

---

## Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : De la modélisation à la matérialisation : enjeux cognitifs des artefacts dans le processus de conception architecte

**Auteur :** Roosen, Florent

**Promoteur(s) :** de Boissieu, Aurélie

**Faculté :** Faculté des Sciences appliquées

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

**Année académique :** 2025-2026

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/26077>

---

### 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.*

---

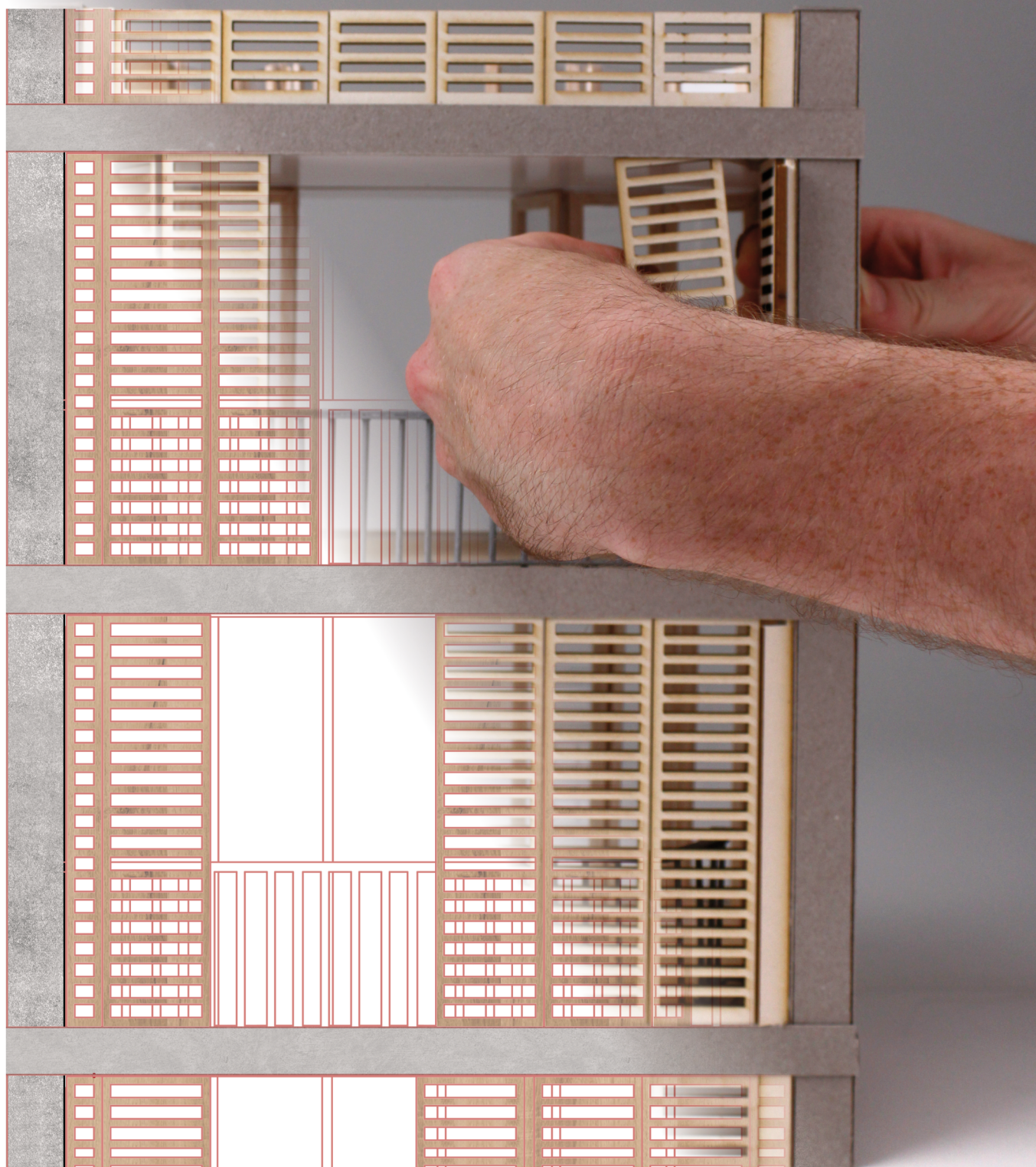
# DE LA MODÉLISATION À LA MATÉRIALISATION

ENJEUX COGNITIFS DES ARTEFACTS DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION ARCHITECTURALE

UNIVERSITÉ DE LIÈGE - FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

PROMOTRICE : AURÉLIE DE BOISSIEU

FLORENT ROOSEN



**ANNÉE ACADÉMIQUE 2025 - 2026**

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU GRADE : INGÉNIEUR CIVIL ARCHITECTE



# **DE LA MODÉLISATION À LA MATÉRIALISATION**

**ENJEUX COGNITIFS DES ARTEFACTS DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION ARCHITECTURALE**

**JURY : AURÉLIE DE BOISSIEU ; CATHERINE ELSSEN ; GAËLLE BAUDOUX**

**UNIVERSITÉ DE LIÈGE - FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES**

**PROMOTRICE : AURÉLIE DE BOISSIEU**

**FLORENT ROOSEN**

**ANNÉE ACADÉMIQUE 2025 - 2026**

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU GRADE : INGÉNIEUR CIVIL ARCHITECTE**





# **REMERCIEMENTS**

Je tiens tout d'abord à remercier ma promotrice, Aurélie de Boissieu, pour son temps, ses conseils avisés et ses nombreuses relectures pendant la réalisation de ce travail. Sans nos multiples réunions, ce travail n'aurait jamais pu aboutir sous cette forme. Je tiens également à la remercier pour les opportunités professionnelles qu'elle a pu m'offrir, et ce, tout au long de mon parcours académique.

Je remercie les membres de mon jury pour leur temps et l'intérêt porté à ce travail. En particulier, je tiens à remercier Madame Catherine Elsen, professeure responsable de l'Atelier IV, sans qui ce travail n'aurait pas pu voir le jour.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont joué le jeu de mes entretiens et qui ont participé aux questionnaires. Chers tous·tes, ce mémoire a pu voir le jour grâce au temps que vous m'avez bénévolement accordé et vos réponses précises.

Je souhaite également exprimer toute ma gratitude à toi, Anh, d'être à mes côtés depuis 7 ans, et pour tes nombreuses relectures affutées, sans qui des pans entiers de ce mémoire ne seraient que poussière, en particulier dans les aspects liés à la psychologie.

Merci à ma famille, papa, maman et mes amis pour leur soutien durant tout mon parcours académique, et bien plus encore. Merci Cha, pour ta bonne humeur perpétuelle, merci Jade, pour tes messages réconfortants

Je remercie le personnel du Fab52, Antonio, Antoine et Mathieu pour leur soutien dévoué durant l'écriture de ce mémoire, ainsi que pour la fourniture d'un espace dédié à mes entretiens.

Merci à mes patientes zéro, Améline et Nina, pour le temps consacré à la relecture de mes questions peu claires. Merci Alex, pour ton soutien, ta musique et nos nombreux échanges. Merci Mélanie, pour le stress partagé et ton aide tout au long du quadrimestre.

Enfin, je voudrais remercier toutes les personnes de ma promotion qui m'ont aidé, de près ou de loin, dans la rédaction de ce mémoire.

Notice sur l'intelligence artificielle : Les IA Gemini et Perplexity ont été utilisées comme des outils d'assistance à la recherche d'articles scientifiques adaptés et de correction orthographique. L'ensemble du travail de recherche et de rédaction reste personnel.

# **RÉSUMÉ**

Ce travail a pour objectif d'investiguer les modèles architecturaux numériques et les maquettes physiques tels qu'utilisés par les étudiant-es en architecture, afin d'étudier leurs rôles dans le processus de conception. Il s'inscrit dans la continuité de nombreux travaux de recherche, interrogeant l'évolution des artefacts de conception au prisme des nouveaux outils numériques de l'architecte.

Ce mémoire déploie une recherche qualitative, divisée en deux phases : une enquête par questionnaire suivie d'entretiens collectifs rétrospectifs. L'enquête par questionnaire a permis d'évaluer l'usage des modèles numériques et des maquettes physiques auprès des étudiant-es de bachelier et master de l'Université de Liège ainsi que de l'Université de Paris La Villette. Les entretiens collectifs rétrospectifs ont été menés avec des groupes de conception de l'Atelier IV organisé en première master à l'Université de Liège, et avaient pour objectif d'analyser le processus de conception mis en place par ces groupes, en particulier les artefacts et outils utilisés. Lors de ces entretiens, ce travail s'est appuyé sur une méthode originale de co-construction des données, tout en évaluant la charge cognitive des étudiant-es afin d'affiner la compréhension des mécanismes sous-jacents.

Les résultats obtenus démontrent que tant les maquettes physiques de travail que les modèles numériques sont des artefacts essentiels à la conception d'un projet d'architecture. Leur combinaison permet aux étudiant-es d'atteindre les meilleures solutions, grâce aux qualités propres aux deux environnements. Alors que les maquettes physiques sont délaissées par les étudiant-es, les résultats de ce mémoire montrent que leur usage est susceptible d'induire un changement de perception positif sur le projet. Ce travail met également en évidence les caractéristiques que devraient prendre les maquettes physiques issues des procédés de fabrication numérique pour véritablement participer à la conception des projets d'architecture.

Ces résultats corroborent les travaux de recherche précédents, et ouvrent la perspective d'une pédagogie du projet architectural par l'artefact physique, permettant d'en révéler toutes les qualités.

# **ABSTRACT**

This thesis aims to explore the usage and purposes of architectural physical and digital artefacts, as used by architecture students, from designing to manufacturing. This study builds on previous research, examining the evolution of design artefacts through the lens of architects' new digital tools.

This work uses a two-step qualitative research methodology. Firstly, a questionnaire survey was used to assess the usage of physical and digital models among bachelor and master's students from ULiège and ENSA Paris la Villette. Secondly, retrospective group interviews were held with design groups from Atelier IV, the architectural workshop of first master at ULiège in architectural engineering. They allow for analysis of the design process and artefacts used. This research developed an original method of research data co-construction, whilst assessing cognitive load to better understand underlying causes.

The results show that both physical and digital models are essential artefacts for the design of an architectural project. The combination of the two artefacts is an efficient strategy to mitigate both shortcomings of each environment. Physical artefacts are too often overlooked, and this work demonstrates that promoting their usage in pedagogical setting can lead to a positive shift of perception of these artefacts. In addition, this work highlights the features that models from digital fabrication should demonstrate to be included in the design phases.

These findings align with previous research and call for a physical artefact-based pedagogical setting, thereby revealing all their qualities to students.

# **TABLE DES MATIERES**

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Remerciements.....                                                          | 3  |
| Résumé .....                                                                | 4  |
| Abstract.....                                                               | 5  |
| Table des matières .....                                                    | 6  |
| Table des illustrations .....                                               | 8  |
| Chapitre 1 Introduction .....                                               | 11 |
| Chapitre 2 État de l’art .....                                              | 13 |
| 2.1 La conception en architecture .....                                     | 14 |
| 2.1.1 Définir la conception .....                                           | 14 |
| 2.1.2 Modèles théoriques de la conception architecturale .....              | 16 |
| 2.1.3 Apports des sciences cognitives.....                                  | 19 |
| 2.2 Les représentations externes, outils de conception architecturale ..... | 25 |
| 2.2.1 Enjeux des représentations externes .....                             | 25 |
| 2.2.2 Enjeux des maquettes physiques.....                                   | 26 |
| 2.2.3 Enjeux de l’environnement numérique .....                             | 28 |
| 2.3 La fabrication numérique & prototypage rapide .....                     | 32 |
| 2.3.1 De la fabrication numérique au continuum conception-fabrication.....  | 32 |
| 2.3.2 Encourager le continuum conception-fabrication.....                   | 34 |
| Chapitre 3 Questions de recherche .....                                     | 37 |
| Chapitre 4 Méthodologie .....                                               | 41 |
| 4.1 Méthodologie de recherche.....                                          | 42 |
| 4.2 La recherche qualitative .....                                          | 43 |
| 4.3 L’enquête par questionnaire.....                                        | 44 |
| 4.3.1 Premier questionnaire.....                                            | 44 |
| 4.3.2 Second questionnaire .....                                            | 46 |
| 4.4 Entretien rétrospectif approfondi.....                                  | 47 |
| 4.5 Traitement et analyse des données .....                                 | 54 |
| Chapitre 5 Résultats .....                                                  | 55 |
| 5.1 Résultats du questionnaire.....                                         | 56 |
| 5.1.1 Première cohorte .....                                                | 56 |
| 5.1.2 Deuxième cohorte.....                                                 | 57 |
| 5.1.3 Troisième cohorte .....                                               | 58 |
| 5.1.4 Quatrième cohorte.....                                                | 59 |



|                    |                                                                                                                                                                                                                                                         |     |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1.5              | Cinquième cohorte .....                                                                                                                                                                                                                                 | 60  |
| 5.1.6              | Tendances générales – Ateliers d’architecture .....                                                                                                                                                                                                     | 61  |
| 5.1.7              | Tendances générales – Avis des étudiant-es.....                                                                                                                                                                                                         | 62  |
| 5.2                | Résultats des entretiens.....                                                                                                                                                                                                                           | 63  |
| 5.2.1              | Outils utilisés dans la conception .....                                                                                                                                                                                                                | 63  |
| 5.2.2              | Cours d’ingénierie des ambiances urbaines .....                                                                                                                                                                                                         | 65  |
| 5.2.3              | Cours d’Atelier IV .....                                                                                                                                                                                                                                | 69  |
| 5.2.4              | Charge cognitive pendant le processus de conception .....                                                                                                                                                                                               | 97  |
| Chapitre 6         | Discussion .....                                                                                                                                                                                                                                        | 101 |
| 6.1                | À l’ère de l’information, quels rôles pour les maquettes physiques dans la conception architecturale ? Les modèles numériques pourraient-ils remplacer les maquettes physiques ?<br>102                                                                 |     |
| 6.1.1              | Influence du cadre pédagogique.....                                                                                                                                                                                                                     | 102 |
| 6.1.2              | Quels rôles pour les maquettes physiques ? .....                                                                                                                                                                                                        | 103 |
| 6.1.3              | Quels rôles pour les modèles numériques ?.....                                                                                                                                                                                                          | 106 |
| 6.2                | Pourquoi la maquette physique de travail est-elle moins utilisée par les étudiant-es en conception architecturale ? Pourquoi se limiter à des maquettes de communication ? Comment encourager un retour à la matérialité ? .....                        | 109 |
| 6.2.1              | La maquette de jury a-t-elle tué la maquette de conception ? .....                                                                                                                                                                                      | 109 |
| 6.2.2              | Encourager un retour à la matérialité par la fabrication numérique ?.....                                                                                                                                                                               | 110 |
| 6.3                | Quelle est la charge cognitive des étudiant-es lors du processus de conception ? Cette charge pourrait-elle être diminuée à l’aide des maquettes physique de travail et du continuum conception-fabrication à l’échelle de la maquette physique ? ..... | 114 |
| 6.3.1              | Charge cognitive pendant le processus de conception .....                                                                                                                                                                                               | 114 |
| 6.3.2              | Cas particuliers.....                                                                                                                                                                                                                                   | 116 |
| 6.3.3              | Les maquettes de travail au service de la créativité .....                                                                                                                                                                                              | 117 |
| 6.3.4              | Quelle charge cognitive pour le continuum conception-fabrication ? .....                                                                                                                                                                                | 118 |
| 6.4                | Limites .....                                                                                                                                                                                                                                           | 119 |
| Chapitre 7         | Conclusion .....                                                                                                                                                                                                                                        | 121 |
| Bibliographie..... |                                                                                                                                                                                                                                                         | 123 |

# **TABLE DES ILLUSTRATIONS**

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 – Le village Indien par Ch. Alexander dans De la Synthèse de la Forme (1971) .....                                                                                                                                                                                                                                           | 16 |
| Figure 2 – Modèle en spirale de Zeisel, dans Silvestri (2009) .....                                                                                                                                                                                                                                                                   | 17 |
| Figure 3 – Le modèle de la cognition externe, tiré de Safin (2025).....                                                                                                                                                                                                                                                               | 19 |
| Figure 4 – Représentation de l'état de « flow » par Csíkszentmihályi dans Mille (2021) .....                                                                                                                                                                                                                                          | 20 |
| Figure 5 – Les capacités de la mémoire de travail sont occupées par les trois dimensions de la charge cognitive, tiré de Krieglstein et al. (2022) .....                                                                                                                                                                              | 21 |
| Figure 6 – Modes d'échanges fondamentaux de la conception : la perception et la représentation, tiré de Silvestri (2009) .....                                                                                                                                                                                                        | 23 |
| Figure 7 – Temps de détection des participant-es avec différents niveaux de représentation des objets dans l'étude de Korisky & Mudrik (2021) .....                                                                                                                                                                                   | 24 |
| Figure 8 – Comparaison des 3 modalités : objet physique, photo en couleur et dessin au trait. Sur la gauche, pourcentage moyen de bonne reconnaissance des objets présentés pour les 3 modalités. Sur la droite, pourcentage moyen d'erreurs de reconnaissance des objets présentées pour les 3 modalités, de Snow et al. (2014)..... | 24 |
| Figure 9 – Exposition de maquettes du projet de la tour CCTV à Beijing, dans Yaneva (2013).....                                                                                                                                                                                                                                       | 26 |
| Figure 10 – Objectifs fréquemment cités pour les prototypes, d'après Camburn et al. (2017) ...                                                                                                                                                                                                                                        | 27 |
| Figure 11 – Le projet SEEK, une architecture machine, par Negroponte (1975) .....                                                                                                                                                                                                                                                     | 33 |
| Figure 12 – Schéma méthodologique.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 42 |
| Figure 13 – La façade avant du MMIL et le laminoir « Dothée », telle que présentée par Elsen (2025) .....                                                                                                                                                                                                                             | 48 |
| Figure 14 – Analyse du processus de conception tel que proposé par Baudoux (2023), page 133 .....                                                                                                                                                                                                                                     | 50 |
| Figure 15 – Analyse du processus de conception tel que proposé par Collin (2017), page 89 ....                                                                                                                                                                                                                                        | 51 |
| Figure 16 – Ligne du temps telle que proposée en entretien aux groupes .....                                                                                                                                                                                                                                                          | 51 |
| Figure 17 – Questions proposées dans le questionnaire de Klepsch et al. (2017).....                                                                                                                                                                                                                                                   | 53 |
| Figure 18 – Questions proposées dans l'entretien rétrospectif approfondi .....                                                                                                                                                                                                                                                        | 53 |
| Figure 19 – Grille de codage vierge .....                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 54 |
| Figure 20 – Utilisation des modèles numériques, maquettes physiques et méthodes de fabrication par les répondant-es .....                                                                                                                                                                                                             | 61 |
| Figure 21 – Raisons d'utilisation des modèles numériques 3D.....                                                                                                                                                                                                                                                                      | 61 |
| Figure 22 – Avis des étudiant-es sur les maquettes physiques .....                                                                                                                                                                                                                                                                    | 62 |
| Figure 23 – Avis des étudiant-es sur les machines de fabrication numériques .....                                                                                                                                                                                                                                                     | 62 |
| Figure 24 – Page d'accueil de Concept du groupe n°3 .....                                                                                                                                                                                                                                                                             | 63 |
| Figure 25 – Capture d'écran de l'interface du projet Rayon du groupe n°3 .....                                                                                                                                                                                                                                                        | 63 |
| Figure 26 – Dessin des éléments de la maquette du groupe n°3 sur AutoCAD en vue de leur découpe au laser.....                                                                                                                                                                                                                         | 64 |
| Figure 27 – Grille de Codage pour le groupe n°1 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 65 |
| Figure 28 – Analyse sensible réalisée par le groupe n°1 .....                                                                                                                                                                                                                                                                         | 66 |
| Figure 29 – Grille de codage de la 1 <sup>ère</sup> phase-clé pour le groupe n°1 .....                                                                                                                                                                                                                                                | 66 |
| Figure 30 – Masterplan du groupe n°1, semaine 7 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 66 |
| Figure 31 – Grille de codage de la 2 <sup>ème</sup> phase-clé pour le groupe n°1 .....                                                                                                                                                                                                                                                | 67 |
| Figure 32 – Modèle SketchUp utilisé par le groupe n°1.....                                                                                                                                                                                                                                                                            | 67 |
| Figure 33 – Plans présentées par le groupe n°1 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 67 |
| Figure 34 – Volumétrie Revit embellie par le groupe n°1 .....                                                                                                                                                                                                                                                                         | 67 |

