esthétique (pièce mal imprimée) Réussir à trouver un mécanisme facile à réaliser pour ouvrir et fermer le module	Différences maquette 3D / Réalité
Trouver la bonne élasticité/la bonne forme Savoir comment accrocher notre structure au lieu Appliquer notre idée sur Grasshopper sans la dénaturer	La jonction entre les différentes parois Rassembler les pièces non numérotées La conformité
La liaison entre les tissus pour qu'il ne se déchire pas, cette liaison serait plus facile à réaliser en taille réelle qu'en taille réduite Créer le mouvement par un "mécanisme" et créer le site.	L'assemblage Formes variées Délais