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 35 – Grille de codage de la 3 <sup>ème</sup> phase-clé pour le groupe n°1 .....                     | 68 |
| Figure 36 – Rendus IA du groupe n°1 .....                                                                  | 68 |
| Figure 37 – Grille de Codage du groupe n°2.....                                                            | 69 |
| Figure 38 – Grille de codage de la 1 <sup>ère</sup> phase-clé pour le groupe n°2 .....                     | 71 |
| Figure 39 – Grille de codage de la 2 <sup>ème</sup> phase-clé pour le groupe n°2 .....                     | 71 |
| Figure 40 – L’une des façades du projet du groupe n°2, produite pour le Jury final .....                   | 72 |
| Figure 41 – Le plan du rez-de-chaussée du groupe n°2, produit pour le Jury final .....                     | 72 |
| Figure 42 – L’un des rendus du groupe n°2, produit pour le Jury final .....                                | 72 |
| Figure 43 – Maquette produite pour le jury par le groupe n°2.....                                          | 73 |
| Figure 44 – Grille de codage de la 3 <sup>ème</sup> phase-clé pour le groupe n°2 .....                     | 73 |
| Figure 45 – Evaluation de la charge cognitive sur les 3 phases-clé du projet, groupe n°2.....              | 74 |
| Figure 46 – Grille de Codage du groupe n°3.....                                                            | 75 |
| Figure 47 – Analyse du programme et ébauche de graphe d’adjacence du groupe n°3.....                       | 76 |
| Figure 48 – Liste de références partagées entre les étudiant-es du groupe n°3 .....                        | 76 |
| Figure 49 – L’une des maquettes de travail du groupe n°3 insérée dans son contexte .....                   | 76 |
| Figure 50 – Grille de codage de la 1 <sup>ère</sup> phase-clé pour le groupe n°3 .....                     | 77 |
| Figure 51 – Schémas de principe en volumétrie présentés au pré-jury par le groupe n°3 .....                | 77 |
| Figure 52 – Trame structurelle définie par les étudiant-es lors de la 6 <sup>ème</sup> semaine .....       | 77 |
| Figure 53 – Grille de codage de la 2 <sup>ème</sup> phase-clé pour le groupe n°3 .....                     | 78 |
| Figure 54 – Collage produit par les étudiant-es du groupe n°3 en vue du Jury .....                         | 78 |
| Figure 55 – Grille de codage de la 3 <sup>ème</sup> phase-clé pour le groupe n°3 .....                     | 79 |
| Figure 56 – Panneaux présentés par le groupe n°3 au jury.....                                              | 79 |
| Figure 57 – Maquette volumétrique présentée par le groupe n°3 lors du jury, insérée dans son contexte..... | 79 |
| Figure 58 – Maquette en coupe présentée par le groupe n°3 lors du jury .....                               | 80 |
| Figure 59 – Evaluation de la charge cognitive sur les 3 phases-clé du projet, groupe n°3.....              | 80 |
| Figure 60 – Grille de Codage du groupe n°4.....                                                            | 81 |
| Figure 61 – Analyse du programme par le groupe n°4 .....                                                   | 82 |
| Figure 62 – Croquis en perspective du groupe n°4 (S8) .....                                                | 82 |
| Figure 63 – Deuxième maquette de travail du groupe n°4, insérée dans la maquette de site .....             | 82 |
| Figure 64 – Deuxième maquette de travail du groupe n°4 .....                                               | 82 |
| Figure 65 – Grille de codage de la première phase-clé pour le groupe n°4 .....                             | 83 |
| Figure 66 – Grille de codage de la 2 <sup>ème</sup> phase-clé pour le groupe n°4 .....                     | 83 |
| Figure 67 – Plans et coupes issus de Revit, présentés au pré-jury par le groupe n°4.....                   | 84 |
| Figure 68 – Grille de codage de la 3 <sup>ème</sup> phase-clé pour le groupe n°4 .....                     | 84 |
| Figure 69 – Façades dessinées à la main par le groupe n°4 lors de la semaine 11 et 12.....                 | 84 |
| Figure 70 – Planches présentées par le groupe n°4 au jury.....                                             | 85 |
| Figure 71 – Maquette pour le jury final du groupe n°4 .....                                                | 85 |
| Figure 72 - Evaluation de la charge cognitive sur les 3 phases-clé du projet, groupe n°4 .....             | 85 |
| Figure 73 – Grille de Codage du groupe n°5.....                                                            | 86 |
| Figure 74 – L’une des maquettes de travail du groupe n°5, avec ombres portées.....                         | 87 |
| Figure 75 – Modèle numérique SketchUp produit en parallèle de la maquette de travail en mousse .....       | 87 |
| Figure 76 – Grille de codage de la 1 <sup>ère</sup> phase-clé pour le groupe n°5 .....                     | 88 |
| Figure 77 – Grille de codage de la 2 <sup>ème</sup> phase-clé pour le groupe n°5 .....                     | 88 |
| Figure 78 – L’un des rendus produit par le groupe n°5 .....                                                | 89 |
| Figure 79 – Grille de codage de la 3 <sup>ème</sup> phase-clé pour le groupe n°5 .....                     | 89 |
| Figure 80 – Maquette pour le jury final du groupe n°5 .....                                                | 89 |

|                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 81 - Evaluation de la charge cognitive sur les 3 phases-clé du projet, groupe n°5 .....                 | 90  |
| Figure 82 – Grille de Codage du groupe n°6.....                                                                | 91  |
| Figure 83 – Grille de codage de la 1 <sup>ère</sup> phase-clé pour le groupe n°6 .....                         | 92  |
| Figure 84 – Esquisse en volumétrie du groupe n°6 (S4) .....                                                    | 92  |
| Figure 85 – Maquette de travail du groupe n°6 (S5) .....                                                       | 92  |
| Figure 86 – Grille de codage de la 2 <sup>ème</sup> phase-clé pour le groupe n°6 .....                         | 93  |
| Figure 87 – Maquette de travail du groupe n°6 (S5) .....                                                       | 93  |
| Figure 88 – Grille de codage de la 3 <sup>ème</sup> phase-clé pour le groupe n°6 .....                         | 94  |
| Figure 89 – L’une des planches présentées par le groupe n°6 au jury final .....                                | 94  |
| Figure 90 – Maquette présentée par le groupe n°6 au jury final.....                                            | 95  |
| Figure 91 – Maquette présentée au jury final par le groupe n°6 ; détail de façade.....                         | 95  |
| Figure 92 - Evaluation de la charge cognitive sur les 3 phases-clé du projet, groupe n°6 .....                 | 95  |
| Figure 93 – Semaines où des données sont disponibles .....                                                     | 97  |
| Figure 94 – Évolution moyenne des trois aspects de la charge cognitive pour les groupes d’atelier IV .....     | 97  |
| Figure 95 – évolution de la charge cognitive totale pour les 5 groupes d’atelier IV .....                      | 98  |
| Figure 96 – Charge cognitive intrinsèque pour les 6 groupes d’atelier IV .....                                 | 99  |
| Figure 97 – Charge cognitive extrinsèque pour les 5 groupes d’atelier IV .....                                 | 99  |
| Figure 98 – Charge cognitive germane pour les 5 groupes d’atelier IV .....                                     | 99  |
| Figure 99 – Charge cognitive totale pour les 5 groupes d’atelier IV .....                                      | 99  |
| Figure 100 – Quel optimum entre le niveau de détail et le temps imparti dans la création d’une maquette ?..... | 112 |
| Figure 101 – Quelles caractéristiques pour les modèles issus du prototypage rapide ? .....                     | 113 |
| Figure 102 – Évolution de la charge cognitive totale pour les deux catégories de groupes .....                 | 114 |
| Figure 103 – Comparaison de la charge cognitive totale entre le groupe n°4 et le groupe n°6 ..                 | 117 |
| Figure 104 – Optimum à atteindre pour les modèles issus du continuum conception fabrication .....              | 118 |

# Chapitre 1 INTRODUCTION

*« Il est de la responsabilité de tous de veiller à ce que les  
nouveaux moyens de diffusion de l'information se traduisent  
par un enrichissement, et non un appauvrissement du  
patrimoine culturel mondial »*

*Pierre Jolliot, Chercheur au CNRS*

Depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle, le développement fulgurant des ordinateurs a fait entrer notre société dans l'ère de l'information (Carpo, 2017). Dans ce contexte, la pratique de l'architecture s'est vue transformée par l'avènement du numérique : de la *Conception Assistée par Ordinateur* au *BIM*, en passant par la *conception computationnelle*. Ces technologies redéfinissent la relation entre le·a concepteur·rice et le projet d'architecture, en offrant des possibilités infinies de simulation, de visualisation, de coordination et de précision sans précédent (Carpo, 2017). Les étudiant·es en architecture sont à l'avant-garde de ces pratiques numériques, échappant aux contraintes organisationnelles ou économiques (Baudoux, 2023).

Les maquettes physiques sont utilisées par les architectes depuis l'apparition de la profession (Estévez, 2014). Par leur dimension tridimensionnelle et tangible, elles engagent automatiquement la perception visuelle et motrice, facilitant ainsi l'appréhension spatiale des volumes. Ce sont des objets à la fois sensibles, sensoriels et porteurs de la trace des opérations qui les ont façonnés (Cristia et al., 2018; Estévez, 2014). Or, au fil de mon parcours académique à l'Université de Liège, ainsi que lors de mon séjour Erasmus à l'ENSA Paris la Villette, j'ai pu observer que les maquettes étaient bien souvent délaissées par de nombreux étudiant·es. Plus précisément, ce sont les maquettes *de travail* qui sont les plus abandonnées. Les maquettes *de jury*, imposées par les consignes pédagogiques, sont quant à elles réalisées dans la douleur des charrettes la veille du jury, et participent rarement au processus de conception des projets. Autour de moi, de nombreux étudiant·es expriment leur lassitude vis-à-vis de ces livrables, qui demandent toujours trop de temps pour peu de résultats. Ces mêmes étudiant·es valorisent les modèles numériques, perçus comme une solution moins chronophage et énergivore. Personnellement, ce constat m'attriste et m'a amené à me poser la question suivante : pourquoi les étudiant·es d'architecture semblent-ils délaissier la maquette physique en général ? Quels rôles les prototypes physiques peuvent-ils encore jouer à l'ère de l'information ?

Parallèlement, l'émergence des technologies de fabrication numérique promettait de combler le fossé entre les modèles numériques et les maquettes physiques par la création d'un continuum conception-fabrication (Mansouri, 2026). Ces machines promettaient de redéfinir la matérialisation des modèles numériques. Ayant la chance d'être étudiant moniteur au Fab52 de l'université de Liège depuis 3 années, j'ai pu constater que ces machines de fabrication numérique restent actuellement souvent cantonnées à la production de maquettes de présentation demandées pendant les jurys finaux. Les étudiant·es ont bien intégré les machines de fabrication dans leurs processus, mais c'est presque seulement dans le but de sortir une version achevée et soignée de leurs projets. Dès lors, peut-on en conclure que la promesse du continuum conception-fabrication n'est pas encore d'actualité pour les étudiant·es ? Comment ces artefacts sont-ils mobilisés par les étudiant·es ?

Ce mémoire s'inscrit dans la continuité de nombreux travaux portant sur différents ateliers d'architecture, à l'instar des études menés par Collin (2017), Kuppens (2020), Baudoux (2019), Mahy (2020). Ce sont ces questionnements personnels qui m'ont amené à me lancer dans cette recherche, qui sera articulée autour d'un état de l'art approfondi, suivi de la définition de plusieurs questions de recherche et d'une collecte de données empirique menée directement auprès des premiers concernés, les étudiant·es en architecture.

## Chapitre 2    ÉTAT DE L'ART

*« Si une image vaut mille mots, un prototype vaut mille  
réunions »*

*David Kelley, Scénariste*



## 2.1 LA CONCEPTION EN ARCHITECTURE

La conception architecturale constitue un champ d'étude vaste. Ce travail n'a pas pour ambition d'en dresser une définition exhaustive, une démarche qui exigerait à elle seule un ou plusieurs ouvrages entiers (Lawson, 1990). Néanmoins, dans la mesure où la conception architecturale est le socle fondamental qui sous-tend l'ensemble de nos réflexions, nous tenterons d'en définir les contours au moyen de trois définitions complémentaires. Enfin, nous examinerons plusieurs modèles théoriques visant à décrire l'activité de conception, avant d'enrichir cette approche par les apports spécifiques de la psychologie cognitive.

### 2.1.1 Définir la conception

Silvestri (2009, p. 29) définit la conception architecturale comme étant « **un processus dirigé vers un résultat qui n'existe pas encore** » soulignant ainsi que la finalité du processus est la production de nouveauté. Selon Silvestri (2009), la conception vise donc à répondre à une demande, une motivation à concevoir, qu'elle soit *interne* ou *externe* à l'esprit du concepteur-riche. Sans être une recherche formelle exploratoire, cet acte conscient et volontaire naît d'un « *état de nécessité, afin de satisfaire des besoins et [...] un ensemble très puissant de contraintes* » (Silvestri, 2009, p. 30) Ces contraintes sont à la fois à la base du projet au travers du programme, guident la génération d'idées et servent de référence pour l'évaluation des solutions proposées (Safin, 2011).

Une seconde approche, proposée par Jones (1986), définit la conception comme un « **processus qui vise à amorcer un changement dans les artefacts humains** » (Traduit de l'anglais, Jones, 1986, p. 5). Cette notion d'*artefacts* est centrale, signifiant étymologiquement « objet de l'art » (Baudoux, 2023). Le concept d'*artefact* contient une ambiguïté entre les *outils* et les *représentations externes*. Les outils sont définis par Lefort dans Elsen (2011) comme « *tout élément matériel ou logiciel utilisé par l'opérateur pour agir sur un autre élément* » (Lefort 1982, in Elsen 2011, p. 38). Les *représentations externes* sont le résultat de l'utilisation de ces *outils* (Elsen, 2011). Dans le cadre de ce mémoire, le mot *artefact* sera utilisé pour désigner les *représentations externes* produites lors du processus de conception architecturale. Selon Rabardel (1997) ils peuvent être une esquisse, une boule de papier, une idée, une émotion, pourvu qu'ils soient le produit de l'activité humaine. Selon Leroi-Gourhan (1965), les outils permettent d'externaliser des fonctions corporelles ou mentales. Par exemple, le couteau étend les capacités de la main, tandis que l'écriture et l'ordinateur étendent celles de la pensée (Leroi-Gourhan, 1965). Ainsi, les objets de la conception peuvent être analysés sous ce prisme. Les *artefacts* servent à externaliser la pensée des concepteur-rices dans le monde réel. Face à la complexité d'une idée, l'esprit humain fait face à des limites et à un « coût cognitif », que Kirsh (2010) appelle « *cost of projection* », c'est-à-dire l'effort que devra développer le cerveau afin de manipuler cette idée. L'idée est donc « *matérialisée* » en *représentations externes* une fois que ce coût cognitif requis pour gérer cette idée devient trop élevé (Kirsh, 2010). Ces représentations de ces idées permettent de libérer des ressources cognitives, qui peuvent être utilisées pour la production de nouvelles idées (Kirsh, 2010).

Une troisième définition provient de Baudoux (2023), où la conception y est définie comme « **la spécification d'un artefact [...] apporté en réponse à un objectif donné** » (Baudoux, 2023, p. 21). La conception ne se limite donc pas à une transformation d'un *artefact* ; elle apporte de l'information, de la précision en les spécifiant. Les possibilités et impossibilités conceptuelles sont rendues visibles à l'esprit par ces spécifications (Kirsh, 2010). Les concepteur·rices produisent donc des *artefacts*, des *représentations externes*. Ces *représentations externes* produites introduisent de nouvelles *représentations internes* par leur perception, de nouveaux schémas de pensée, formant ainsi une boucle, le processus de conception entre l'esprit et l'objet matériel. Cette interaction entre l'esprit et la *représentation externe* offre des opportunités de fonctionnement unique vis-à-vis d'une projection seule de l'esprit, le tout pour un coût cognitif drastiquement réduit (Kirsh, 2010). Au-delà de leur rôle de support de l'esprit, les *artefacts* sont aussi des objets en évolution. Au fil de l'évolution du projet, l'esprit réduit l'incertitude de l'expression graphique des artefacts (Lebahar, 1983). Lorsque le niveau de définition de l'objet en voie de conception devient trop élevé vis-à-vis de l'artefact, une nouvelle *représentation externe* est produite, plus détaillée (Kuppens, 2020; Lebahar, 1983). Ce nouvel artefact permettra une nouvelle interaction avec l'objet de la conception, relançant ainsi la boucle. Par exemple, l'architecte passe d'une esquisse floue à une esquisse à l'échelle, puis au plan au 1/500<sup>e</sup>, puis au 1/100<sup>e</sup> et ainsi de suite.

Au-delà de ces définitions, il convient de s'interroger sur la nature même des actes posés par les concepteur·rices. Lebahar (1983, p. 13) envisage la conception comme une : « *conduite utilisant la représentation graphique comme un ensemble de moyens adaptés à la recherche de solutions posé par le problème de définition et de dimensionnement d'un objet* » (Lebahar, 1983, p. 13). Le terme « *conduite* » renvoie ici à la définition de Piaget (1949, p. 18), désignant un « *acte déployé à l'extérieur ou intériorisé en pensée* » renvoyant ainsi à la notion d'externalisation abordée plus tôt. Selon Lebahar (1983), l'acte fondamental de la conception consiste donc en la *définition et le dimensionnement d'objets*. Ceci résonne avec la thèse de Boudon et al. (1994). Selon ces auteurs, l'échelle est l'opération fondamentale de la conception (Boudon et al., 1994). Elle est à la fois ce qui mesure et ce qui est mesuré. L'échelle de Boudon et al. est ici à différencier de son sens profane. Dans leur ouvrage, Boudon et al. (1994) ont identifié 20 *échelles* différentes visant à définir et à dimensionner des objets. Citons par exemple les *échelles technique* (la dimension par un élément technique), *fonctionnelle* (dimension par l'usage, la fonction) ou encore *humaine*. Ces échelles interagissent entre elles et se juxtaposent pour former le projet d'architecture (Boudon et al., 1994). Dans la définition des objets, des formes particulières sont produites, qui sont ensuite *perçues* et *interprétées*. Puisque toutes les formes contiennent une part d'ambiguïté et peuvent évoquer à l'esprit des éléments dépassant la géométrie seule : c'est ce que Silvestri (2019) nomme une *émergence*.

### 2.1.2 Modèles théoriques de la conception architecturale

Les modèles de la conception peuvent être catégorisés en 4 familles : linéaire, cyclique, itérative et itérative convergente (Stals, 2019) et répondent à 3 activités : la *structuration du problème*, la *génération de solutions* et l'*évaluation des solutions* (Baudoux, 2023). Nous allons détailler ces modèles au prisme de ces trois activités dans les paragraphes suivants.

#### Structuration du problème

La *structuration du problème* consiste en la **décomposition du problème en sous-entités de sorte à pouvoir se construire une image mentale de ce problème** (Schön, in Baudoux, 2023). Un premier angle d'analyse du processus de conception architecturale est donc de l'envisager comme un processus de résolution de problèmes (Alexander, 1971; Lebahar, 1983). Cela est notoirement le cas du village indien, l'exemple phare de l'essai *De la Synthèse des Formes* de Alexander (1971). L'auteur y défend une vision mathématique du processus de conception ; où les variables interdépendantes sont explicitées afin de séparer le problème en sous-ensembles indépendants. Ces sous-ensembles sont ensuite **résolus séparément, puis combinés** entre eux afin d'obtenir une solution la plus optimale en regard de ses variables propres (Alexander, 1971). La conception est ainsi rendue linéaire, de la définition du problème à la solution finale. Cette vision organisée se heurte toutefois à la **difficulté de combiner** les différents sous-ensembles (Boudon et al., 1994).

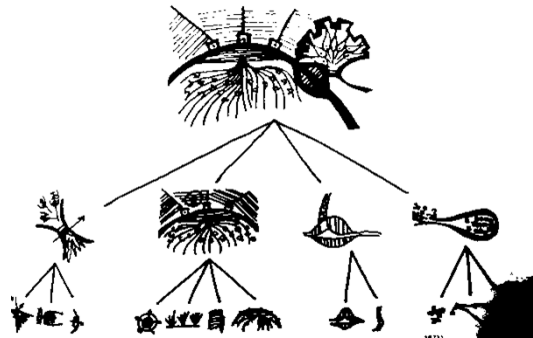


Figure 1 – Le village Indien par Ch. Alexander dans *De la Synthèse de la Forme* (1971)

#### Génération de solutions

La *génération de solutions* renvoie au processus d'**idéation**. Selon Briggs & Reinig (2010), cité par Baudoux (2023, p. 33) « l'idéation est le processus de génération des idées utiles pour atteindre un état ou un résultat est désiré ». Selon Baudoux (2023), la génération des solutions peut se faire selon trois mécanismes de raisonnement : (1) la référence à des connaissances générales du domaine, (2) l'application de raisonnements d'analogie à des connaissances hors du domaine de référence et (3) la redécouverte du projet au travers de ces représentations (Baudoux, 2023). Une **analogie** est une « **ressemblance** » établie par l'**imagination** (Baudoux, 2023). Le raisonnement par analogie est le raisonnement d'induction qui établit la ressemblance entre les objets de pensée (Baudoux, 2023). Il peut faire appel à des souvenirs stockés dans la mémoire des concepteur·rices ou bien à des supports externes (Silvestri, 2009). C'est donc une « *stratégie de conception puissante, puisqu'elle peut apporter des connaissances précieuses d'une situation connue à la situation de conception mal définie* » (Leclercq & Heyligen, 2002, p. 2). Dans leur livre *S, M, L, XL*, Koolhaas et al. (1997) ajoutent qu'il n'y a pas de façon de déterminer à priori si une analogie est bonne ou mauvaise (Koolhaas et al., 1997). Puisque les analogies doivent être

testées, le raisonnement par analogie fonctionne de pair avec le raisonnement essai-erreur (Silvestri, 2009). L'esprit rationnel intervient alors pour vérifier et corriger les analogies spontanées (Baudoux, 2023). Cette phase de vérification s'inscrit dans une dynamique plus large : la redécouverte du projet par la nouvelle perception des artefacts précédemment produits implique **un fonctionnement itératif**. Les concepteur·rices suivent un processus séquentiel au sein duquel **la solution proposée se précise progressivement, en se confrontant aux contraintes initiales et aux solutions précédentes** (Baudoux, 2023; Silvestri, 2009). Par exemple, le modèle en spirale de Zeisel (2006) décrit une boucle convergente en spirale, où chaque itération converge un peu plus vers la solution finale (voir Figure 2). Ce cheminement se structure ainsi autour de phases successives d'analyse, de synthèse et d'évaluation (Silvestri, 2009; Zeisel, 2006).

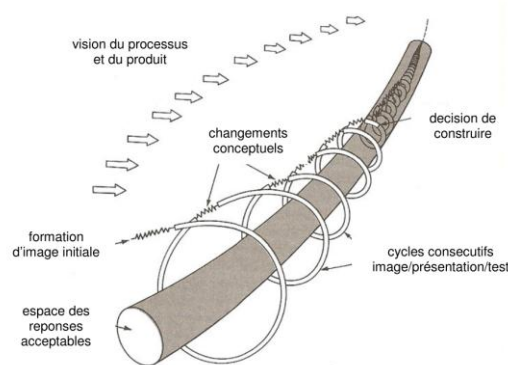


Figure 2 – Modèle en spirale de Zeisel, dans Silvestri (2009)

## Évaluation des solutions

L'évaluation des solutions proposées, quant à elle, peut s'envisager comme un dialogue continu entre les concepteur·rices et l'objet en voie de conception, une dynamique qu'Oxman (2002) qualifie de « **dialectique de la conception** » (Oxman, 2002). Étant donné l'ambiguïté inhérente à toute forme, évoquée précédemment, un mécanisme de **perception-action** se met en place. L'externalisation peut alors être appréhendée au prisme de cette dialectique, opérant une médiation entre le monde interne de l'esprit et le monde externe des artefacts (Boudon et al., 1994). Cette approche fait écho à la théorie de Schön (2017), pour qui l'activité de conception s'apparente à une conversation réflexive et située entre les concepteur·rices et le problème, un processus itératif rythmé par des cycles **see-transform-see**. Au-delà de cette *dialectique* entre l'esprit et les *représentations externes*, le projet d'architecture constitue également l'objet d'une discussion entre architectes, habitant·es, client·es et constructeur·rices. L'architecte intègre dans ses hypothèses de conception des éléments émergeant de ce dialogue, des hypothèses d'usage ou encore des procédés de fabrication, et ce, même en dehors d'une discussion au sens premier du terme (Boudon et al., 1994).

## Caractéristiques propres à la conception architecturale

La conception architecturale possède des caractéristiques propres qui la distinguent de la conception au sens large.

Tout d'abord, à la différence de l'artisan qui travaille directement l'objet de sa conception (une toile, un bloc d'argile ou une page blanche, par exemple), **l'architecte travaille exclusivement avec des objets intermédiaires** (Lawson, 1990).

Ensuite, la conception en architecture contient une triple séparation : entre **l'idée et le projet**, entre **le projet et l'objet réalisé**, et enfin entre **les moyens d'action et le résultat recherché** (Silvestri, 2009). En premier lieu, bien que l'idée donne naissance au projet, de multiples projets peuvent découler d'une même idée fondatrice. En deuxième lieu, le projet se distingue de l'objet : un projet peut être matérialisé de diverses manières, voire ne pas être matérialisé. Toutefois, la conception architecturale est bien orientée vers un résultat matériel : elle matérialise le concept à une grande échelle (Silvestri, 2009). Cette grande échelle introduit des contraintes fortes, qui participent aussi à l'élaboration du design (par exemple, des contraintes structurelles ou encore fonctionnelles). Par ailleurs, le choix de matérialisation détermine le message transmis par l'objet. Par exemple, un bâtiment en béton ne transmet par le même message qu'un bâtiment en bois. Enfin, la troisième dissociation réside dans la nature même du travail architectural. Les moyens d'action des concepteur·rices sont d'agir sur les formes. Pourtant, le résultat souhaité est l'espace entre ces formes et l'effet produit par cet espace (Silvestri, 2009). L'action a donc un effet indirect sur le résultat. Etant donné cette nature spatiale et indirecte des résultats recherchés, il n'est pas étonnant que les opérations visuelles prennent une place prépondérante en architecture (Silvestri, 2009) comme par exemple le dessin, la maquette ou encore la modélisation. Ces opérations permettent de visualiser l'effet des actions sur les formes sur l'espace perçu.

Enfin, **les contraintes initiales ne sont pas bien définies, de sorte qu'elles continuent à évoluer en parallèle de la définition de l'artefact**. Ces contraintes forment un réseau de variables interdépendantes (Baudoux, 2023), ce qui empêche de décomposer aisément le problème global en sous-problèmes distincts. Ces multiples variables s'influencent mutuellement et entrent parfois en conflit. Par conséquent, il est plus difficile de trouver des solutions potentielles. Cela implique également qu'aucune solution optimale à tous égards n'existe (Alexander, 1971; Safin, 2025). Les solutions sont inévitablement partielles et de multiples solutions peuvent coexister (Baudoux, 2023; Safin, 2025). *In fine*, la conception architecturale est donc, en quelque sorte, l'art du compromis.

### 2.1.3 Apports des sciences cognitives

Les sciences cognitives constituent un domaine d'étude interdisciplinaire, à la croisée de la psychologie, de la linguistique ou encore de l'art. Selon Legrenzi, elles visent à « *comprendre le fonctionnement de n'importe quel système, naturel ou artificiel, qui peut recevoir et filtrer des informations de son environnement (perception), de les archiver et effacer (mémoire), de les élaborer et d'en créer des nouvelles (pensée), de les communiquer, de prendre des décisions, de s'adapter et d'adapter son environnement grâce à la création d'artefacts (conception)* » (Legrenzi, in Silvestri, 2009, p. 49). La cognition est donc le lien entre les ressources internes et les ressources externes (Voir Figure 3, Safin, 2025). Cette section s'intéresse d'abord à la créativité, centrale dans l'idéation en conception architecturale. Ensuite, nous aborderons les questions de la motivation et de la charge cognitive avant de survoler brièvement les mécanismes de perception, et plus particulièrement la différenciation entre des objets physiques et leurs projections 2D.

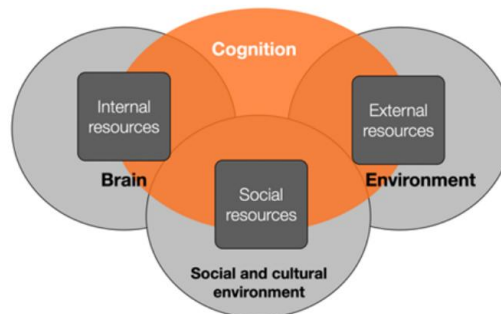


Figure 3 – Le modèle de la cognition externe, tiré de Safin (2025)

### Comprendre la créativité

La conception architecturale est intimement liée à la créativité et à l'action de la pensée humaine sur le monde (Silvestri, 2009). Lubart et al. (2025, p. 19) définissent la créativité comme « *la capacité à réaliser une production qui soit à la fois nouvelle et adaptée au contexte dans lequel elle se manifeste* ». La pensée se tourne vers quelque chose qui n'existe pas, mais qui commence à exister dans l'esprit (l'espace interne) de l'individu (Silvestri, 2009). Une fois projetée dans le monde *externe*, l'idée élargit le champ des possibles (Artige, 2022) et catalyse l'émergence de nouvelles pistes conceptuelles.

La créativité repose elle-même sur un ensemble d'activités cognitives distinctes qui, selon Amabile et Pratt (2016) s'articulent ainsi : **la présentation de la tâche, la préparation, la génération d'idées, la validation des idées et l'évaluation des résultats** associés. Ce processus est sous-tendu dans son ensemble par la mémoire de travail. De plus, le déploiement de la créativité est directement influencé par la motivation de l'individu, particulièrement lors des phases initiales et lors de la génération d'idées (Mille, 2021). Cette motivation, qu'elle soit d'origine *intrinsèque* ou *extrinsèque*, fera l'objet du chapitre suivant.

## Motivation et théorie du flow

La motivation à accomplir une tâche se traduit par le degré d'engagement de l'apprenant-e dans celle-ci (Mille, 2021). Un niveau élevé de motivation favorise considérablement l'apprentissage et la réalisation des activités. Pour susciter un tel élan, la tâche doit être perçue comme intéressante, apportant un défi suffisant et offrant une part de nouveauté au sujet (Mille, 2021). Toutes les tâches ne sont pas susceptibles de générer d'elles-mêmes une motivation à s'y engager. De nombreuses tâches exigent en effet de l'apprenant-e un niveau de compétence et une certaine autonomie au préalable. Cet engagement, moteur de l'activité pour le simple plaisir ou l'intérêt intellectuel qu'elle procure par elle-même, caractérise ce que l'on nomme la « *motivation intrinsèque* » (Mille, 2021). Parallèlement, la motivation est également tributaire de facteurs externes à l'individu, qui viennent influencer et réguler son comportement. Cette dimension correspond à la « *motivation extrinsèque* » (Mille, 2021). Selon ce cadre théorique, cette dernière se décline en quatre aspects : (1) la *régulation externe* (par exemple, pratiquer du sport pour faire plaisir à mon amie), (2) l'*introjection* (par exemple, « si je peux courir 1 kilomètre, je m'offrirai un bonbon »), (3) l'*identification* (par exemple, pratiquer du sport pour être en bonne santé) et l'*intégration* (par exemple, « être sportif fait partie de mon identité ») (Mille, 2021).

Lorsque l'individu s'engage dans une tâche à la fois motivante et agréable, il est susceptible d'atteindre l'état de « *flow* » (Csíkszentmihályi, 1997). Ce concept, théorisé par Csíkszentmihályi (1997) à partir d'observations de personnes créatives dans leur environnement de travail, décrit une expérience d'immersion totale au sein de laquelle le degré d'engagement de l'individu atteint une intensité telle qu'il perd complètement la notion du temps. Cet état d'absorption optimale survient lorsqu'il existe un équilibre entre le niveau de compétence de l'individu et le degré de complexité de la tâche (voir Figure 4). En effet, une tâche trop difficile requerra un effort démesuré et générera de l'anxiété (peur de l'échec ou de l'inconnu), tandis qu'une tâche trop simple pour un profil expérimenté engendrera de l'ennui (Mille, 2021). Le sujet en retient rétrospectivement une expérience fluide, rapide et exempte d'effort. En effet, dans cette phase d'hyper-concentration, la perception de la fatigue et de la durée se trouvent altérés (Csíkszentmihályi, 1997; Mille, 2021).

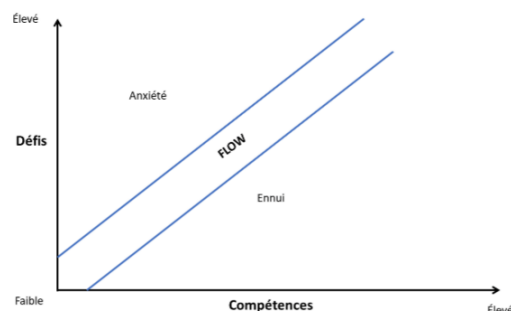


Figure 4 – Représentation de l'état de « flow » par Csíkszentmihályi dans Mille (2021)

Néanmoins, la motivation seule ne garantit pas que la tâche pourra être systématiquement menée à bien. Une part importante découle directement des capacités de notre cerveau, particulièrement l'ensemble des aspects liés à la charge cognitive.

## Théorie de la charge cognitive

Ces dernières années, l'expression « *charge cognitive* » s'est largement démocratisée dans la culture populaire. La théorie de la charge cognitive a été introduite en 1988 par Sweller, dans le contexte des apprentissages. Il la définit comme étant l'interaction entre la capacité limitée de notre mémoire de travail et la capacité presque illimitée de notre mémoire à long terme (Sweller, 1988). En raison de la nature interdisciplinaire, complexe et itérative de la conception architecturale, cette théorie trouve une application particulièrement pertinente au sein de notre discipline (Koudoua & Nia, 2025).

La théorie de la charge cognitive repose sur le constat que la mémoire de travail ne dispose pas de ressources illimitées. Ainsi, lorsque la *charge cognitive* est trop importante, l'apprentissage est impacté négativement (Naismith et al., 2015). Selon Sweller (1988), l'apprentissage s'articule autour de deux mécanismes : la **création de schémas** et l'**automatisation**. Selon lui, la création de nouveaux schémas demande beaucoup de ressources attentionnelles et se traduit par un coût cognitif important en mémoire de travail. Avec l'expérience, ces schémas seront automatisés, libérant ainsi des ressources attentionnelles qui peuvent être redistribuées vers d'autres tâches et apprentissages (Mille, 2021).

La charge cognitive provient de trois sources distinctes (à ne pas confondre avec les sources de motivation évoquées précédemment) : la charge cognitive **intrinsèque**, **extrinsèque** et **germane**<sup>1</sup> (Voir Figure 4) (Klepsch et al., 2017; Krieglstein et al., 2022; Mille, 2021). D'emblée, il convient de préciser que ces trois aspects ne sont pas équivalents. *In fine*, il s'agira de diminuer la charge cognitive *intrinsèque* et *extrinsèque*, mais d'augmenter la charge cognitive *germane*.

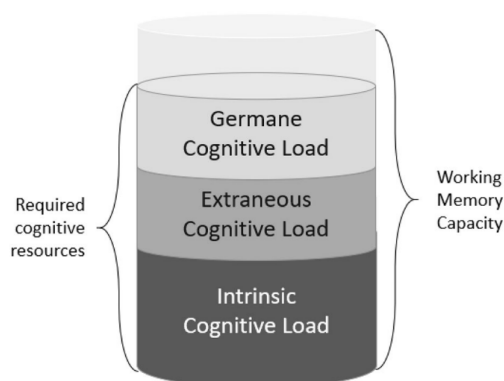


Figure 5 – Les capacités de la mémoire de travail sont occupées par les trois dimensions de la charge cognitive, tiré de Krieglstein et al. (2022)

La charge cognitive **intrinsèque** est inhérente à la complexité de la tâche et dépend de l'expérience de l'apprenant·e. Théoriquement, elle est déterminée par le **niveau d'interactivité d'une tâche** : plus une tâche présente une interactivité élevée, plus l'apprenant·e doit maintenir un grand nombre d'éléments en mémoire de travail (Klepsch et al., 2017). Pour la diminuer, il est recommandé de segmenter la tâche en unités distinctes (Koudoua & Nia, 2025; Naismith et al., 2015). Il convient toutefois de noter que la performance des étudiant·es en architecture est moins affectée par cet aspect de la charge cognitive (Koudoua & Nia, 2025).

---

<sup>1</sup> De l'anglais *germane* ; peut se traduire par « *utile* ». Dans ce travail, elle sera appelée « *germane* » afin d'éviter toute connotations.



La charge cognitive **extrinsèque**, quant à elle, est liée à la **présentation de la tâche**, les documents d'énoncé et les ressources d'apprentissage (Mille, 2021). Une présentation inadéquate ou des explications peu claires accaparent inutilement nos ressources attentionnelles, ce qui impacte négativement les performances des étudiant-es en architecture (Koudoua & Nia, 2025). Cette charge peut être réduite en favorisant une présentation claire, tant au niveau des documents écrits que de l'environnement d'apprentissage ou des interfaces utilisateurs (Koudoua & Nia, 2025; Krieglstein et al., 2022).

Enfin, la charge cognitive **germane** correspond à l'effort mental alloué par l'apprenant-e pour intégrer l'information en mémoire à long terme (Naismith et al., 2015). Directement liée à **l'engagement de l'apprenant-e** (Mille, 2021), elle permet de cristalliser l'apprentissage par la formation d'automatismes. Il s'agit du processus le plus corrélé à une performance élevée : dans leur étude, Koudoua & Nia (2025) montrent que les étudiant-es avec une charge cognitive *germane* élevée ont une meilleure performance par rapport aux autres étudiant-es (Koudoua & Nia, 2025). Contrairement aux deux premières dimensions, la charge cognitive *germane* est à stimuler afin d'optimiser l'apprentissage. Si les coûts cognitifs *intrinsèque* et *extrinsèque* sont trop importants, l'apprenant-e ne disposera plus de ressources suffisantes pour fixer les éléments en mémoire à long terme (Naismith et al., 2015).

En conclusion, si l'on cherche à augmenter la motivation des apprenant-es dans une tâche, il convient de diminuer la charge cognitive associée. Dans le contexte de la conception architecturale, Koudoua & Nia (2025) soulignent que c'est la charge cognitive *extrinsèque* qui affecte le plus les performances des étudiant-es. La charge cognitive *intrinsèque* s'avère moins déterminante, dans la mesure où elle est compensée par la mise en place de stratégies de support de la charge cognitive *germane* (Koudoua & Nia, 2025).

## La perception visuelle

Selon Lebahar (1983), les représentations des architectes sont des « *évoctions projective d'un objet futur* » (Lebahar, 1983, p. 23). Ces évocations sont ensuite perçues par l'esprit. La perception se distingue donc de la représentation, selon Lebahar (1983). Pour comprendre la conception architecturale, il convient de comprendre comment l'espace *interne* à l'esprit du concepteur interagit avec l'espace *externe*. Selon Silvestri (2009), il existe trois approches pour expliquer cette relation : l'*adaptive resonance theory* de Grossberg (Grossberg, 1999) la théorie de l'*internalisation* des principes d'organisation du monde physique de Shepard (Shepard, 2001) et la *constructal theory* de Béjan (Bejan & Merks, 2007).

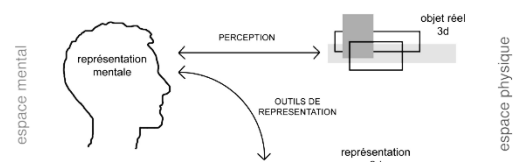
L'*adaptive resonance theory* de Grossberg (1999) postule que les neurones entrent en résonance positive ou négative face aux objets du monde physique, selon que ces derniers soient en adéquation avec les attentes du système cognitif sur ce qu'ils devraient être (Grossberg, 1999). Ces états de résonance dépendraient des variations du monde physique, conférant ainsi au système sa nature adaptative et illustrant la plasticité des processus mentaux (Grossberg, 1999). Pour illustrer ce mécanisme, prenons l'exemple de la reconnaissance d'un objet dans la pénombre. Selon ce modèle, le cerveau s'appuie sur deux processus : un processus bottom-up, fondé sur les données sensorielle et visuelles extraites de l'objet, et un processus top-down, guidé par les hypothèses préalables quant à la nature potentielle de l'objet. C'est lorsqu'il y a correspondance et adéquation entre ces deux voies qu'une résonance se déclenche, aboutissant alors à l'identification de l'objet (Grossberg, 1999).

La *théorie de l'internalisation* du monde physique de Shepard (2001) postule que les processus mentaux sont copiés depuis le monde physique. Ainsi, les objets mentaux seraient gouvernés par les mêmes lois que leurs pendants physiques (Shepard, 2001). Si l'esprit est capable de reconnaître un objet tridimensionnel sous différents points de vue, c'est parce qu'il a internalisé les principes physiques de transformation de ces objets : les rotations, les translations, les transformations euclidiennes (Shepard, 2001). Face à un objet, l'esprit forme une représentation multidimensionnelle intégrant les règles de ses transformations possibles (Shepard, 2001). Cette théorie a toutefois comme limite principale de ne pas rendre compte de la plasticité cognitive, et ne permet donc pas d'expliquer la résolution de problèmes (Silvestri, 2009).

La *constructal theory* de Béjan (2007) s'inspire des lois de la thermodynamique et de la théorie du chaos. Afin qu'un système d'écoulement persiste dans le temps, il doit évoluer de sorte à faciliter la circulation des flux qui le traversent, par exemple les fleuves, les routes, mais aussi les réseaux de neurones (Bejan & Merks, 2007). L'évolution a conditionné notre système perceptif à fonctionner par balayage visuel horizontal plutôt que vertical (Bejan & Zane, 2012). Les formes horizontales, dont le rapport s'approche du nombre d'or, sont perçues comme plus harmonieuses car l'information perceptive « s'écoule » dans nos réseaux neuronaux avec une résistance minimale (Bejan, 2022).

Les représentations externes générées par l'esprit sont d'abord matérialisées, avant d'être perçues en retour (voir Figure 6) (Silvestri, 2009). Dès lors, le médium choisi pour matérialiser la représentation externe influence-t-il sa perception ? La littérature en psychologie apporte de nombreux éléments corroborant cette hypothèse. Il est notamment démontré que les objets physiques tangibles présentent de multiples avantages par rapport à leurs images 2D (Fairchild et al., 2021; Korisky & Mudrik, 2021; Snow et al., 2014; Snow & Culham, 2021). Ce constat revêt une importance particulière dans le contexte des pratiques conceptuelles contemporaines, marquées par l'émergence des modèles numériques, souvent utilisés par les concepteur·rices à travers des écrans 2D, délaissant bien souvent la fabrication de modèles physiques.

Figure 6 – Modes d'échanges fondamentaux de la conception : la perception et la représentation, tiré de Silvestri (2009)



Dans leur article, Korisky & Mudrik (2021) ont démontré que les objets 3D du monde physique sont détectés plus rapidement que des photographies 2D de ces mêmes objets (Korisky & Mudrik, 2021). Les chercheurs expliquent ce phénomène par le potentiel d'interaction avec l'objet, une dimension inévitablement plus limitée dans le cadre d'une projection 2D (Traduit de l'anglais, Korisky & Mudrik, 2021, p. 2). Ainsi, le mode de matérialisation de l'objet influe sur la rapidité de sa perception (voir Figure 7). Un parallèle peut être établi avec le processus de conception : à mesure que les représentations externes s'affinent, leur perception devient de plus en plus rapide. Cependant, les auteurs nuancent ce propos, soulignant que leurs conclusions ne couvrent que les objets familiers pour lesquels des schémas moteurs existent (Korisky & Mudrik, 2021).

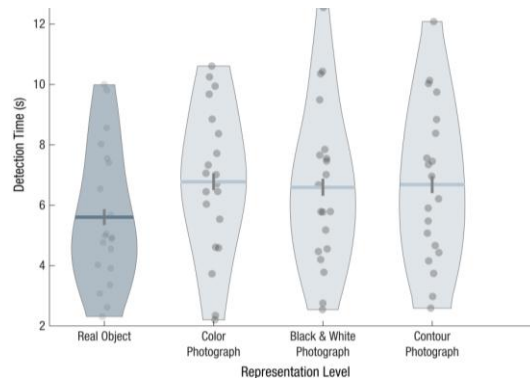
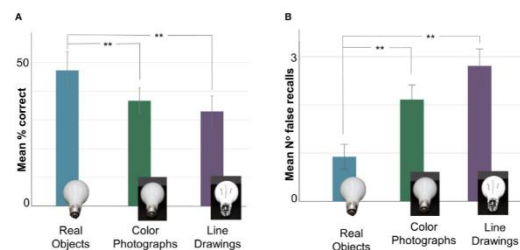


Figure 7 – Temps de détection des participant·es avec différents niveaux de représentation des objets dans l'étude de Korisky & Mudrik (2021)

Dans leur article, Snow et al. (2014) expliquent que les objets 3D sont plus mémorables que leurs images 2D : « *real objects may have a memory benefit due to embodied cognition* » (Snow et al., 2014, p. 9). Cette différence se marque pour tous types d'objets, artificiels comme naturels (Snow et al., 2014). Ceci s'explique par l'influence des mécanismes de perception des objets dans l'espace. La vision binoculaire perçoit la structure géométrique dans l'espace, et cette perception inconsciente ne fonctionne qu'avec des objets physiques (Snow et al., 2014). De plus, les objets physiques « *graspable* » (saisissables) activent des régions spécifiques du cerveau en lien avec la manipulation et l'action.

Figure 8 – Comparaison des 3 modalités : objet physique, photo en couleur et dessin au trait. Sur la gauche, pourcentage moyen de bonne reconnaissance des objets présentés pour les 3 modalités. Sur la droite, pourcentage moyen d'erreurs de reconnaissance des objets présentées pour les 3 modalités, tiré de Snow et al. (2014)



Fairchild et al. (2021) ont étudié cet aspect de la « *graspable* » (saisissabilité). Le cerveau s'active différemment face à un objet physique selon que le sujet le perçoit comme manipulable ou non (Fairchild et al., 2021). Les régions cérébrales liées à la préparation motrice automatique s'activent face à un objet atteignable, ce qui n'est pas le cas lorsque l'objet est derrière une vitre, et donc non accessible (Fairchild et al., 2021).

En conclusion, le médium utilisé pour matérialiser une représentation externe influence la manière dont celle-ci est perçue, conférant ainsi un avantage à l'objet physique. Ce constat peut d'ailleurs être étendu aux supports de représentation en général. Dans le domaine des médias, McLuhan & Gordon (2003) postulent que « *the medium is the message* », soulignant que l'impact du message provient des caractéristiques techniques du médium plutôt que du contenu du message lui-même (McLuhan & Gordon, 2003). Dans le domaine du dessin technique, Lawson (1990) corrobore cette idée : il a en effet démontré que l'usage des outils traditionnels (tels que les tables à dessin, les tés et les rapporteurs) conditionnait directement les formes et les contenus produits par les dessinateur·rices. Dès lors, il apparaît donc que le choix du médium pour une représentation externe n'a rien d'anodin. **Loin d'être un simple véhicule neutre, le support de matérialisation participe activement à la perception de l'objet, mais également à l'orientation de sa conception.**

## 2.2 LES REPRÉSENTATIONS EXTERNES, OUTILS DE CONCEPTION ARCHITECTURALE

Cette section explore le rôle des représentations externes au sein du processus de conception architecturale. Plus particulièrement, nous aborderons deux outils fondamentaux de la conception : la maquette physique et le modèle numérique.

### 2.2.1 Enjeux des représentations externes

Safin (2025, p. 81) définit les représentations externes comme « *l'ensemble des modes de figuration d'information [...] de l'objet architectural en cours de conception* ». Ces représentations sont l'externalisation du monde interne de la pensée dans le monde externe (Collin, 2017; Safin, 2025). Comme vu précédemment, elles permettent de fixer la pensée tout en allégeant la charge cognitive. En effet, la cognition s'opère préférentiellement là où elle s'avère la moins coûteuse, s'appuyant ainsi sur le monde interne ou sur le monde externe (Kirsh, 2010). Dans cette dynamique, selon Lebahar (1983, p. 77), « *Pour fabriquer le vrai modèle de la maison, on utilise d'abord un faux, et cette falsification entraînera dans sa disparition, les erreurs, les maladresses, et toutes les aberrations qui sont susceptibles de toucher l'objet architectural* ». Les représentations externes constituent la « *trace graphique* » (Baudoux, 2023; Elsen, 2011), qui se définit comme « *un ensemble de signes constituant la représentation d'un moment de conception* » (Lecourtois, in Baudoux, 2023). Cette trace formalise les idées et sert de support à la parole (Elsen, 2011). L'esquisse dépasse le simple rôle de représentation pour devenir le cœur de la conception architecturale. Lebahar (1983, p. 19-20) précise que « *le dessin [...] est un système sémiologique de simulation. [...] Cette pratique de simulation graphique donne à l'architecte le pouvoir de transformer l'environnement "dans sa tête" avant qu'il ne le soit réellement dans la réalité physique* ». L'esquisse est dotée de propriétés fondamentales de *malléabilité*, de *plasticité* et de *réversibilité* (Lebahar, 1983) qui lui permettent à la fois d'être un outil de simulation des possibles et un pilier soutenant l'ensemble de l'activité de conception.

Intéressons-nous maintenant aux maquettes physiques et aux modèles numériques, ainsi qu'à leurs caractéristiques propres.

### 2.2.2 Enjeux des maquettes physiques

Les premières maquettes d'architecture remontent à l'Égypte antique (Estévez, 2014). Que ce soit pour représenter l'existant ou pour projeter, les maquettes semblent traverser les cultures de la conception architecturale avant même la naissance de la figure de l'architecte (Estévez, 2014). Sur le plan étymologique, le terme renvoie directement aux actions nécessaires pour les réaliser (Cristia et al., 2018). Elles portent les traces des opérations précédentes, et incarnent l'état du projet à un instant précis. Cette **dimension mémorielle** de la maquette est centrale, en conservant une **trace physique** des itérations successives, elle offre la possibilité de les mettre en perspective et de les comparer entre elles (Estévez, 2014).



Figure 9 – Exposition de maquettes du projet de la tour CCTV à Beijing, dans Yaneva (2013)

Ainsi, comme le souligne Estévez (2014, p. 5) « *la pertinence des maquettes pour le concepteur est [...] souvent reliée à leur **prolifération*** ». Cette dynamique de multiplication et d'itération matérielle s'observe d'ailleurs de manière empirique au sein de plusieurs agences renommées, à l'instar du bureau OMA (voir Figure 9, Yaneva, 2013).

La **matérialité** des objets conçus joue un rôle déterminant à deux niveaux : **l'aspect sensible** de ces objets et le **langage architectural** permis. Les maquettes constituent des artefacts d'expérience sensorielle dans le sens où elles permettent une exploration du projet dans toute sa tridimensionnalité, autant dans la modalité visuelle que dans la modalité tactile (Cristia et al., 2018). Cette caractéristique établit un parallèle direct avec l'expérience quotidienne de l'architecture, elle-même multisensorielle (en faisant appel à la vue, au toucher, voire à l'odorat). Ainsi, la perception matérielle de la maquette constitue une étape intermédiaire avant la perception du projet réel, permettant aux concepteur·rices de **simuler et d'interpréter l'expérience future** de leur projet (Boudon et al., 1994). Dans la pratique, ces maquettes sont souvent utilisées comme prototypes permettant d'éprouver divers aspects de la conception, tels que l'insertion du bâtiment dans un contexte paysager, tester des matérialités différentes (Baudoux, 2023), tester des éléments de détails ou la présentation du projet (Cristia et al., 2018). Les maquettes permettent **d'unifier l'ensemble des représentations planes**, des esquisses et des perspectives dans un seul et unique objet (Lawson, 1990). Selon Jones (1986), elles permettent d'augmenter l'amplitude perceptive du concepteur·rice, en visualisant directement comment un changement local impacte l'ensemble du projet. Néanmoins, dans la mesure où les maquettes impliquent un degré d'abstraction différent de celui des représentations planes qu'elles unifient, on peut se questionner sur le caractère universel des maquettes.

Le contexte actuel semble remettre en question l'usage intensif des maquettes chez les étudiant·es en architecture. Dans son enquête de 2023, Monaco souligne que si la majorité des étudiant·es en architecture apprécie la réalisation des maquettes, l'appréciation diminue avec l'année d'étude des étudiant·es (Monaco, 2023). Il semblerait que plus les étudiant·es sont amenés à faire des maquettes, moins l'exercice semble leur plaire. Ce constat soulève plusieurs interrogations, pointant notamment les conséquences d'une potentielle surcharge de travail ou

l'accumulation de mauvaises expériences liées à la réalisation des maquettes (Monaco, 2023). Dans son mémoire de 2020, Mahy indique qu'un **manque de savoir-faire** chez les étudiant-es maintient la perception que la maquette est une perte de temps, en plus de ne pas les inciter à expérimenter.

### Quels rôles pour les maquettes physiques ?

Différents modèles ont tenté de catégoriser les rôles joués par ces artefacts. Nous en répertorions quelques-uns dans cette section.

Dans le domaine du design, Camburn et al. (2017) identifient 4 objectifs joués par ces prototypes (voir Figure 10) ; l'apprentissage, l'exploration, la communication et l'amélioration du prototype/projet. On retrouve ainsi des modèles de conception, des modèles esthétiques, ergonomiques, géométriques, fonctionnels, et des préséries (étape précédant la fabrication en série) (Dubois et al., 2000). Les prototypes sont différents des maquettes en ce que ce premier précède une fabrication en série.

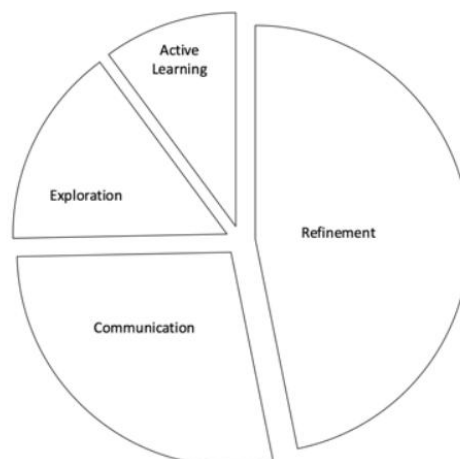


Figure 10 – Objectifs fréquemment cités pour les prototypes, d'après Camburn et al. (2017)

D'autres catégorisations se sont intéressées plus précisément aux maquettes physiques des architectes. Selon Silvestri (2009), trois grandes catégories de rôles peuvent être identifiées : les prototypes de communication, les prototypes de conception et les prototypes mécaniques.

#### Rôle de communication

Les prototypes de communication permettent de montrer le projet, tant aux concepteur-rices qu'aux publics divers. Cette visualisation permet de comprendre les qualités spatiales du projet de manière plus évidente qu'au travers des dessins. En effet, selon Silvestri (2009), les dessins et les rendus ne remplissent pas le même rôle que la maquette. Tandis que les premiers offrent une vue représentant ce à quoi ressemblera le projet, les derniers permettent d'appréhender spatialement les volumes au sein desquels l'utilisateur sera amené à évoluer (Silvestri, 2009). Cela est d'autant plus vrai pour les personnes sans compétences en architecture (Collin, 2017).

#### Rôle de conception

Ces prototypes correspondent à ce que l'on nomme couramment les maquettes dites « de travail ». Celles-ci peuvent prendre la forme d'assemblages de blocs de cartons, de mousse, de Lego's ou d'argile, pourvu qu'elles soient malléables et modifiables selon les désirs. Elles permettent ainsi de dépasser les limites de la représentation en plan et offrent de nouvelles opportunités à la conception en plus de permettre de vérifier la cohérence globale des propositions. Collin (2017) identifie deux approches. La *conception par la fabrication*, où le point capital est que l'architecte, en assemblant des éléments en trois dimensions, va mieux appréhender les conséquences spatiales de ses dessins 2D. La conception par la matière réfère à l'expérience sensible des formes, Collin (2017) rappelant que la perception d'un espace est d'autant meilleure que les sens sont le plus sollicités.

## Rôle mécanique

L'objectif de ces prototypes est de « *représenter la configuration spatiale optimale du point de vue mécanique, d'une forme structurale par rapport à certaines conditions aux limites données* » (Silvestri, 2009, p. 43). Concrètement, cette démarche peut consister à tester un assemblage entre plusieurs éléments ou encore déterminer la forme de toile tendue idéale. Selon Silvestri (2009), ces maquettes sont génératives, dans le sens où la forme finale résulte du comportement naturel des matériaux. Aujourd'hui, ces maquettes se font rares et sont désormais souvent remplacées par des modèles numériques, avec l'avantage de pouvoir tester les solutions sur de multiples aspects, aussi bien mécanique qu'économique, thermique ou encore esthétique.

Parallèlement, depuis deux décennies, la fabrication numérique offre de nouvelles opportunités aux prototypes d'architecture, tout en engendrant de nouvelles contraintes. Un nouveau rôle aux prototypes émerge : la validation de la faisabilité. Ce rôle consiste en la vérification de l'adéquation entre le modèle numérique et les techniques de matérialisation (Collin, 2017). Ces prototypes donnent une preuve physique aux concepteur·rices que leur modèle numérique peut fonctionner en maquette, sorte de *proof-of-product* (Ullman, in Collin, 2017). Le chapitre suivant (2.3) sera d'ailleurs consacré à l'étude de ce nouveau champ de recherche qu'est la fabrication numérique.

### 2.2.3 Enjeux de l'environnement numérique

Les « *modèles numériques* » renvoient à des représentations 2D, 3D ou 3D sémantique avec des logiciels informatiques, s'inscrivant dans ce que l'on nomme plus globalement les pratiques du numérique en architecture. Celles-ci désignent la transformation des métiers de l'architecture et du bâtiment sous l'impulsion du numérique. Actuellement, le BIM (*Building Information Management*) et le Design Computationnel en constituent les deux approches dominantes. Bien qu'historiquement deux concepts définis séparément, le cloisonnement entre ces deux disciplines tend à s'estomper dans le contexte du développement rapide des outils informatiques et de l'intelligence artificielle (de Boissieu, 2021). Sur le plan opératoire, ces technologies permettent de manipuler une représentation tridimensionnelle du projet, projetée en deux dimensions sur un écran (Cristia et al., 2018).

Aux prémices de l'informatique, les logiciels avaient pour objectif de faciliter la vie des dessinateurs industriels. Ces logiciels étaient d'abord des machines, qui imitaient le dessin à la main (Silvestri, 2009) et étaient dédiées uniquement à cette tâche. Les premiers logiciels de modélisation 3D, tels que Catia, ont été développés pour l'industrie aéronautique dans les années 70. Au cours des décennies suivantes, l'augmentation fulgurante des performances informatiques, couplée à la miniaturisation, ont permis l'émergence d'éditeurs commerciaux. Le lancement de logiciels grand public, à l'instar d'AutoCAD ou encore ArchiCAD, a ainsi scellé le début de la relation entre l'architecte et l'outil numérique (Carpo, 2017; Picon, 2010), marquant l'avènement de la Conception Assistée par l'Ordinateur, la CAO (*CAD en anglais*). Par la suite, le BIM est apparu pour répondre à la nécessité d'intégrer de l'*information* aux modèles, facilitant ainsi le partage et la gestion de ces données. Cette évolution s'inscrit dans le contexte plus large de l'ère de l'information, une période historique où le développement des ordinateurs a franchi un point de bascule, autorisant le traitement quasi instantané de quantités massives de données (Carpo, 2017). A ce titre, de Boissieu (2020) définit le BIM comme « *un ensemble de pratiques*

*mettant en jeu la manipulation et l'échange de données du bâtiment entre les acteurs du projet, tout au long du cycle de vie* » (de Boissieu, 2020, p. 2). Le BIM est considéré comme la concrétisation de la quatrième révolution industrielle au sein du secteur de la construction marquée par l'impact du monde numérique sur le monde physique. Désormais, un projet peut être dessiné, simulé, évalué, construit et monitoré dans l'espace numérique avant d'être matérialisé dans le monde physique, en favorisant une collaboration transversale entre tous les corps du métier : de l'architecte à l'ingénieur·e, en passant par le constructeur·rice et l'exploitant·e du bâtiment.

La conception computationnelle en architecture dépasse le stade de la conception assistée par ordinateur. Elle porte sur la conception de systèmes et d'algorithmes de génération architecturale (de Boissieu, 2022). Ce n'est pas directement la forme finale qui est recherchée, mais plutôt le système permettant de l'atteindre à partir d'un ensemble de règles. Ces pratiques, rendues possibles par l'accroissement des capacités calculatoires de l'informatique et par la pensée computationnelle (de Boissieu, 2022), mobilisent un vaste panel d'outils : algorithmes génératifs, intelligence artificielle ou encore fabrication numérique. Ce nouvel arsenal technologique ouvre un nouveau champ des possibles, comme en témoignent les réalisations de bureaux tels que ceux de Zaha Hadid, Marcos Novak ou encore Foster&Partners (Lecourtois et al., 2012), spécialisés dans ce domaine et porteurs d'une identité architecturale forte et novatrice. La conception computationnelle induit ainsi un véritable **changement de paradigme** où l'ordinateur « *participe* » à la conception (Picon, 2010). La computationnelle cherche donc à produire un système, un algorithme ou un script, qui produiront ensuite le projet, mélangeant ainsi l'intuition créatrice humaine et la génération informatique (Picon, 2010). La conception paramétrique repose donc sur des algorithmes, mais aussi sur des comportements de conception traditionnels menés en parallèle par les concepteur·rices (Yu et al., 2014). L'objectif est de susciter une émergence, c'est-à-dire l'apparition d'un ordre spatial et structurel identifiable au sein d'un désordre apparent (Picon, 2010). Selon de Boissieu (2022), la conception computationnelle se regroupe en 3 sous-ensembles : la conception paramétrique, la conception générative et la conception algorithmique. Les frontières sont mouvantes et l'apparition de l'intelligence artificielle générative ouvre de nouveaux champs du possible (de Boissieu, 2021)

Apparues dans le sillage de la révolution numérique, ces pratiques définissent ce que Bourbonnais (2024) qualifie d'architecture « *non-standard* » (Bourbonnais, 2014, p36). Elles animent de nombreux débats théoriques quant au rôle exact du numérique en architecture. Pour Picon (2010), le numérique induit une transformation de la matérialité existante, instaurant une nouvelle relation avec la matérialité (Picon, 2010). Des formes complexes, dont la fabrication manuelle aurait demandé une vie entière d'un·e artisan, puis brisées en s'effondrant par elles-mêmes peuvent aujourd'hui être assemblées numériquement, simulées, évaluées puis optimisées jusqu'à obtenir une forme fonctionnelle (Carpo, 2017). Une fois définie, cette forme peut être matérialisée grâce aux outils de prototypage rapide et aux autres machines à commande numérique (qui seront détaillées à la section 2.3). Le design computationnel entretient donc un rapport étroit avec la matérialité par l'intermédiaire des outils de fabrication numérique (Carpo, 2017; Mansouri, 2026).

Enfin, cette évolution technologique modifie profondément le rapport au temps du projet. Comme le soulignent Cristia et al (2018), la maquette physique et le modèle numérique n'entretiennent pas la même temporalité. La maquette fige le projet dans un état stabilisé, à un instant précis de son développement (Cristia et al., 2018; Silvestri, 2009). A l'inverse, le modèle numérique évolue en continu avec le projet. Porteur d'une dimension dynamique, il incarne le



projet « en train de se faire » (Cristia et al., 2018). Cette instabilité inhérente permet notamment au modèle BIM de s'ériger en plateforme d'échanges et de négociations. Il devient alors un objet-frontière, construit collectivement et capable de faire le lien entre les différentes sphères professionnelles gravitant autour de l'architecture. Cette distinction se reflète jusque dans le destin des maquettes : si les maquettes physiques finissent souvent au rang de reliques une fois le chantier lancé, les modèles numériques, quant à eux, continuent d'être alimentés et mis à jour pendant et après la construction du projet (Cristia et al., 2018).

### Qualités et faiblesses de l'environnement numérique

Les modèles numériques de type *BIM* peuvent être créés à partir de représentations planes (plans, coupes, élévations). Ces méthodes de dessin numérique 2D sont apparues sur base des procédés de dessin traditionnels crayon-papier (superposition de calques, épaisseurs de traits ou encore rapporteurs). Cela servait alors un double objectif : permettre de faciliter la transition des dessinateur·rices vers ces outils et offrir aux programmeur·euses une référence d'ergonomie et de performance réelle. En s'inspirant de l'esquisse, les logiciels de modélisation numérique ont hérité de ses points forts, mais également de ses points faibles.

Dans le domaine de l'esquisse, si les premières recherches des années 2000 donnaient l'avantage au travail avec crayon-papier par rapport aux environnements CAO (Bilda & Demirkan, 2003), l'évolution fulgurante des technologies tend aujourd'hui à remettre en question ces premières conclusions. Les environnements numériques d'esquisse offrent des **fonctionnalités** qui dépassent la simple copie des gestes physiques, à l'instar des outils de transformation, de mise à l'échelle ou encore de duplication. Dans leur étude, Wu & Chen (2012) soulignent l'importance des fonctions « *undo* » et « *redo* », qui permettent de comparer différents niveaux d'abstraction des concepts (Wu & Chen, 2012). Ces fonctions logicielles réduisent le coût de l'erreur, une simple erreur peut être annulée sans le moindre effort, contrairement aux conséquences d'un trait de marqueur mal exécuté sur papier. Par ailleurs, ces auteurs mettent en avant le rôle du zoom, impossible dans un environnement papier. Ce simple zoom permet de **gérer différentes échelles dans la même esquisse**, naviguant du détail à la vue d'ensemble. Le numérique offre ainsi une vision globale du concept, à l'inverse de l'esquisse sur papier, où la vue d'ensemble émerge de la comparaison opérée par l'individu entre les différentes échelles (Wu & Chen, 2012). Dans le même temps, cette comparaison facilitée entre différents niveaux d'abstraction permet d'adapter et de transformer au mieux les idées (Wu & Chen, 2012). De plus, le modèle numérique offre généralement la possibilité d'extraire **automatiquement** des plans, des coupes et des élévations sans charge de travail supplémentaire (Baudoux & Leclercq, 2022). C'est un aspect important des modèles, en particulier les modèles BIM, puisqu'ils diminuent la charge globale de travail tout en augmentant le volume d'informations produites et leur cohérence interne.

Malgré ces qualités, l'environnement numérique présente aussi certaines limites. Dans leur étude, Ibrahim & Pour Rahimian (2010) soulignent que les propositions architecturales développées par des équipes d'étudiant·es utilisant exclusivement la CAO s'avèrent d'une qualité significativement inférieure que celle des groupes travaillant uniquement l'esquisse. Ces mêmes auteurs démontrent aussi que **les solutions les plus abouties** proviennent des groupes d'étudiant·es **utilisant l'esquisse dans un premier temps et la CAO dans un second temps**, par rapport à des groupes travaillant uniquement l'esquisse ou uniquement la CAO (Ibrahim & Pour Rahimian, 2010). Les concepteur·rices travaillant dans un environnement hybride peuvent

passer successivement d'un outil à l'autre selon leurs besoins. Les chercheur·euses ont observé des étudiant·es utiliser une esquisse pour résoudre un problème complexe, puis implémenter leur solution sur l'ordinateur. Iels ont aussi pu observer des étudiant·es utiliser la CAO pour résoudre des difficultés rencontrées dans leurs esquisses (Ibrahim & Pour Rahimian, 2010). Enfin, les chercheur·euses soulèvent un enjeu majeur lié à l'allocation des ressources. Iels constatent que les environnements de design sur papier permettent aux concepteur·rices de mieux **équilibrer le niveau de détail par rapport au temps imparti**. A l'inverse, les groupes évoluant dans des environnements numériques ont tendance à **s'attarder sur des détails superflus**, allongeant de fait le temps nécessaire pour produire leur solution (Ibrahim & Pour Rahimian, 2010).

## 2.3 LA FABRICATION NUMÉRIQUE & PROTOTYPAGE RAPIDE

Cette section s'intéresse aux méthodes de fabrication à commande numérique et à la manière dont ces outils pourraient faciliter le continuum conception – fabrication. Par « fabrication numérique », nous entendons les outils de prototypage rapide, tel que l'imprimante 3D ou encore la CNC.

### 2.3.1 De la fabrication numérique au continuum conception-fabrication

Mansouri (2026) définit le continuum conception-fabrication comme étant « *des démarches dans lesquelles les modèles numériques ne se limitent plus à la représentation de la forme, mais participent activement à l'organisation et à la coordination des opérations de production* » (Mansouri, 2026, p. 1). Le modèle numérique n'est donc plus uniquement une représentation intermédiaire entre l'idée et le projet, mais bien un outil central **intégrant** directement les contraintes de fabrication, formant ainsi un véritable **système dynamique** (Mansouri, 2026). La fabrication cesse de constituer l'étape finale de la conception pour devenir une composante fondamentale du projet dès sa genèse (Mansouri, 2026). Ce changement de paradigme est permis par les méthodes de fabrication numérique (aussi appelées *prototypage rapide*) apparues dans les années 1980 en contraste avec les méthodes de fabrication usuelles (Dubois et al., 2000). Dubois et al. (2000) les définit comme : « *un ensemble d'outils qui [...] permettent d'aboutir à des objets de représentation intermédiaire de la conception de produits* » (Dubois et al., 2000, p. 5). Ces technologies offrent l'avantage de pouvoir produire des pièces **uniques et différentes les unes des autres sans compromettre la rentabilité de l'opération** (Carpo, 2017). Le prototype peut ainsi évoluer très rapidement, d'où l'appellation *prototypage rapide*.

Il existe trois catégories d'outils de fabrication numérique : les outils à dépôt de matière, les outils à évidement de matière et les outils combinant les deux procédés (Mansouri, 2026). Les machines fonctionnant par dépôt de matière sont les plus répandues. L'exemple le plus connu est l'impression 3D par dépôt de filament plastique (FDM), largement démocratisée de nos jours. C'est un procédé de type Solide/solide par laminage et extrusion du filament chauffé (Dubois, 2000). Il existe néanmoins d'autres méthodes, par exemple les méthodes liquide/solide telle que la solidification de résine par laser (Dubois, 2000) ou encore l'impression par dépôt d'argile ou de béton. Ces machines permettent la fabrication d'éléments 3D complexes, ce qui offre une plus grande liberté formelle. Il existe néanmoins certaines règles liées à la stabilité des couches successives, particulièrement avec l'argile ou le béton. Ces matériaux exigent également une connaissance fine de leurs rhéologies et propriétés intrinsèques pour mener à bien un projet de prototypage à grande échelle (Mansouri, 2026). Les machines fonctionnant par retrait de matière, quant à elles, sont les plus anciennes. Les premières fraises à commandes numériques ont fait leur apparition dans les années 1940 (Carpo, 2017). Cette catégorie regroupe la découpe laser, la découpe par jet d'eau ou encore la fraiseuse numérique CNC. Ces machines permettent de couper toutes sortes de pièces, du 2D au 3D, et dans de nombreuses matières (notamment carton et bois), les rendant alors abondamment utilisées par les architectes (et pas que). Elles s'inscrivent dans la continuité philosophique de l'artisan, en venant reproduire les gestes continus et fluides de la main par l'ordinateur (Carpo, 2017). Ces machines partent de matériaux plans et requièrent une formulation de la géométrie en opérations spécifiques : mise à plat, séparation en éléments de moindre taille ou encore gestion des tolérances de l'outil (Mansouri, 2026). Cet ensemble de contraintes influence les résultats du processus de conception vers des

systèmes manufacturables dès le départ (Mansouri, 2026). Il existe également des machines à bras robotisé, offrant une bien plus grande liberté de fabrication en intégrant des processus de dépôt de matière et de retrait dans un seul processus (Mansouri, 2026).

Les premières expériences de CAO-CAM datent des années 50 avec le « *Pronto* » de P. Hanratty. Toutefois, ces premières tentatives ne suscitent qu'un engouement limité (Bourbonnais, 2014). Selon Bourbonnais (2014), dans les années 60 et 70, la fabrication est exclue des réflexions architecturales (Bourbonnais, 2014). Dans l'exemple majeur de la computationnelle « *SEEK* » par Negro Ponte (1975) la fabrication de la « *machine architecture* », pourtant au centre du projet, n'est pas abordée (Bourbonnais, 2014). Durant cette période, c'est avant tout l'interaction homme-machine qui est centrale pour les concepteur·rices (Bourbonnais, 2014).

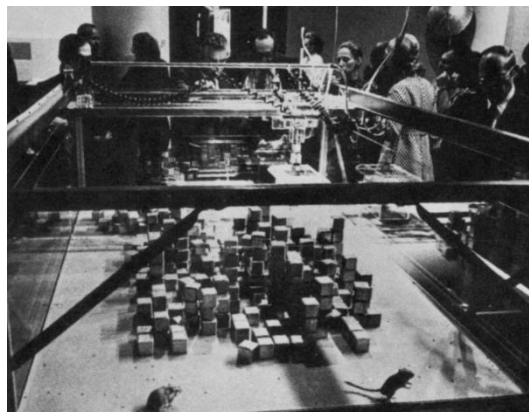


Figure 11 – Le projet SEEK, une architecture machine, par Negro Ponte (1975)

Il faut attendre les années 80-90 pour que la technique revienne en force, avec l'émergence de la technologie du prototypage rapide (Bourbonnais, 2014). Dans la littérature, le continuum conception-fabrication numérique a été étudié par de nombreux auteur·rices, dont les conclusions contrastent beaucoup. Pour Stehling (2014), la transition entre le modèle numérique et le modèle de fabrication constitue un maillon faible et peu pratique lorsque des opérations complexes sont requises. L'approche la plus utilisée pour passer d'une conception architecturale à un modèle de fabrication reste alors de modéliser de nouveau l'entièreté du modèle dans le logiciel de fabrication (Stehling, 2014). Cette tâche, perçue comme lourde et chronophage, ne respecte pas l'esprit d'un continuum. De son côté, Collin (2017), met en évidence un frein lié à la lenteur relative des machines d'impression 3D. Les concepteur·rices préfèrent alors s'en remettre à des maquettes manuelles ou se limiter au modèle numérique (Collin, 2017). Dans le contexte de la modélisation paramétrique, Mertens et al. (2023) ajoutent que d'importantes étapes logicielles restent à franchir avant de débloquent tout le potentiel du prototypage rapide (Mertens et al., 2023). Enfin, Mansouri (2026) soulève la question de l'échelle, qui reste non résolue (Mansouri, 2026). Selon lui, plusieurs leviers nécessitent d'être interrogés : les aspects matériels (durabilité, résistance, performances), les aspects économiques (coûts de production, rentabilité) et les aspects de transférabilité (passage d'un projet A à un projet B sans perte des principes fondateurs) (Mansouri, 2026). Cet enjeu de transférabilité reflète la difficulté actuelle à concevoir un système adaptable d'un contexte à l'autre : « *Il implique de passer de systèmes singuliers, optimisés pour un contexte contrôlé, à des dispositifs capables d'intégrer des contraintes multiples : usages durables, normes, coûts, maintenance et reproductibilité partielle* » (Mansouri, 2026, p12). Ces constats mettent en évidence la nécessité d'identifier les freins inhérents à la fabrication numérique.

### **2.3.2 Encourager le continuum conception-fabrication**

Comme nous l'avons vu précédemment, le continuum conception-fabrication offre de nombreuses promesses. Toutefois, pour qu'il soit effectif, il suppose une technologie facilement accessible et robuste. Cette section s'attache donc à identifier les freins auxquels se heurtent les apprenant-es qui souhaitent intégrer ces méthodes de prototypage rapide dans leurs projets.

#### **Lever les restrictions d'accès**

La première étape, d'ordre pratique, consiste à lever les restrictions d'accès aux machines et à en faciliter l'usage par les étudiant-es. Dans son étude de 2023, Monaco souligne que la majorité des étudiant-es en architecture souhaitent avoir accès à du matériel de fabrication numérique directement au sein de leur université. (Monaco, 2023). L'accessibilité des machines constitue donc un levier d'action primordial pour encourager leur usage. A ce titre, dans le contexte spécifique des étudiant-es de la faculté d'architecture de l'Université de Liège, les résultats montrent qu'aucun matériel n'est mis à disposition. Ces étudiant-es sont désavantagés face aux transformations technologiques actuelles de la profession (Monaco, 2023).

#### **Améliorer la formation de l'étudiant-e**

La complexité d'utilisation et le temps nécessaire à l'apprentissage de ces technologies figurent parmi les freins principaux à la fabrication numérique (Mertens et al., 2023). Dans l'état actuel, atteindre un haut niveau d'intégration demande une grande maîtrise des outils ; or, les étudiant-es manquent souvent d'entraînement et éprouvent un sentiment d'insécurité quant à leur maîtrise des outils (Mertens et al., 2023). Par ailleurs, la maîtrise complète de la modélisation paramétrique constitue également un levier d'action puissant, permettant aux concepteur-rices d'exploiter le plein potentiel de la conception rapide (Collin, 2017).

#### **Entrainer le lâcher-prise des concepteur-rices**

Les technologies de fabrication numériques imposent des contraintes de fabrication, géométriques et de matériaux, impactant directement les prototypes. Généralement, l'architecte souhaite guider la technologie et non l'inverse (Collin, 2017). Pourtant, les solutions sont souvent plus intéressantes et plus efficaces lorsqu'elles sont créées par le processus en lui-même, et non par un choix humain (Carpo, 2017). Ainsi, un levier d'action sur lequel nous pouvons agir est la culture du projet dirigé par le système, un véritable projet de computationnelle, libérant la nécessité de contrôle des solutions obtenues.

## Traiter la question de l'échelle

Dans son ouvrage, Picon (2010) suggère que la question de l'échelle est intimement liée à la distance qui sépare les outils du numérique et la réalité constructive (Picon, 2010). En effet, l'échelle des prototypes est l'une des barrières principales au passage à la fabrication numérique (Collin, 2017 ; Mertens et al., 2023). Chaque machine possède ses propres dimensions et géométries acceptables (à chaque échelle, sa machine). Le projet doit donc s'adapter à la machine qui va le matérialiser, ou adapter son échelle de matérialisation. Cela reste vrai pour les prototypes à échelle 1 ; à l'instar des projets d'impression de béton (Mansouri, 2026).

## Poursuivre l'amélioration de la technologie

Bien que les technologies soient de plus en plus performantes, des optimisations matérielles sont toujours possibles, notamment en ce qui concerne la rapidité des machines. Dans un contexte d'atelier pédagogique où le temps est limité, l'utilisation des imprimantes 3D FDM perd de son intérêt en raison des longs temps d'impression requis (Collin, 2017). Toutefois, ce constat doit aujourd'hui être relativisé : étant donné que ces données datent de 2017 ; nous pouvons supposer que la technologie a grandement évolué depuis, avec des machines **5 à 10 fois plus rapides** aujourd'hui. A titre de comparaison :

- Prusa i MK3, sortie en 2017, atteint une vitesse d'impression de 200mm/s (<https://www.lesimprimantes3d.fr/comparateur/imprimante3d/prusa/prusa-i3-mk3/>, consulté le 31 mai 2026)
- Bambulab H2C, sortie en 2025, atteint une vitesse d'impression de 1000mm/s (<https://bambulab.com/fr-fr/h2c/specs>, consulté le 31 mai 2026)

Outre la vitesse, l'amélioration continue de la qualité des résultats (en impression ou en découpe) et la question de l'échelle s'avèrent indispensables. Ces dernières années, les industriels proposent des machines de plus en plus grandes, visant désormais la construction à l'échelle 1 à l'aide de béton ou de matériaux terreux. Toutefois, ces machines doivent encore être améliorées au niveau des contraintes posées. La technologie doit encore évoluer pour assouplir les contraintes de réalisation. Si les programmes de modélisation offrent des possibilités infinies de formes, les machines n'en autorisent qu'une fraction limitée. Le continuum conception-fabrication prend alors tout son sens, en intégrant aux formes les contraintes de fabrication dès les phases amont de la conception.



## Chapitre 3 QUESTIONS DE RECHERCHE

*« Toute certitude est par essence contradictoire avec la  
philosophie de la recherche »*

*Pierre Joliot, chercheur au CNRS*



L'objectif de notre travail est de s'interroger sur la nature et le rôle des artefacts de conception, tels qu'utilisés dans la conception architecturale. Le point de départ de cette réflexion repose sur la constatation que les maquettes physiques semblaient progressivement délaissées par les étudiant·es, une tendance observée tant à l'Université de Liège en bachelier et master que lors de mon séjour Erasmus à l'ENSA Paris La Villette en première master. Là où la maquette physique est un objet tridimensionnel « *attrapable* » (tangible), le modèle numérique est généralement projeté en deux dimensions sur un écran plat. Cette différence pose la question de l'équivalence du processus de conception posé avec ces deux artefacts, particulièrement en regard de la section 0, où il apparaît que les objets sur écran ne sont pas perçus de la même manière que les objets physiques. Dès lors, ces différences de perception entraînent-elles des disparités dans la conception des projets ? Au fil de notre investigation, nous avons été amenés à élargir le sujet pour englober l'ensemble des représentations externes utilisées dans la conception architecturale par les étudiant·es. La problématique générale de ce mémoire se formule donc de la manière suivante :

**Quels sont les outils utilisés par les étudiant·es en architecture et quels sont les artefacts produits ? Quels rôles ces représentations externes jouent-elles dans le processus de conception et quelle influence de l'environnement d'externalisation dans la conception ?**

Cette recherche s'inscrit dans la longue lignée des recherches sur le processus de conception architecturale. Elle se place plus spécifiquement dans la continuité de l'article de Mertens et al. (2023) et Collin (2017) qui explorait le rôle des prototypes produits par les étudiant·es en architecture dans le contexte de la conception numérique.

Pour mieux définir le thème général de la recherche, quatre sous-questions ont été identifiées :

***À l'ère de l'information, quels rôles pour les maquettes physiques dans la conception architecturale ? Les modèles numériques pourraient-ils remplacer les maquettes physiques ?***

**Hypothèses de recherche :**

1. Les deux sont nécessaires, aussi bien des maquettes physiques de travail que des modèles numériques, à chacun son rôle, et c'est la combinaison des deux environnements qui offre les meilleures solutions (Ibrahim & Pour Rahimian, 2010).
2. Les maquettes physiques permettent une meilleure interaction entre les différents acteurs (concepteurs-concepteurs ou concepteurs-encadrants) grâce à une meilleure perception de l'objet tridimensionnel qu'à travers les écrans, par leur dimension physique « saisissable » (Fairchild et al., 2021; Snow et al., 2014).
3. Les maquettes physiques de travail favorisent la créativité et l'innovation par rapport aux modèles numériques.
4. Les maquettes physiques sont essentielles pour communiquer le projet à des tiers naïfs de l'architecture (Kuppens, 2020).

5. Les modèles 3D numériques répondent aux angoisses de l'étudiant-e en supprimant la peur de l'erreur grâce aux fonctions « undo » (Wu & Chen, 2012) et la contrainte d'économie (gâcher du matériel).

***Pourquoi la maquette physique de travail est-elle moins utilisée par les étudiant-es en conception architecturale ? Pourquoi se limiter à des maquettes de communication ? Comment encourager un retour à la matérialité ?***

#### **Hypothèses de recherche :**

1. La production d'une maquette physique de communication requiert plus de ressources cognitives que celle d'un modèle numérique.
2. Le retour à la matérialité peut avoir lieu grâce à l'emploi de maquettes physiques de travail manuelles et grâce au continuum conception-fabrication.

***Quelle est la charge cognitive des étudiant-es lors du processus de conception ? Cette charge pourrait-elle être diminuée à l'aide des maquettes physiques de travail et du continuum conception-fabrication à l'échelle de la maquette physique ?***

#### **Hypothèses de recherche :**

1. La charge cognitive est élevée durant le processus de conception, en particulier au début. Cela implique que les étudiant-es ne disposent pas de suffisamment de ressources cognitives au moment d'utiliser des maquettes de conception, expliquant leur faible usage.
2. La charge cognitive est différente selon l'artefact utilisé : un objet tangible demandera moins de ressources cognitives qu'une projection 2D pour atteindre un même niveau de compréhension spatiale (Snow et al., 2014).
3. Les maquettes physiques de travail demandent moins de ressources cognitives que les modèles numériques car elles possèdent des caractéristiques similaires à l'esquisse : elles sont malléables, plastiques et réversibles (Lebahar, 1983).
4. Les modèles numériques peuvent piéger les étudiant-es et demander plus de ressources cognitives que l'emploi de maquettes physiques de travail.
5. Le continuum conception-fabrication demande moins de ressources cognitives qu'une production manuelle de maquettes, grâce au déplacement de la complexité vers le modèle numérique (Mansouri, 2026).

#### **Structure du travail**

Ce travail se divise en 3 parties. Tout d'abord, la première partie est consacrée à la méthodologie, qui présente la démarche scientifique sur laquelle nous nous appuyons pour répondre à notre problématique. Ensuite, la seconde partie se consacre à la présentation des résultats obtenus. Et enfin, nous allons discuter des différents résultats obtenus dans le but d'apporter des éléments de réponse aux questions de recherche préalablement posées.



## Chapitre 4 MÉTHODOLOGIE

*« Seuls ceux qui les ont éprouvées peuvent concevoir les  
séductions de la science »*

*Mary Shelley, romancière et dramaturge*

## 4.1 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Afin de répondre aux questions de recherche soulevées, ce travail s'appuie sur une approche qualitative centrée sur le processus de conception mis en place par les étudiant-es d'architecture, qui sont en plein dans le processus d'apprentissage de la conception. Iels sont donc dans l'expérimentation des outils, tant les outils classiques que les outils à la pointe de la technologie. Ce terrain d'étude s'avère donc particulièrement propice pour recueillir des ressentis sur une large palette d'outils, allant des modèles numériques aux techniques de prototypage rapide. Pour ce faire, nous avons procédé en deux grandes étapes : un questionnaire rétrospectif suivi d'un entretien collectif rétrospectif. Le questionnaire avait pour but de dégager les grandes lignes générales du sujet, tout en apportant un éclairage spécifique sur certaines dimensions spécifiques. Ensuite, des entretiens collectifs et rétrospectifs ont été menés afin d'aller plus loin dans la collecte et l'analyse des discours, pensées, expériences subjectives et réalités vécues par les étudiant-es.

Ce chapitre présente la méthodologie choisie, en commençant par l'enquête par questionnaire, puis les entretiens collectifs et terminant par l'analyse des données.

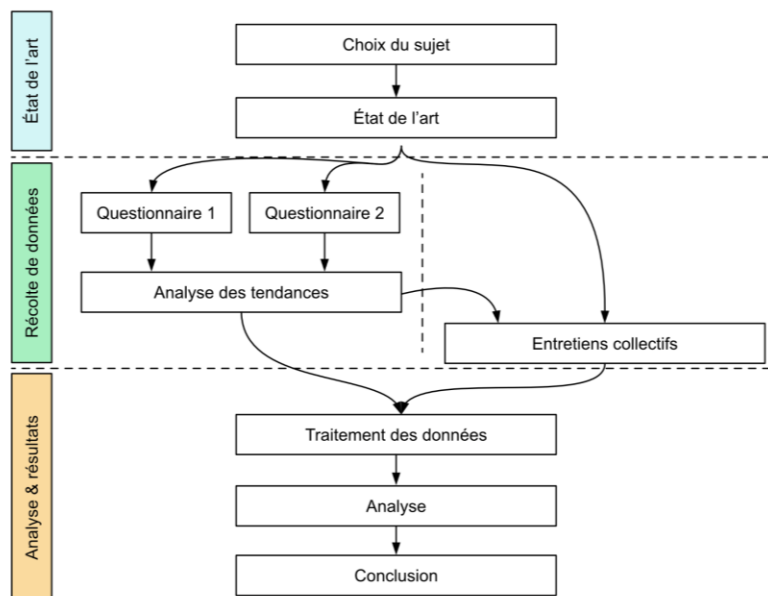


Figure 12 – Schéma méthodologique

Notre stratégie de recherche s'articule autour de **quatre** grandes **phases** successives.

Tout d'abord, nous avons élaboré deux questionnaires rétrospectifs destinés aux étudiant-es. Nous leur avons envoyé ces questionnaires à l'issue de leur projets d'architecture. Ces questionnaires nous permettent d'identifier les tendances générales des étudiant-es et d'orienter les différents axes à suivre pour la recherche.

Nous avons ensuite mené des entretiens rétrospectifs avec des groupes d'étudiant-es au complet. Ceci nous a permis d'adopter une approche par étude de cas pour analyser les dynamiques et les processus de chaque groupe de conception, en regard des artefacts mobilisés.

Après la récolte de ces données, nous avons retranscrit les différents échanges (tant les réponses aux questions posées que les interactions spontanées entre les étudiant-es) et les avons encodés dans des grilles de codage, permettant ainsi de faire une synthèse visuelle des informations recueillies.

Enfin, nous avons procédé à une analyse qualitative des données, afin de répondre aux questions de recherche identifiées à la lecture de l'état de l'art.

## 4.2 LA RECHERCHE QUALITATIVE

Initialement apparue en sciences humaines et sociales, la recherche qualitative s'oppose à la recherche quantitative fondée sur les statistiques. Elle se définit comme une démarche compréhensive explorant la complexité des phénomènes à travers le prisme de l'expérience subjective. Comme tout scientifique, le-a chercheur-euse qualitatif-ve doit constamment garder un esprit critique vis-à-vis des faits, questionner *qui* les construit, comment et dans quel but (Parotte, 2025).

Diverses méthodes peuvent être utilisées pour la collecte des données. Dans son ouvrage, Parotte (2025) présente quatre méthodes de production de données :

- *L'étude de cas* : étude d'un phénomène au travers de l'étude d'un ou plusieurs cas (Parotte, 2025).
- *L'entretien compréhensif* : collecte le sens vécu et le ressenti des personnes impliquées dans le phénomène étudié (Parotte, 2025).
- *Le focus group (entretien collectif)* : entretiens avec un groupe de personnes, où l'analyse porte autant sur le contenu que sur la dynamique entre les participant-es (Parotte, 2025).
- *L'atelier scénario* : projection d'un scénario à des participant-es afin d'explorer une thématique, permettant d'observer la manière dont les participant-es interagissent dans le contexte précis du scénario (Parotte, 2025).

Dans le cas de notre travail, nous avons choisi de retenir la méthode du *focus group*.

## 4.3 L'ENQUÊTE PAR QUESTIONNAIRE

L'étude par questionnaire (ou *enquête par questionnaire*) est une méthode de collecte de données reposant sur un ensemble de questions soumises à un groupe défini d'individus. Fréquemment mobilisée en sciences sociales, en marketing ou dans d'autres domaines de recherche, elle vise à décrire la population étudiée (ses opinions, ses pratiques, ses comportements) ou à mettre à l'épreuve des hypothèses (Singly, 1994). D'un point de vue méthodologique, la conception d'un questionnaire est une étape délicate : les questionnements de recherche doivent être traduits en question concrètes, formulées de manière neutre et non orientée afin d'éviter tout biais chez les répondant-es (Singly, 1994). La validité des réponses repose autant sur la représentativité de l'échantillon sélectionné que sur l'absence d'ambiguïté dans la formulation des questions posées (Singly, 1994).

Dans le cadre de notre étude, nous avons réalisé **deux** questionnaires rétrospectifs à destination des étudiant-es, et ce afin d'identifier les tendances générales au sein de la population étudiante.

### 4.3.1 Premier questionnaire

#### Population :

La population choisie pour ce premier questionnaire rétrospectif est constituée des étudiant-es ingénieurs architectes de **l'Université de Liège**, plus particulièrement **Masters 1 et 2**, ainsi que des étudiant-es architectes de **Master de l'ENSA Paris La Villette**. À L'ULiege, ce sont ainsi 40 étudiant-es concernés (20 femmes et 20 hommes).

Notre choix s'est porté sur les étudiant-es à partir de la quatrième année d'étude afin d'assurer qu'ils maîtrisent la conception et les outils qui y sont liés, notamment les outils du numérique en architecture, qui sont enseignés partiellement en troisième année à l'Université de Liège et à l'ENSA Paris la Villette.

#### Objectifs :

Les objectifs du questionnaire sont de collecter :

- **L'utilisation de la maquette par les répondants.es**
- **L'utilisation du prototypage rapide par les répondants.es**
- **L'utilisation des modèles numériques par les répondants.es**
- **Le ressenti des répondants.es sur le prototypage rapide**
- **Le ressenti des répondants.es sur les maquettes physiques**

### Structure du questionnaire :

Le questionnaire, rédigé par nos soins, se compose de 4 parties : un préambule, une section « Maquettes », une section « Modèles » et une section d'avis général.

Le préambule a pour objectif de définir le profil des répondant·es en termes de faculté et d'année d'étude. Il permet également de récolter quelques détails sur le projet d'architecture des étudiant·es.

La section « Maquettes » interroge l'utilisation et la production de maquettes des étudiant·es. Les éventuelles machines utilisées pour réaliser les maquettes sont collectées, ainsi que les motivations derrière ces choix. La satisfaction liée au résultat finale est aussi récoltée.

La section « Modèles » est un parallèle de la section sur les maquettes, mais concerne les modèles numériques.

La section « Avis général » recueille les points de vue et ressentis sur les maquettes et modèles en dehors de leur dernier projet d'architecture.

Les questions ont été établies en premier lieu dans l'optique de répertorier les différents usages des maquettes physiques et des modèles numériques par les étudiant·es. Pour ce faire, le questionnaire demande aux étudiant·es de répondre selon leur atelier d'architecture le plus récent. Le questionnaire est donc rétrospectif puisqu'il demande aux étudiant·es de se rappeler de leurs choix réalisés lors du quadrimestre précédent.

La plupart des questions invitaient les répondant·es à choisir une ou plusieurs propositions parmi une liste de possibles. Toutes les questions incluaient la possibilité de soumettre une réponse non prévue au moyen de texte libre. Des commentaires additionnels ont ainsi pu être collectés. Les modalités de réponse (e.g. *choix multiple*, *réponse non obligatoire*) étaient précisées à chaque question. Une fois le questionnaire établi, il a été testé auprès d'étudiant·es volontaires de Master 2 en ingénieur architecte de l'ULiège. Ce test a permis de mettre en avant les formulations malheureuses et peu compréhensibles de certaines questions, qui ont ainsi pu être améliorées. Ce test a également permis de calibrer le temps requis pour le compléter, afin de l'indiquer en toute transparence au début du questionnaire.

### Distribution :

Le questionnaire a été réalisé avec Microsoft Forms grâce à l'abonnement fourni par l'ULiège. Le questionnaire a été distribué différemment selon les trois populations visées. Tout d'abord, il a été intégré dans l'organisation de l'atelier de conception architecturale des étudiant·es de première master de l'ULiège par l'équipe encadrante, et a été soumis lors de la dernière semaine de leur atelier d'architecture du premier quadrimestre, après le jury final. Ensuite, il a été envoyé aux étudiant·es de seconde master le lendemain de la fin de leur atelier d'architecture du second quadrimestre. Ensuite, il a été envoyé par email aux équipes de conception de l'atelier du semestre 8 de l'ENSA Paris la Villette. Enfin, il a été envoyé par WhatsApp sur le groupe général des masters de l'ENSA Paris la Villette.



#### 4.3.2 Second questionnaire

##### Population :

La population choisie pour ce second questionnaire sont les étudiant·es de **troisième bachelier** de l'**ULiège**. La classe comporte 26 personnes (13 femmes et 13 hommes). Ce questionnaire diffère du précédent en raison du contexte particulier de cette année d'étude. En effet, ces étudiant·es viennent tout juste de suivre le cours de Modélisation Architecturale Numérique (MAN), un cours qui forme les étudiant·es à la modélisation numérique et aux outils de fabrication numérique. Ces étudiant·es ont donc tous réalisé une ou plusieurs maquettes physiques avec des outils de fabrication numérique, et ont tous·tes réalisé un modèle numérique 3D de leur projet. Les questions ont donc été adaptées pour obtenir leurs ressentis sur ces technologies et plus particulièrement sur le continuum conception-fabrication.

##### Objectifs :

Les objectifs pour ce sous-échantillon sont donc de recueillir des données sur :

- **La facilité d'utilisation de la modélisation numérique**
- **La facilité d'utilisation de la fabrication numérique**
- **Les stratégies de matérialisation utilisées – existence d'un continuum ?**
- **Le ressenti des répondants.es sur le prototypage rapide**
- **Le ressenti des répondants.es sur les maquettes physiques**

##### Structure du questionnaire :

Le questionnaire se compose de deux parties : une section « Focus MAN » et une section d'avis général. Cette dernière section est la même que celle dans le questionnaire précédent.

La section « Focus MAN » interroge les outils utilisés pour créer leur modèle numérique, les machines de fabrication numérique utilisées et la stratégie choisie pour matérialiser le modèle numérique. Enfin, l'avis des étudiant·es est sondé sur les trois aspects du continuum conception-fabrication : la modélisation numérique, la transition entre modélisation et fabrication et la fabrication numérique.

##### Distribution :

Le questionnaire a été envoyé par *Ecampus* aux étudiant·es inscrit·es au cours de MAN la semaine précédant leur jury final.

## 4.4 ENTRETIEN RÉTROSPECTIF APPROFONDI

Afin d'approfondir la recherche, des entretiens rétrospectifs de groupe ont été menés avec des étudiant·es. Duchesne et Haegel (2004) pointent plusieurs caractéristiques fondamentales des entretiens collectifs :

- L'entretien collectif est un *entretien de recherche* qui vise à recueillir un discours (des « *données discursives* ») destiné à l'analyse, provoqué par le·a chercheur·euse sur le thème de recherche. Le but consiste aussi à investiguer la manière dont les participant·es parlent du sujet entre eux·elles.
- La méthode implique un groupe, et contient donc une dimension collective et interactive, qui permet de dépasser la relation classique enquêteur·trice – interviewé·e. Les interactions sociales peuvent ainsi être observées.
- Le groupe peut être « *naturel* », c'est-à-dire composé de personnes qui se connaissent déjà. Il peut également s'agir de personnes dotées d'une identité ou d'une expérience commune, soit un « *groupe d'appartenance* ». Cela peut aussi concerner des individus n'ayant aucune relation préalable, réunis uniquement le temps de l'entretien.

Les auteures précisent que cette définition exclut les réunions à visée commerciale, thérapeutique, de gestion, de formation ou d'aide à la décision publique. Elle exclut également l'observation pure et simple de conversations « *naturelles* » qui n'auraient pas été provoquées par le chercheur·euse, ainsi que les *expériences en groupe* ayant pour but d'enregistrer des actes et non un discours (Duchesne & Haegel, 2004).

### Population :

Le terrain d'investigation que nous avons choisi pour la conduite des entretiens collectifs est l'Atelier de conception architecturale IV, un cours dispensé au premier quadrimestre de la première année de Master en ingénierie architecturale de l'Université de Liège par la professeure Catherine Elsen. Ce choix se justifie par la structure particulière du cursus à l'Université de Liège : l'Atelier IV constitue le dernier atelier de conception architecturale au sens premier du terme. En effet, les ateliers de deuxième année de Master s'orientent plutôt vers des considérations urbanistiques. Les étudiant·es de Master 1 sont donc les plus expérimenté·es en matière de conception architecturale, tout en étant ceux ayant participé le plus récemment à l'Atelier IV.

La formation de ces étudiant·es ne comporte pas de formation aux logiciels architecturaux. Néanmoins, ils ont rapidement appris à utiliser Rhino, Grasshopper et Revit dans le cadre du cours de Modélisation Architecturale Numérique (MAN) dispensé en troisième bachelier. Une initiation rapide à AutoCAD leur a également été proposée en première bachelier. En outre, les étudiant·es ont à leur disposition les outils du Fab52, le fablab dédié de l'université comprenant imprimantes 3D, découpes laser et CNC.

Les étudiant·es participant à l'Atelier IV sont au nombre de 18 (6 femmes et 12 hommes). Les étudiant·es sont âgés de 20 à 25 ans. La classe se compose de :

- 4 étudiant·es issus·es du bachelier en ingénierie architecturale de l'ULiège ;
- 2 étudiant·es issus·es de la passerelle depuis le bachelier en architecture de l'ULiège ;
- 11 étudiant·es issus·es de la passerelle depuis des écoles d'ingénieur de France ;
- 1 étudiant·e en double diplomation avec une école d'ingénieur de France.

L'Atelier IV porte sur la réhabilitation de la Maison de la Métallurgie et de l'Industrie de Liège, le MMIL (Elsen et al., 2025). Dans une parcelle entièrement bâtie de 2750m<sup>2</sup>, le programme de l'Atelier demande aux étudiant-es de réaliser l'avant-projet sommaire (APS) relatif à la requalification de cet espace un nouveau pôle urbain et culturel. Il est demandé d'intégrer au bâtiment 3 grands ensembles : un programme muséal (ainsi que ses archives), un espace pédagogique comprenant notamment un amphithéâtre de 200 places et un service de restauration en self-service. Les étudiant-es travaillent dans un contexte bâti dense, et doivent questionner la conservation ou non de l'existant (à noter qu'une partie, le « laminoir Dothée », est inscrit au patrimoine immobilier culturel de Wallonie – voir Figure 13).



Figure 13 – La façade avant du MMIL et le laminoir « Dothée », telle que présentée par Elsen (2025)

Les exigences de l'Atelier sont similaires à celle d'un avant-projet sommaire. Les étudiant-es devront présenter le projet par quatre planches A0 verticales, comprenant des schémas de principe, des éclatés volumétriques, un schéma structurel, le plan d'implantation, les plans de chaque niveau au 1/200<sup>ème</sup>, deux coupes avec matériaux, un détail technique au 1/50<sup>ème</sup>, les façades principales ainsi que trois perspectives d'ambiance intérieure ou extérieure. En plus de ces panneaux, il est demandé aux étudiant-es de fournir un « book » détaillant le projet dans divers aspects : plans de chaque niveau avec zooms sur des parties spécifiques, autant de coupes que nécessaire, toutes les façades, un tableau des surfaces, une note de calcul d'un nœud structurel, une note d'équilibre « remblais déblais », un schéma de principe HVAC, des tableaux de dimensionnement des systèmes HVAC, des principes SSI et le calcul des largeurs d'évacuation. Enfin, il est demandé aux étudiant-es de réaliser une maquette au 1/250<sup>ème</sup>, qui sera à insérer dans la maquette de site.

L'équipe encadrante est composée de quatre personnes : la professeure Catherine Elsen, ainsi que trois assistant-es. Pour réaliser cet ambitieux programme, les étudiant-es disposent de 14 semaines. Le programme est le suivant :

- Semaine 1 :
  - Présentation de l'énoncé et du contexte.
  - Création des équipes « analyses thématiques ».
  - **Première visite de site.**
  - Visite du studio photo et labo argentique de l'ESA St Luc.
- Semaine 2 :
  - Travail sur les analyses thématiques (par exemple SSI, analyse urbaine ou encore enjeux de mémoire post-industrielle).
  - Capsules théoriques diverses.
  - Visite du centre d'archivage et ateliers de l'Opéra royal de Wallonie.
- Semaine 3 :
  - Présentation des analyses thématiques.

- Visite de l'amphithéâtre Wilmotte et de ses coulisses.
- Visite du musée de la Boverie et de ses coulisses techniques.
- Visite d'une cuisine et d'une laverie professionnelle.
- Travail sur graphes d'adjacences et schémas.
- Semaine 4 :
  - Présentation des graphes d'adjacences et schémas de principe.
  - Rendu de la maquette de site.
  - Capsules théoriques diverses.
- Semaine 5 : Capsules théoriques diverses.
- Semaine 6 : **Seconde visite de site.**
- Semaine 7 : Congés (*voyage de la section à la biennale d'architecture de Venise*).
- **Semaine 8 : Pré-jury.**
- Semaine 9 : Revue structure avec expert-es Greisch.
- Semaine 10 : Revue techniques spéciales avec expert-e ARI.
- Semaine 11 : Capsule sur les rendus IA.
- Semaine 12 : Avancer sur le projet.
- Semaine 13 : Répétition générale en vue du Jury.
- **Semaine 14 : Jury final.**
- Semaine 15 : Exposition des projets ouverte au public.

### Objectifs :

Les objectifs de l'entretien sont les suivants :

- **Identifier le processus de conception mis en place par les répondants.es**
- **Identifier les outils numériques utilisés dans ce cadre**
- **Identifier les outils physiques utilisés dans ce cadre**
- **Identifier le ressenti vis-à-vis de ces outils**
- **Identifier le rôle de ces outils**

### Organisation pratique :

Ces entretiens ont été menés avec les groupes de conception de l'Atelier IV au complet. Leur durée a été fixée à 45 minutes. Bien que la littérature recommande des sessions plus longues (Duchesne & Haegel, 2004), cette durée plus courte est permise par le fait que nos groupes se connaissent déjà bien, après plusieurs mois de travail collectif. De même, les participant-es et l'animateur se connaissent également bien, facilitant la mise en route de l'interview. Après l'interview et l'arrêt des enregistrements, un moment de débrief est prévu avec les répondant-es. Par la suite, il leur a été demandé de nous fournir les différents artefacts de leur processus de conception, en particulier ceux mentionnés lors de l'interview.

Au vu du caractère intrusif de l'enregistrement vidéo, il a été écarté du protocole. En effet, selon Duchesne & Haegel (2004), il peut entraver la spontanéité des échanges et perturber les participant-es, bien qu'il finisse bien souvent par être oublié. Nous avons donc réalisé des enregistrements audios des entretiens au moyen de deux appareils positionnés à deux coins opposés de la table, afin de bien saisir l'ensemble des participant-es correctement en cas de superposition des tours de parole.

Pour garantir la bonne tenue des entretiens, une totale liberté de parole est requise. Pour garantir cette liberté, il est important de considérer plusieurs facteurs limitants. Tout d'abord, les étudiant-es seront présent-es sur base volontaire, en dehors de tout cadre académique. Il n'y a ainsi pas de pression de la note, et la peur de mal répondre est limitée. Ensuite, les entretiens seront tous animés par moi-même, car le cadre de ce travail ne nous permettait pas d'engager un-e enquêteur-trice supplémentaire. Dans leur ouvrage, Duchesne et Haegel (2004) précisent que le profil social de l'enquêteur.trice pose moins question dans le cadre des entretiens collectifs grâce au groupe, car celui-ci permet de renverser la dynamique de l'entretien face-à-face, en offrant le pouvoir aux interviewé-es et non à l'enquêteur-trice. Dans cette configuration, le rôle d'animateur sera de garantir une répartition équitable des temps de parole entre tous les profils, de modérer les profils les plus volubiles et encourager les profils plus discrets afin de recueillir la plus grande variété des points de vue (Duchesne & Haegel, 2004).

### Structure de l'entretien :

Nous avons décidé de structurer l'entretien en 6 parties : un préambule, une section « Ligne du temps », suivis de 4 sections « Focus » apportant un éclairage particulier sur 4 aspects du projet : les logiciels, les maquettes, l'avis personnel quant aux outils et la charge cognitive.

Le préambule a pour objectif de connaître le profil individuel et le parcours des personnes interrogées, ainsi que de saisir rapidement l'enjeu de leur projet architectural.

Le préambule permet d'analyser la dynamique du groupe en regard de ses membres et de traiter les questions du genre et les disparités de formation au sein de la cohorte. L'ensemble des participant-es ont été anonymisés.

La section « Ligne du temps » invite les répondants.es à co-compléter une ligne du temps représentant le processus de conception de leur projet au cours du quadrimestre écoulé.

La section « Focus logiciels » invite les répondants.es à co-compléter un calque contenant l'ensemble des logiciels utilisés dans leur processus de conception.

La section « Focus maquettes » invite les répondants.es à co-compléter un calque reprenant les maquettes physiques utilisées pendant leur processus de conception.

La « Ligne du temps » que nous avons construite s'est grandement inspirée des travaux de Baudoux (2023). Dans son ouvrage, elle y présente diverses lignes du temps retraçant le parcours de conception des groupes de conception étudiés (voir Figure 14). Les informations énoncées par les concepteurs y sont replacées temporellement avec un très haut niveau de détail (Baudoux, 2023). Une seconde source d'inspiration provient des travaux de Collin. (2017) retraçant le parcours de conception des étudiant-es au moyen de lignes du temps hautement simplifiées (voir Figure 15), établies pendant l'analyse des données récoltées.

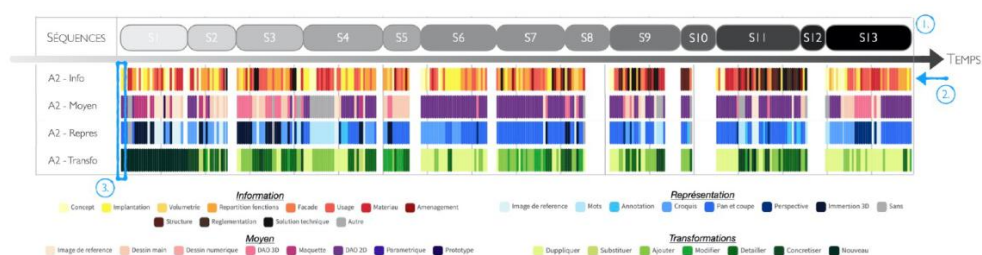


Figure 14 – Analyse du processus de conception tel que proposé par Baudoux (2023), page 133

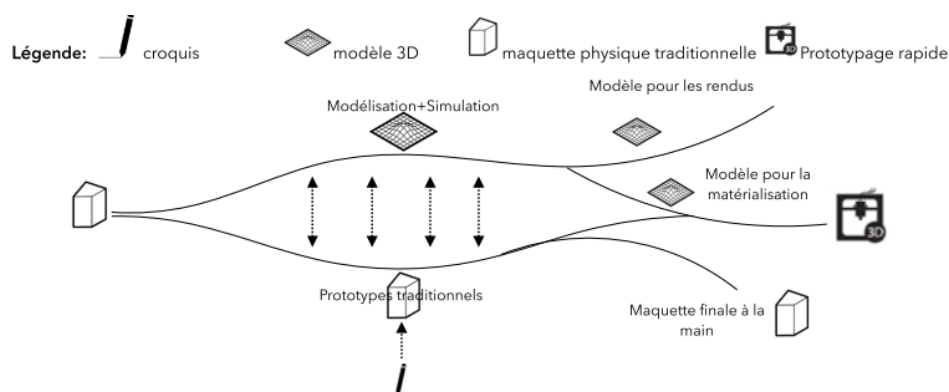


Figure 15 – Analyse du processus de conception tel que proposé par Collin (2017), page 89

La ligne du temps proposée dans ce travail est particulière à deux niveaux (voir Figure 16). Premièrement, elle tente d'équilibrer le niveau de détails, à mi-chemin entre les deux références citées ci-dessus. Deuxièmement, cette ligne du temps ne constitue pas uniquement un outil d'analyse mais est aussi un outil de récolte des données. Les étudiant-es sont amené-es à co-compléter eux-mêmes la ligne du temps. Celle-ci retrace l'ensemble du quadrimestre, semaine par semaine, avec les grandes étapes vécues (e.g. la visite de site, le pré-jury). Elle constitue un support visuel aux discussions entre les membres des groupes interviewés, mais aussi un support temporel permettant de faciliter la récupération des souvenirs liés à certaines périodes particulières du quadrimestre. Cette ligne du temps est imprimée en format A3 et disposée au centre de la table d'interview. Des crayons, porte-mines, bics, feutres et stylos sont mis à disposition tout autour de la table afin de favoriser les échanges et l'expression graphique de chacun-es.

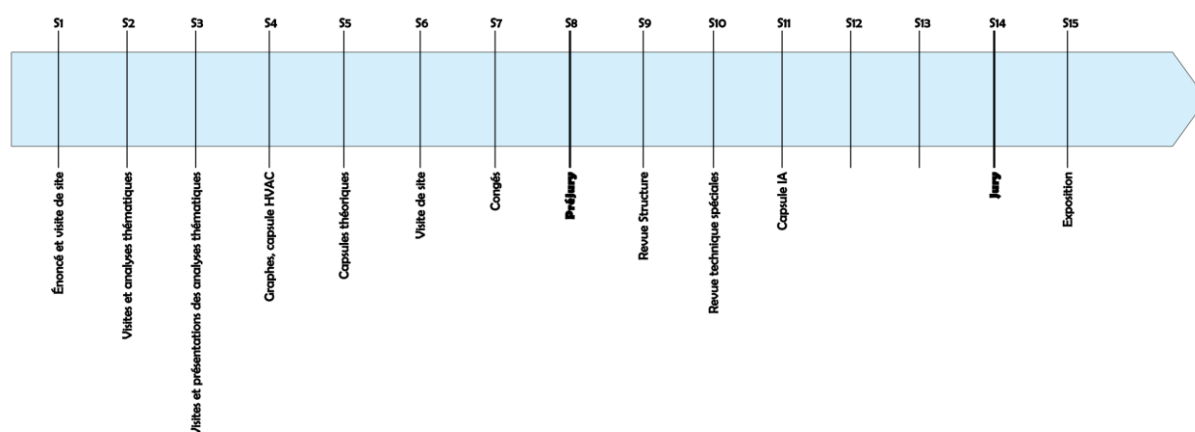


Figure 16 – Ligne du temps telle que proposée en entretien aux groupes

La section « Focus outils » interroge des aspects plus spécifiques liés aux outils utilisés.

Ici, les questions sont posées de manière classique. Les questions posées dépendent du processus de conception des étudiant-es. Elles tentent de respecter les directives préconisées par Duchesne et Haegel (2004) dans leur ouvrage ; c'est-à-dire, ouvertes mais pas trop vagues et orientées vers l'expérience.

Si les étudiant-es ont réalisé des modèles numériques mais pas de maquettes physiques, alors les questions posées sont les suivantes :

- Pensez-vous avoir gagné du temps en utilisant un modèle numérique plutôt qu'une maquette physique – carton, etc ? Si oui, pourquoi ?
- *Relance si nécessaire : Trouvez-vous que faire une maquette physique aurait été plus de travail ?*

Si les étudiant-es ont réalisé une ou plusieurs maquettes physiques, les questions sont :

- Quel a été l'impact de votre maquette physique sur votre projet ?
- Qualifierez-vous la maquette physique d'outil de conception ? Si oui, pourquoi ?

Enfin, si les étudiant-es ont utilisé des machines à commande numérique dans la réalisation de leurs maquettes, ces deux questions supplémentaires leur sont posées :

- Est-ce que les machines du Fab52 vous ont facilité la tâche, ou bien était-ce une complexité supplémentaire à gérer ?
- La maquette physique [*imprimée en 3D*] / [*à la découpe laser*] a-t-elle mené à des modifications du projet ? Avez-vous vu le projet autrement une fois matérialisé ?

La section « Focus charge cognitive » interroge la charge cognitive des répondants.es au fil de leur processus de conception.

La charge cognitive peut être évaluée de différentes manières. Dans son article, Mille (2021) identifie les approches existantes sous deux catégories : les mesures objectives et les mesures subjectives (Mille, 2021).

### Mesures objectives

Une première approche est l'évaluation de la charge lors de la réalisation d'une activité grâce au principe de la *double tâche*, tel que théorisé par Baddeley (1999). Ce principe postule que la réalisation simultanée de deux tâches impose une division des ressources cognitives. *In fine*, la part d'attention allouée à chaque activité s'avère inférieure à celle qui y serait consacrée si elles étaient réalisées de manière séparée, étant donné que nos ressources mentales ne sont pas infinies. Sur le plan pratique, deux approches coexistent : la tâche *concurrente continue* vs *discontinue* (Mille, 2021). La première compare la performance d'un individu réalisant une tâche isolée avec celles obtenues sous l'effet d'une *double tâche*, permettant ainsi de mesurer objectivement la *surcharge cognitive* induite. La seconde évalue le temps de réponse et le taux d'erreur à une tâche *concurrentielle discontinue*, c'est-à-dire une tâche intermittente venant perturber la réalisation de la tâche (Mille, 2021). Une autre manière de récolter des données objectives liées à la charge cognitive consiste à récolter des indices physiologiques, tels que l'activité cardiaque, l'oculomotricité, l'activité cérébrale, etc. (Mille, 2021)

### Mesures subjectives

Les mesures subjectives visent à évaluer la charge cognitive en questionnant le ressenti de la personne quant à sa propre charge mentale. De nombreux questionnaires ont été mis au point dans ce cadre. L'un des premiers questionnaires créés est le NASA-TLX (*Task Load Index*, Hart & Staveland, 1988), qui évalue la charge de travail sur 6 dimensions : exigence mentale, exigence physique, exigence temporelle, performance, effort et frustration. Ce questionnaire permet d'évaluer de manière satisfaisante la charge *intrinsèque*, mais des résultats ultérieurs démontrent qu'il est moins performant pour appréhender la charge cognitive totale (Naismith et al., 2015).

D'autres questionnaires ont été proposés par la suite, notamment celui de Klepsch et al. (2017). C'est un questionnaire en 7 questions (voir Figure 17), deux étant dédiées à la charge intrinsèque, deux à la charge extrinsèque et trois à la charge cognitive germane (Klepsch et al., 2017). Le but de ce questionnaire est de mieux évaluer les aspects extrinsèque et germane, sous-estimés par les questionnaires précédents. Les réponses se situent sur une échelle de Likert à 7 points. (Klepsch et al., 2017). Une méta-analyse a démontré que ce questionnaire est fiable et valide pour l'évaluation des trois composantes de la charge cognitive (Krieglstein et al., 2022).

| Type of load | Item - German                                                                                 | Item - English                                                                    |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| ICL          | Bei der Aufgabe musste man viele Dinge gleichzeitig im Kopf bearbeiten.                       | For this task, many things needed to be kept in mind simultaneously.              |
| ICL          | Diese Aufgabe war sehr komplex.                                                               | This task was very complex.                                                       |
| GCL          | Bei dieser Aufgabe musste ich selbst ganz aktiv nachdenken.                                   | For this task, I had to highly engage myself.                                     |
| GCL          | Bei dieser Aufgabe musste ich intensiv überlegen, wie einzelne Dinge gemeint sind.            | For this task, I had to think intensively what things meant.                      |
| ECL          | Bei dieser Aufgabe ist es mühsam, die wichtigsten Informationen zu erkennen.                  | During this task, it was exhausting to find the important information.            |
| ECL          | Die Darstellung bei dieser Aufgabe ist ungünstig, um wirklich etwas zu lernen.                | The design of this task was very inconvenient for learning.                       |
| ECL          | Bei dieser Aufgabe ist es schwer, die zentralen Inhalte miteinander in Verbindung zu bringen. | During this task, it was difficult to recognize and link the crucial information. |

ICL, intrinsic cognitive load; ECL, extraneous cognitive load; GCL, germane cognitive load.

Figure 17 – Questions proposées dans le questionnaire de Klepsch et al. (2017)

Dans le cadre de notre étude, nous avons choisi d'utiliser une mesure subjective, à l'aide d'un questionnaire s'inspirant grandement du questionnaire de Klepsch et al (2017). Celui-ci se compose de 7 questions (voir Figure 17). Dans un premier temps, nous avons traduit ces questions en français (voir Figure 18). Ensuite, afin d'adapter les questions au monde de la conception architecturale, l'une des questions a été remplacée. La question n°7 portant sur la charge cognitive extrinsèque était « *Cette étape était mal conçue pour l'apprentissage* ». Cette question ne semblait pas adaptée à l'évaluation d'une semaine de conception. Elle a donc été remplacée par « *Pendant cette étape, j'avais peur de commettre des erreurs* », la peur de se tromper, commettre des erreurs étant liée à la charge cognitive extrinsèque (Fraser et al., 2015).

| Type de Charge cognitive | Original questions from Klepsch et al. (2017)                                     | Questions proposées                                                               |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| CCI                      | For this task, many things needed to be kept in mind simultaneously.              | Pendant cette étape, il fallait garder à l'esprit de nombreuses choses à la fois. |
| CCI                      | This task was very complex                                                        | Cette étape était très complexe.                                                  |
| CCG                      | For this task, I had to highly engage myself.                                     | Pour cette étape, j'ai dû beaucoup m'investir.                                    |
| CCG                      | For this task, I had to think intensively what things meant.                      | Pour cette étape, j'ai dû réfléchir intensément à la signification des choses.    |
| CCE                      | During this task, it was exhausting to find the important information.            | Pendant cette étape, c'était épuisant de trouver des informations utiles.         |
| CCE                      | The design of this task was very inconvenient for learning.                       | /                                                                                 |
| CCE                      | During this task, it was difficult to recognize and link the crucial information. | Pendant cette étape, il était difficile de lier les éléments entre eux.           |
| CCE                      | /                                                                                 | Pendant cette étape, j'avais peur de commettre des erreurs.                       |

CCI, charge cognitive intrinsèque ; CCE, charge cognitive extrinsèque ; CCG, charge cognitive germane.

Figure 18 – Questions proposées dans l'entretien rétrospectif approfondi



Les participant-es indiquent leurs réponses sur une échelle Likert à 7 points, allant de « Pas du tout » à « Tout à fait ». Les scores obtenus sont moyennés par sous-catégorie, pour obtenir le score aux trois types de charge cognitive. Le score total est obtenu par la moyenne de toutes les questions.

## 4.5 TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNÉES

Les données conversationnelles recueillies lors des entretiens sont analysées par un codage temporel du processus de conception utilisé. L'objectif est de reconstruire le processus mis en place par les étudiant-es, en s'aidant à la fois de la ligne du temps produite par le groupe de conception, mais aussi du discours et des échanges entre les membres. Le but est d'obtenir une vue détaillée des différents outils utilisés dans la conception, ainsi que, dans la mesure du possible, les zones travaillées et les phases de conception que les étudiant-es ont traversé. La méthode d'analyse adoptée utilise du codage ouvert et du codage sélectif (codage par induction).

Les catégories d'outils pour la production d'*artefacts* identifiées au préalable sont les suivantes :

- Outils d'analyse
- Outils d'esquisse
- Outils de référence
- Outils de modélisation numérique
  - o 2D
  - o 3D
  - o Paramétrique
  - o Sémantique
- Outils de post-production
- Outils de diapositives
- Outils d'IA
- Maquettes physiques

Les grilles de codage pour les groupes prendront donc de la forme suivante (voir Figure 19).

| Groupe X               | Semaine             | S1                        | S2                             | S3                                   | S4                    | S5                  | S6                 | S7     | S8             | S9              | S10                       | S11        | S12 | S13 | S14         | S15        |
|------------------------|---------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|--------|----------------|-----------------|---------------------------|------------|-----|-----|-------------|------------|
|                        | Phase prévue        | Enquête et visite de site | Visites et analyses théoriques | Visites et présentation des analyses | Graphes, capsule HVAC | Capsules théoriques | Visite de site n°2 | Congés | <b>Préjury</b> | Revue structure | Revue technique spéciales | Capsule IA |     |     | <b>Jury</b> | Exposition |
|                        | Phase vécue         |                           |                                |                                      |                       |                     |                    |        |                |                 |                           |            |     |     |             |            |
|                        | Analyse             |                           |                                |                                      |                       |                     |                    |        |                |                 |                           |            |     |     |             |            |
|                        | "Esquisse"          |                           |                                |                                      |                       |                     |                    |        |                |                 |                           |            |     |     |             |            |
|                        | Références          |                           |                                |                                      |                       |                     |                    |        |                |                 |                           |            |     |     |             |            |
| Modélisation numérique | 2D                  |                           |                                |                                      |                       |                     |                    |        |                |                 |                           |            |     |     |             |            |
|                        | 3D                  |                           |                                |                                      |                       |                     |                    |        |                |                 |                           |            |     |     |             |            |
|                        | Sémantique          |                           |                                |                                      |                       |                     |                    |        |                |                 |                           |            |     |     |             |            |
|                        | Post-production     |                           |                                |                                      |                       |                     |                    |        |                |                 |                           |            |     |     |             |            |
|                        | Diapositives        |                           |                                |                                      |                       |                     |                    |        |                |                 |                           |            |     |     |             |            |
|                        | IA                  |                           |                                |                                      |                       |                     |                    |        |                |                 |                           |            |     |     |             |            |
|                        | Maquettes physiques |                           |                                |                                      |                       |                     |                    |        |                |                 |                           |            |     |     |             |            |
|                        | Zone travaillée     |                           |                                |                                      |                       |                     |                    |        |                |                 |                           |            |     |     |             |            |
|                        | Emotions            |                           |                                |                                      |                       |                     |                    |        |                |                 |                           |            |     |     |             |            |

Figure 19 – Grille de codage vierge

## Chapitre 5    RÉSULTATS

*« La science n'est pas plus qu'une tentative d'explication d'un miracle inexplicable, et l'art une interprétation de ce miracle »*

*Ray Bradbury, écrivain d'anticipation*

## 5.1 RÉSULTATS DU QUESTIONNAIRE

### 5.1.1 Première cohorte

La première cohorte à avoir répondu au questionnaire est constituée des étudiant·es de Master 1 de l'Université de Liège, avec **13 répondant·es** (classe entière).

**Contexte** : le projet le plus récent suivi par ces étudiant·es est la transformation d'un musée existant (cf. section 4.3.1). Dans le cadre de cet Atelier, les étudiant·es ont réalisé à la fois des maquettes de travail et des maquettes de jury.

**Maquettes physiques** : Sur les 13 répondant·es, 5 personnes (38%) estiment avoir délibérément choisi de réaliser une/des maquette(s). Pour les 8 autres, la réalisation de maquette(s) a été décrite comme « imposée ». Pour 30%, la maquette constitue un outil indispensable à la conception du projet. Les maquettes sont un outil important mais pas indispensable pour 53%. La maquette est un outil indispensable à la présentation/communication du projet pour 46%. Seul·es 2 étudiant·es pensent que la maquette est indispensable pour les deux aspects réunis. 23% pensent que la maquette est un outil trop chronophage. Enfin, 2 étudiant·es pensent que le modèle numérique est généralement suffisant. L'un des deux étudiant·es a justifié sa réponse par le commentaire suivant : « *Les outils numériques actuels permettent de plus en plus à facilement communiquer l'aspect 3D d'un projet.* ».

**Machines de fabrication numérique** : Tous·tes ont utilisé les machines de fabrication numérique pour la réalisation de leurs maquettes. Plus précisément, tous·tes ont utilisé l'impression 3D et la découpe laser. 50% trouvent que la technologie est facile d'utilisation et n'ont pas rencontré de problème particulier. Toutefois, 46% des étudiant·es ont rencontré quelques problèmes « machines » (identifiés dans le questionnaire par « exemple : erreur de découpe, impression instable »). 70% ont été satisfaits du résultat. Pour 76% des étudiant·es, les machines représentent un gain de temps par rapport aux méthodes traditionnelles. Elles sont indispensables à la présentation/communication du projet pour 46% des étudiant·es, et indispensables à la conception du projet pour un·e étudiant·e. Les machines sont considérées comme des outils trop chers par un·e étudiant·e, et sont considérées comme difficiles d'accès (peu de créneaux, difficultés organisationnelles) par 13% des étudiant·es.

**Modèles numériques** : Tous·tes ont utilisé un modèle 3D numérique. Les raisons avancées par les étudiant·es sont :

- Travailler en volumétrie pour 92%,
- Réaliser la maquette physique pour 76%,
- Réalisation des vues d'ambiance (rendus, collages) pour 76%,
- Travailler en façades pour 53%,
- Travailler l'insertion dans le site/contexte pour 53%.

Seule une personne a utilisé le modèle pour des aspects techniques/calculs.

### 5.1.2 Deuxième cohorte

La première cohorte à avoir répondu au questionnaire est constituée des étudiant·es de Master 2 de l'Université de Liège, avec **13 répondant·es** (classe de 22 personnes).

**Contexte :** le projet le plus récent suivi par ces étudiant·es est un projet de transformation urbaine de larges portions de la ville d'Eupen. Dans le cadre de cet Atelier, aucune maquette n'était imposée. En revanche, il était attendu une vue axonométrique détaillée du projet. Le projet se faisait en groupes de 3 étudiant·es. La classe compte 22 personnes.

**Maquettes physiques :** Aucun·e des répondant·es n'a réalisé de maquettes pour cet Atelier. Aucun·e des répondant·es ne pense que la maquette est un outil indispensable à la conception du projet. Les maquettes sont un outil important mais pas indispensable pour 76%. Seul·es trois étudiant·es pensent que la maquette est un outil indispensable à la présentation/communication du projet. 46% pensent que la maquette est un outil trop chronophage. Enfin, 30% pensent que le modèle numérique est généralement suffisant.

**Machines de fabrication numérique :** Pour 92% des étudiant·es, les machines représentent un gain de temps par rapport aux méthodes traditionnelles. Elles sont indispensables à la présentation/communication du projet pour 46% des étudiant·es, et indispensables à la conception du projet pour un·e seul·e étudiant·e. Les machines sont considérées comme des outils trop chers par un·e étudiant·e, et sont considérées difficiles d'accès (peu de créneaux, difficultés organisationnelles) par 23% des étudiant·es. Enfin, un·e étudiant·e trouve que la réalisation des fichiers est trop chronophage et que l'utilisation des machines est complexe. L'un·e des étudiant·es a complété sa réponse par le commentaire suivant : « *Plus précis et moins d'erreurs que manuellement.* »

**Modèles numériques :** Tous·tes ont utilisé un modèle 3D numérique. Presque tous·tes ont également utilisé un modèle numérique 2D. Les raisons avancées par les étudiant·es sont :

- Travailler en volumétrie pour 100%,
- Travailler l'insertion dans le site/contexte pour 92%,
- Réalisation des vues d'ambiance (rendus, collages) pour 92%,
- Travailler en façades pour 53%,
- Des aspects techniques/calculs pour 46%.

### 5.1.3 Troisième cohorte

La troisième cohorte à avoir répondu au questionnaire est constituée des étudiant·es de Master 1 de l'ENSA Paris la Villette, avec **4 répondant·es** (4 groupes sur 8).

**Contexte :** rénovation d'un bâti industriel existant (Atelier S8). La production de maquettes physiques était imposée, avec un rythme d'environ une maquette toutes les deux semaines. Les 4 répondant·es faisaient partie de 4 groupes de conception différents (chaque groupe comprenant entre 2 et 4 personnes, pour un total de 8 groupes dans la classe). Les résultats seront donc exprimés en termes de groupe de conception.

**Maquettes physiques :** Un groupe de conception estime avoir réalisé une maquette par choix, en plus de la contrainte pédagogique. La maquette est un outil indispensable à la conception du projet pour un seul des 4 groupes. La maquette est un outil indispensable à la présentation/communication du projet pour 2 groupes. 2 groupes estiment que la maquette est un outil trop chronophage.

**Machines de fabrication numérique :** 3 groupes ont utilisé des machines de fabrication numériques. Les machines utilisées sont la découpe laser et le cutter numérique, complétées de découpes manuelles pour 2 groupes. Ces trois groupes ont tous rencontré des erreurs machines, et un groupe a rencontré des problèmes dans la réalisation de leurs fichiers de découpe. Seuls 2 groupes sur 3 ont été satisfaits du résultat. Le groupe n'ayant pas eu recours aux machines de fabrication numérique expliquent ce choix par un manque de planification et une difficulté d'accès aux machines (manques de créneaux horaires disponibles). Pour 3 groupes, les machines représentent un gain de temps par rapport aux méthodes traditionnelles. Pour un groupe, la réalisation des fichiers est trop chronophage. Les machines sont considérées comme des outils trop chers et difficiles d'accès par un groupe. Enfin, un groupe n'a jamais utilisé de machines de fabrication numérique et n'avait pas d'avis à leur sujet.

**Modèles numériques :** Seuls deux groupes ont utilisé un modèle numérique 3D. Les raisons avancées sont l'insertion dans le site/contexte pour un groupe, et le travail en volumétrie, le travail en façades et la réalisation de vues d'ambiance pour le second groupe. Un groupe a réalisé un modèle numérique 2D, et un groupe n'a réalisé aucun modèle numérique du projet.

#### 5.1.4 Quatrième cohorte

La quatrième cohorte est constituée des étudiant·es de Master de l'ENSAPLV, conviés à répondre au sondage, avec **7 répondant·es**.

**Contexte** : variés. 6 étudiant·es ont réalisé une ou plusieurs maquette(s), donc 5 étudiant·es lors d'un projet de groupe.

**Maquettes physiques** : seul·e un·e étudiant·e a réalisé une maquette par choix, et deux étudiant·es estiment avoir choisi d'en réaliser en plus de la contrainte académique. Pour les 4 autres étudiant·es, la maquette physique a été décrite comme imposée. 57% pensent que la maquette est un outil trop chronophage. 42% des répondant·es pensent que la maquette est un outil important, mais pas indispensable. La maquette est un outil indispensable à la conception du projet pour 28%. La maquette est un outil indispensable à la présentation/communication du projet pour 28%. Enfin, 28% pensent que le modèle numérique est généralement suffisant.

**Machines de fabrication numérique** : 4 étudiant·es ont utilisé des machines de fabrication numérique. Les machines utilisées sont la découpe laser, le cutter numérique, la CNC et le fil chaud numérique, avec des découpes manuelles en complément pour 4 étudiant·es. Deux des quatre étudiant·es ont été satisfait·es du résultat. Les deux étudiant·es n'ayant pas utilisé de machines de fabrication numérique expliquent leur choix par des préférences personnelles. L'un·e des étudiant·es a notamment indiqué que ne pas utiliser de machines était « *Plus simple et rapide (maquette en argile)* ». Les machines sont indispensables à la présentation du projet pour 71%, et indispensables à la conception pour 28%. Elles représentent un gain de temps par rapport aux méthodes traditionnelles pour 57%. Les machines sont considérées comme des outils difficiles d'accès par 57%. Les machines sont des outils trop chers pour 28%, la réalisation des fichiers est trop complexe/chronophage pour 28%, de même que la complexité d'utilisation trop élevée pour 28%.

**Modèles numériques** : Tous·tes les étudiant·es sauf un·e ont réalisé un modèle numérique de leur projet. Deux étudiant·es ont réalisé un modèle numérique 2D, deux étudiant·es ont réalisé un modèle numérique 3D et deux étudiant·es ont réalisé les deux. Les raisons avancées par les étudiant·es pour expliquer la création d'un modèle numérique 3D sont :

- Travailler en volumétrie pour 75%,
- Réaliser la maquette physique pour 50%,
- Réalisation des vues d'ambiance (rendus, collages) pour 50%,
- Travailler l'insertion dans le site/contexte pour 50%,
- Vérifier/calculer des aspects techniques pour 25%.

### 5.1.5 Cinquième cohorte

La cinquième cohorte est constituée des étudiant-es de 3<sup>ème</sup> bachelier de l'Université de Liège, avec **15 répondant-es** (sur une classe de 22 élèves).

**Contexte** : dans le cadre du cours de MAN, les modèles numériques et de fabrication numériques sont imposés.

**Maquettes physiques** : 9 répondant-es pensent que la maquette est un outil important mais pas indispensable. La maquette est un outil indispensable à la conception du projet pour 2 répondant-es et un outil indispensable à la présentation/communication du projet pour 5. Enfin, 1 pense que le modèle numérique est généralement suffisant. 5 pensent que la maquette est un outil trop chronophage. Un-e justifie sa réponse par la précision suivante : « *très chronophage, mais c'est le plus important pour présenter un projet à des clients car c'est l'outil sur lequel la majorité se projette le mieux* ».

**Machines de fabrication numérique** : Elles représentent un gain de temps par rapport aux méthodes traditionnelles pour 14. Les machines sont indispensables à la présentation du projet pour 7, et indispensables à la conception pour 2. Les machines sont des outils trop chers pour 2 et trop difficiles d'accès pour 1. Un-e répondant-e enrichit sa réponse du commentaire suivant « *Facile à utiliser, ça prend un peu de temps et de réflexion mais le rendu est plus propre qu'à la main* ».

#### Continuum conception-fabrication :

La stratégie utilisée pour la fabrication est d'exporter directement leur modèle numérique pour 7, tandis que 3 indiquent devoir réaliser des étapes supplémentaires, et 4 indiquent avoir modélisé de nouveau le projet pour la fabrication. Les raisons avancées sont de diminuer le niveau de détails du modèle pour 7 et permettre la fabrication pour 3. La modélisation numérique est l'étape la moins aisée, tandis que la fabrication est plutôt aisée.



Figure 19 – Réponses des étudiant-es de MAN ; échelle de Likert à 7 points

### 5.1.6 Tendances générales – Ateliers d'architecture

Les outils utilisés par les répondant-es sont reportés à la Figure 20. Sur les 39 répondant-es, tous-tes ont réalisé un modèle numérique de leur projet. Plus précisément, 8 ont réalisé un modèle 3D, 5 un modèle 2D et 26 ont utilisé les deux. 25 répondant-es ont réalisé une maquette physique, dont 22 qui ont utilisé pour ce faire des outils de fabrication numérique.

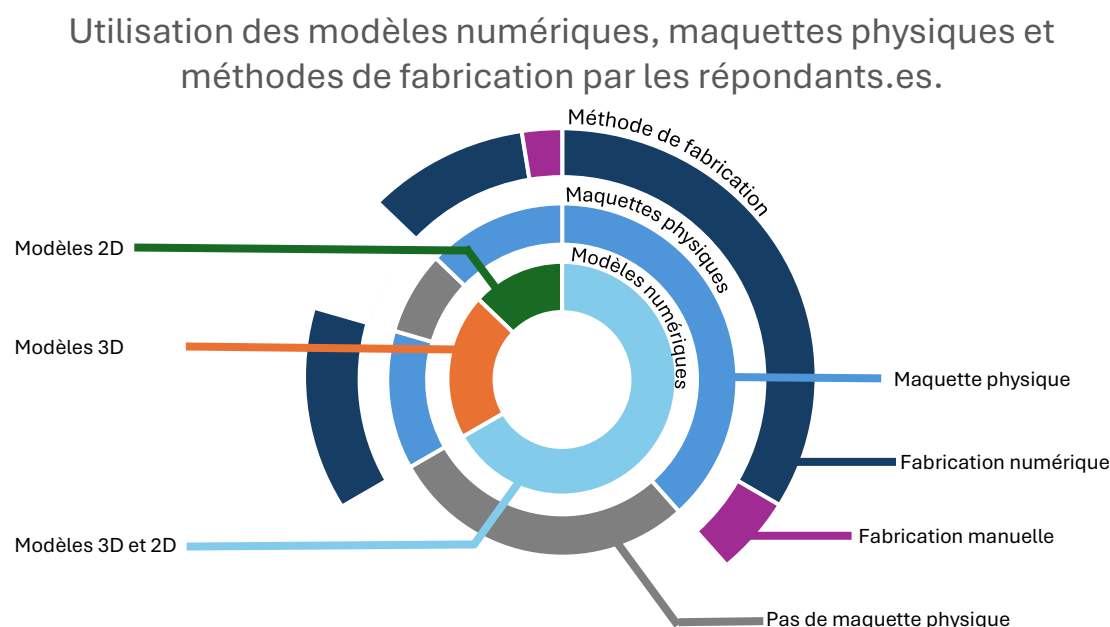


Figure 20 – Utilisation des modèles numériques, maquettes physiques et méthodes de fabrication par les répondant-es

Sur les 34 étudiant-es ayant réalisé un modèle numérique 3D, 31 expliquent ce choix par le travail en volumétrie. 26 l'utilisent pour la réalisation de vues d'ambiance ou collages. 23 l'utilisent pour travailler l'insertion dans le site. Viennent ensuite le travail en façade pour 16, la réalisation de la maquette physique pour 15 et vérifier ou calculer des aspects techniques pour 8. Ces résultats sont reportés à la Figure 21.

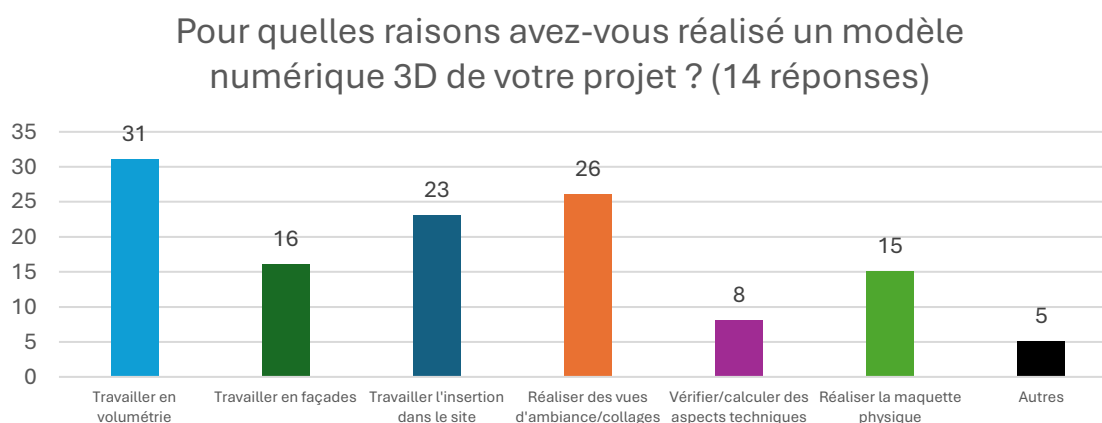


Figure 21 – Raisons d'utilisation des modèles numériques 3D



### 5.1.7 Tendances générales – Avis des étudiant·es

Au total, ce sont 54 répondant·es qui ont pris part aux deux sondages, dont 39 répondant·es au premier sondage, et 15 au sondage spécifique à MAN. L'avis des 54 répondant·es concernant la maquette physique en général est que la maquette est un outil important mais pas indispensable pour 30 d'entre eux·elles. Pour 20, la maquette est un outil trop chronophage. Pour 18, la maquette est indispensable à la présentation et communication du projet. Les modèles numériques sont généralement suffisants pour 11, tandis que 9 considèrent que la maquette est un outil indispensable à la conception du projet. Ces résultats sont reportés à la Figure 22.

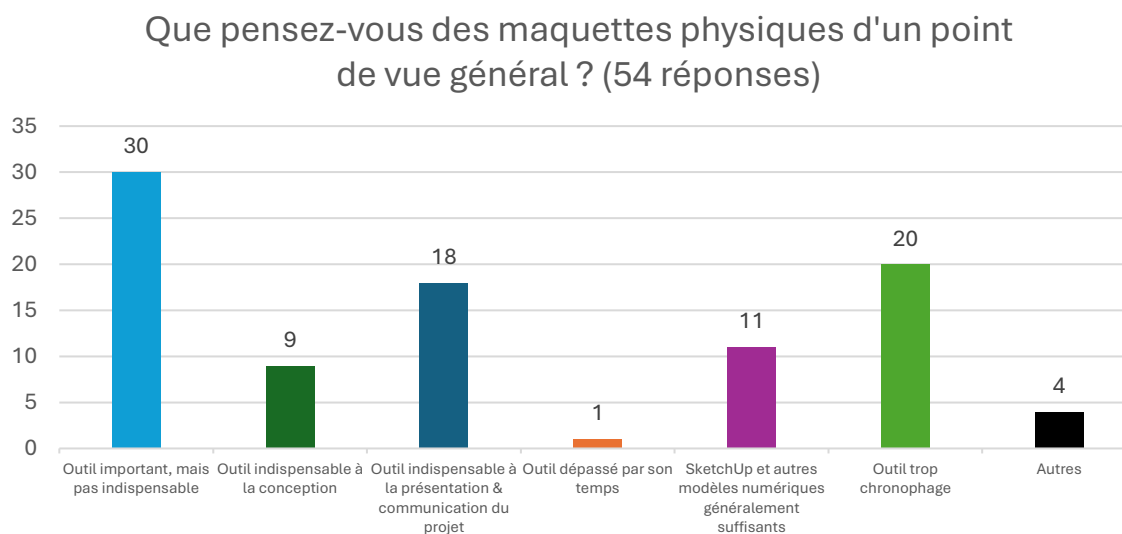


Figure 22 – Avis des étudiant·es sur les maquettes physiques

L'avis des 54 répondant·es concernant les machines de fabrication numérique est reporté à la Figure 23. Pour 44 répondant·es, les machines sont un gain de temps. Elles sont indispensables à la présentation du projet pour 24, et indispensables à la conception pour 6. Les difficultés d'accès, de coût et la difficulté de création des fichiers reviennent comme freins à leur usage.

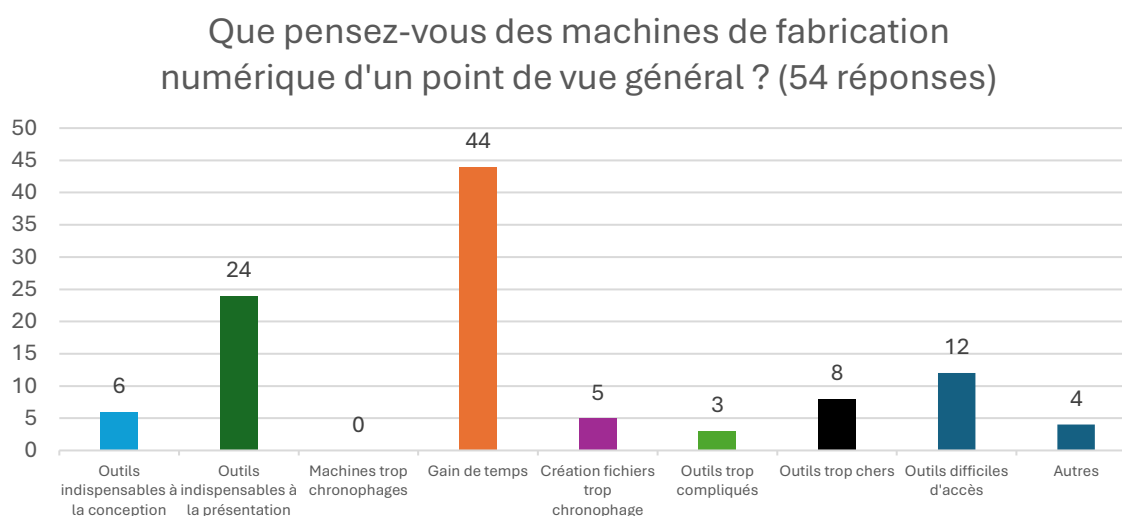


Figure 23 – Avis des étudiant·es sur les machines de fabrication numériques

## 5.2 RÉSULTATS DES ENTRETIENS

Ce chapitre présente les résultats des entretiens menés avec les étudiant·es. Tout d’abord, l’ensemble des outils utilisés par les étudiant·es est brièvement présenté. Ensuite, une seconde section contient le déroulé du processus de conception mis en place par les différents groupes. Enfin, une troisième section présente les résultats liés au questionnaire d’évaluation de la charge cognitive.

### 5.2.1 Outils utilisés dans la conception

Cette section répertorie l’ensemble des outils cités par les étudiant·es lors des entretiens et en fait une brève présentation.

Tout d’abord, la première catégorie d’outils sont des outils de type « esquisse ». L’esquisse manuelle sur papier est souvent citée, de même que des outils d’esquisse numérique.

**ProCreate** : application de dessin 2D raster sur iPad et iPhone uniquement. L’application est payante.

**Concept** : application de dessin 2D hybride vectoriel et raster sur tablette (Voir Figure 24). L’application est accessible gratuitement de manière limitée.

Ensuite, la seconde catégorie d’outils correspond aux outils de référence. Plus particulièrement, **Pinterest** est souvent cité. Il s’agit d’un catalogue gratuit d’images en ligne, avec un algorithme puissant de recommandation par similarité au contenu visionné.

Ensuite viennent des outils de modélisation numérique. Trois catégories d’outils se dégagent : les outils de dessin 2D, les outils de modélisation 3D et les outils de modélisation sémantique.

**Rayon** : logiciel de dessin 2D basé entièrement sur le Web. Le dessin est un tableau blanc infini (voir Figure 25) et est partagé en temps réel entre les collaborateur·rices. L’application est accessible gratuitement de manière limitée.

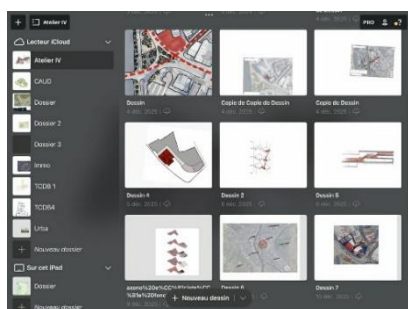


Figure 24 – Page d’accueil de Concept du groupe n°3

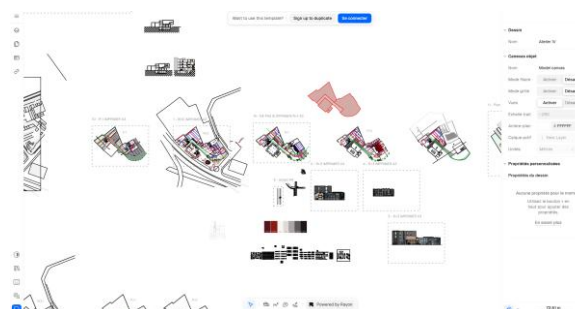


Figure 25 – Capture d’écran de l’interface du projet

Rayon du groupe n°3

**AutoCAD** : logiciel de dessin 2D et de modélisation 3D (Voir Figure 26). Les étudiant-es ne connaissent ou n'utilisent que l'aspect modélisation 2D du programme, l'aspect modélisation 3D étant moins connu/moins accessible. L'application est accessible gratuitement avec un accès étudiant.

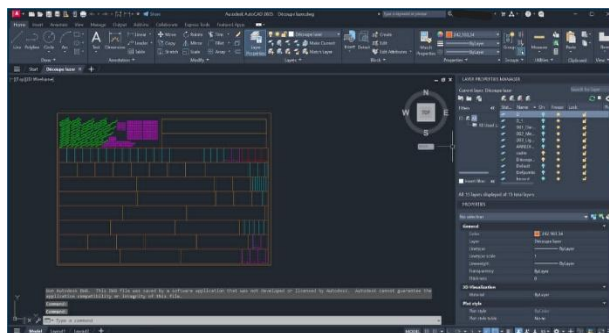


Figure 26 – Dessin des éléments de la maquette du groupe n°3 sur AutoCAD en vue de leur découpe au laser

**SketchUp** : logiciel de modélisation 3D orienté architecture, édité par Trimble. Le logiciel nécessite un abonnement.

**Rhino** : logiciel de modélisation 3D, supportant de nombreuses opérations, y compris de la modélisation computationnelle avec Grasshopper. Le logiciel nécessite un abonnement. L'université peut fournir des licences ponctuellement aux étudiant-es.

**Revit** : logiciel de modélisation BIM, permettant de générer plans, coupes, façades, volumétrie et rendus dans une moindre mesure.

Ensuite, plusieurs outils de postproduction sont utilisés par les étudiant-es :

**D5 Render** : logiciel de rendu 3D, supportant l'import de modèles à partir de nombreux logiciels de modélisation externe. Le logiciel est accessible gratuitement.

**Twinmotion** : logiciel de rendu 3D, similaire à D5, à la différence qu'il est basé sur un noyau Unreal engine allégé (Epic Games). Le logiciel est gratuit.

**Affinity** : logiciel de dessin vectoriel, raster, retouche photo et mise en page. Le logiciel est gratuit.

**Photoshop** : logiciel de retouche photo et dessin raster. Le logiciel nécessite un abonnement payant (prix étudiant).

Ensuite, les étudiant-es font mention de Canva et Powerpoint, qui sont tous deux des outils de création de diapositives.

Enfin, les étudiant-es ont utilisé des outils d'intelligence artificielle, notamment **Gemini** et Nano Banana, tous deux des modèles de Google, accessibles gratuitement avec un accès étudiant. **Krea.ai** revient également. Il s'agit d'un agrégateur de modèles d'image, offrant plus de personnalisation et de contrôle sur les prompts. Certains modèles sont gratuits, d'autres nécessitent un abonnement payant. Enfin, **ChatGPT** revient également. Il s'agit d'un modèle conversationnel d'OpenAI, qui a aussi la capacité de générer des images. Le modèle de base est accessible gratuitement de manière limitée.

## 5.2.2 Cours d'ingénierie des ambiances urbaines

Le premier entretien a été mené avec un groupe de conception du cours d'Ingénierie des Ambiances Urbaines (IAU) de Master 2. Cet entretien avait pour objectif de calibrer le temps, les questions et le matériel didactique. L'entretien ayant été concluant, il a été décidé d'inclure cet entretien-test dans les données étudiées.

### 5.2.2.1 Processus de conception du groupe n°1 (IAU)

Le processus de conception du groupe n°1 débute par une analyse sensible et de site approfondie, suivie d'une phase de recherche d'objectifs. Le projet évolue à chaque revue sur le plan masse, qui est l'outil de conception principal.

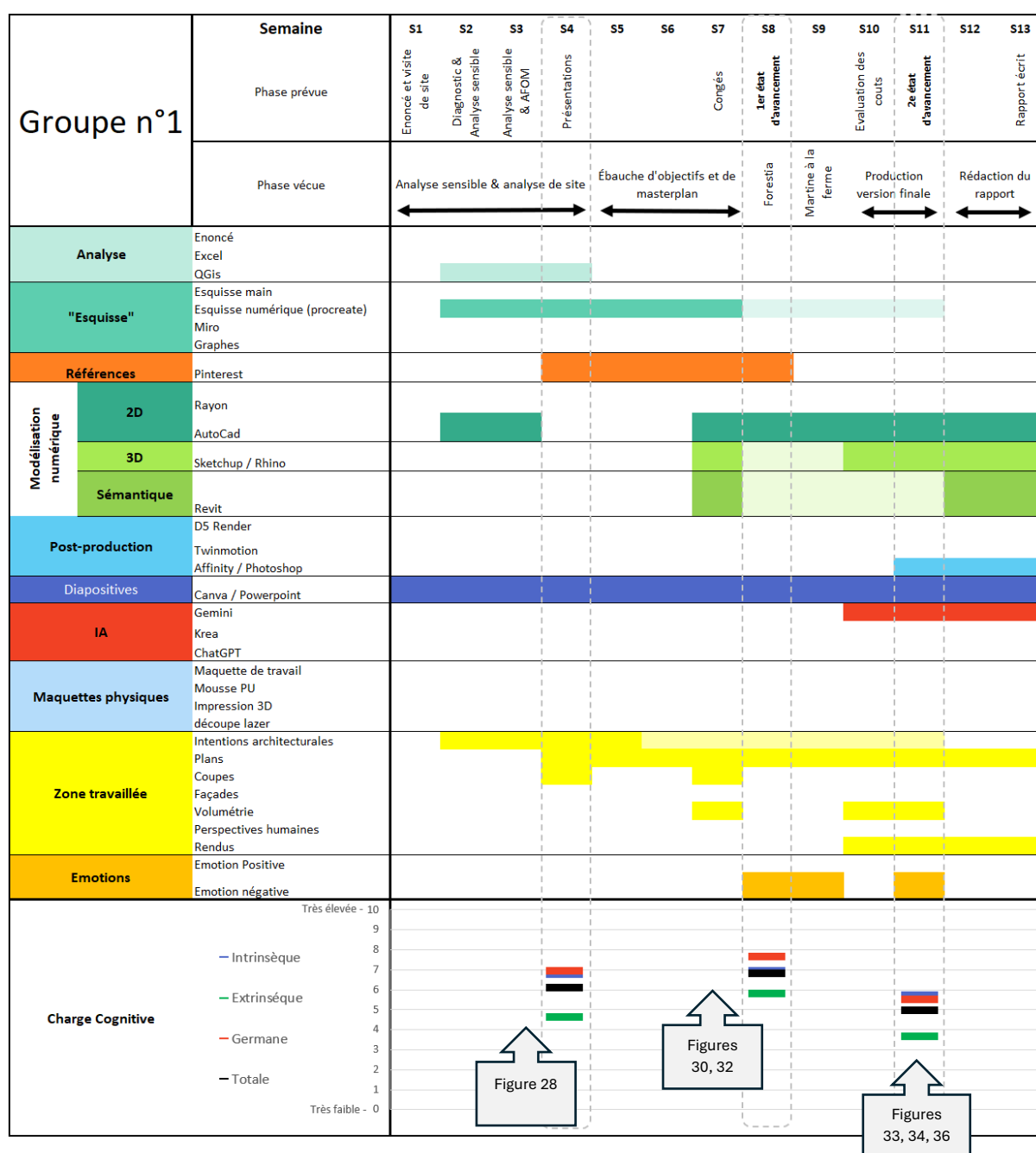


Figure 27 – Grille de Codage pour le groupe n°1

Le projet débute par la découverte de l'énoncé et la première visite de site. Ensuite, les étudiant-es se lancent dans la réalisation d'une analyse sensible (Voir Figure 28). Pour ce faire, iels se rendent plusieurs fois sur site durant les 4 premières semaines, afin de recueillir des avis d'habitants.es du quartier. En parallèle, les étudiant-es posent un diagnostic du site ainsi qu'une analyse de site plus classique.



Figure 28 – Analyse sensible réalisée par le groupe n°1

Le groupe ébauche ses objectifs pour le quartier au fur à mesure des revues. QGis sert à réaliser le diagnostic du site, mais sera également utilisé pour obtenir des coupes dans le terrain, permettant d'obtenir la direction d'écoulement des eaux pluviales. Des coupes de voiries sont également réalisées, puis abandonnées lorsque le groupe décide de se concentrer sur l'intérieur de l'ilot. Leurs objectifs se sont concentrés sur la densification de la couronne de l'ilot, l'inclusion de l'agriculture dans la vie du quartier et la création d'une trame paysagère pour liaisonner le quartier. Le groupe présente ces objectifs et leur analyse de site lors de la 4<sup>ème</sup> semaine (voir Figure 29).

| Groupe n°1            | Semaine                        | S3                                 | S4            | S5                  |
|-----------------------|--------------------------------|------------------------------------|---------------|---------------------|
|                       | Phase prévue                   | Analyse sensible & AFOM            | Présentations |                     |
|                       | Phase vécue                    | Analyse sensible & analyse de site |               | Ébauche d'objectifs |
| Analyse "Esquisse"    | QGIS                           |                                    |               |                     |
|                       | Esquisse numérique (procreate) |                                    |               |                     |
| Références            | Pinterest                      |                                    |               |                     |
| Modèles numériques 2D | AutoCad                        |                                    |               |                     |
| Diapositives          | Canva / Powerpoint             |                                    |               |                     |
| Zone travaillée       | Intentions architecturales     |                                    |               |                     |
|                       | Plans                          |                                    |               |                     |
|                       | Coupes                         |                                    |               |                     |
| Charge Cognitive      | Très élevée - 10               |                                    |               |                     |
|                       | 9                              |                                    |               |                     |
|                       | 8                              |                                    |               |                     |
|                       | 7                              |                                    |               |                     |
|                       | 6                              |                                    |               |                     |
|                       | 5                              |                                    |               |                     |
|                       | 4                              |                                    |               |                     |
|                       | 3                              |                                    |               |                     |
|                       | 2                              |                                    |               |                     |
|                       | 1                              |                                    |               |                     |
|                       | Très faible - 0                |                                    |               |                     |
|                       | — Intrinsèque                  |                                    |               |                     |
|                       | — Extrinsèque                  |                                    |               |                     |
|                       | — Germane                      |                                    |               |                     |
|                       | — Totale                       |                                    |               |                     |

Figure 29 – Grille de codage de la 1<sup>ère</sup> phase-clé pour le groupe n°1

C'est à partir d'ici que commence véritablement la conception du projet, avec les premières esquisses sur le masterplan. Ces premières esquisses sont réalisées sur ProCreate (Tablette). Le groupe dessine le projet dans AutoCAD lorsque les emplacements de densification et leurs formes sont globalement fixées « *on avait fait l'état d'avancement sur AutoCAD [...] quand on était sûr, quand au moins les profs avaient validé à peu près la formation* ». Le dessin est ensuite embelli dans ProCreate (Figure 30). Ce sont uniquement les versions du masterplan qui sont présentées en revue. AutoCAD est utilisé en parallèle du masterplan principal afin d'obtenir des aires facilement, pour le calcul d'aspects techniques (CBS+, densité nette, distance d'éclaircement).



Figure 30 – Masterplan du groupe n°1, semaine 7

En ce qui concerne les charges cognitives, la charge cognitive extrinsèque est la plus faible, tandis que les charges cognitives intrinsèque et germane sont équivalentes. Cela dénote un fort engagement personnel des étudiant-es, de même qu'une tâche fortement interactive.

La 7<sup>ème</sup> semaine marque un changement majeur pour les étudiant-es, avec l'introduction de nouveaux outils. Le groupe commence un modèle numérique Revit et un modèle SketchUp.

SketchUp permet au groupe d'obtenir les ombres projetées des bâtiments du projet (Figure 32). Le logiciel sert aussi à obtenir un volume, mais ce n'est pas vraiment ce dernier qui définit leur volumétrie : « *comme on était en densification douce, on voulait vraiment s'inscrire dans le bâti existant. Du coup, quand on était vraiment collé à des maisons, on prenait la même volumétrie que les maisons d'à côté. Et quand on était un tout petit peu séparé, on prenait toujours la même volumétrie* ». Les étudiant-es définissent leur emprise sur le masterplan, et la volumétrie dépend du contexte.

Le modèle numérique Revit est utilisé pour obtenir la volumétrie automatiquement à partir des plans, ainsi que les surfaces des pièces (Figure 33). Le plan masse des bâtiments Revit est ensuite exporté dans le plan masse AutoCAD. La volumétrie est utilisée pour produire des schémas (Figure 34).

Lors de la 8<sup>ème</sup> semaine, le groupe présente le projet au second état d'avancement (voir Figure 31). Lors de la présentation, le jury qualifie le projet de « *Forestia* » car « *ça faisait trop pour un trop petit village* », provoquant des émotions négatives chez les étudiant-es. Le groupe ne réalise aucune maquette physique « *ça nous aurait demandé aussi beaucoup de temps avant pour au final que pour notre objectif où on voulait s'adapter aux volumétries existantes, est-ce que ça nous aurait vraiment servi ?* ». Le groupe pense que la maquette numérique permet d'aller plus vite et est plus précise que la maquette physique.

La charge cognitive augmente par rapport à la phase précédente, dans tous les aspects. La charge cognitive extrinsèque reste la plus faible, tandis que la charge cognitive germane est la plus élevée, traduisant un engagement personnel des étudiant-es en hausse.

| Groupe n°1             | Semaine          | S7                                                                               | S8                                                      | S9                 |
|------------------------|------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------|
|                        | Phase prévue     | Congés                                                                           | 1er état d'avancement                                   |                    |
| Modélisation numérique | Phase vécue      | Ébauche d'objectifs et de masterplan                                             | Forestia                                                | Martine à la ferme |
|                        | "Esquisse"       | Esquisse numérique (procreate)                                                   |                                                         |                    |
|                        | Références       | Pinterest                                                                        |                                                         |                    |
|                        | 2D               | AutoCad                                                                          |                                                         |                    |
|                        | 3D               | Sketchup / Rhino                                                                 |                                                         |                    |
|                        | Sémantique       | Revit                                                                            |                                                         |                    |
|                        | Diapositives     | Canva / Powerpoint                                                               |                                                         |                    |
|                        | Zone travaillée  | Intentions architecturales<br>Plans<br>Coupes<br>Volumétrie                      |                                                         |                    |
|                        | Émotions         | Emotion négative                                                                 |                                                         |                    |
|                        | Charge Cognitive | Très élevée - 10<br>9<br>8<br>7<br>6<br>5<br>4<br>3<br>2<br>1<br>Très faible - 0 | — Intrinsèque<br>— Extrinsèque<br>— Germane<br>— Totale |                    |

Figure 31 – Grille de codage de la 2<sup>ème</sup> phase-clé pour le groupe n°1



Figure 32 – Modèle SketchUp utilisé par le groupe n°1



Figure 33 – Plans présentées par le groupe n°1



Figure 34 – Volumétrie Revit embellie par le groupe n°1



Le groupe va alors reprendre leur masterplan et proposer une version allégée du projet. En revue, celui-ci sera alors qualifié de « Martine à la ferme », provoquant à nouveau des émotions négatives.

Pour la présentation finale, le groupe utilise leur modèle SketchUp afin de produire des rendus par IA avec Nano Banana/Gemini (voir Figure 36).

Lors de la semaine 11, les étudiant-es présentent le projet au second état d’avancement (voir Figure 35). Ce dernier est globalement positif, même si une confusion sur la densité attendue remet en question la faible densité du projet, ce qui ne manque pas de provoquer des émotions négatives chez les étudiant-es.

La charge cognitive diminue globalement par rapport aux deux phases précédentes. La charge cognitive extrinsèque reste la plus faible.

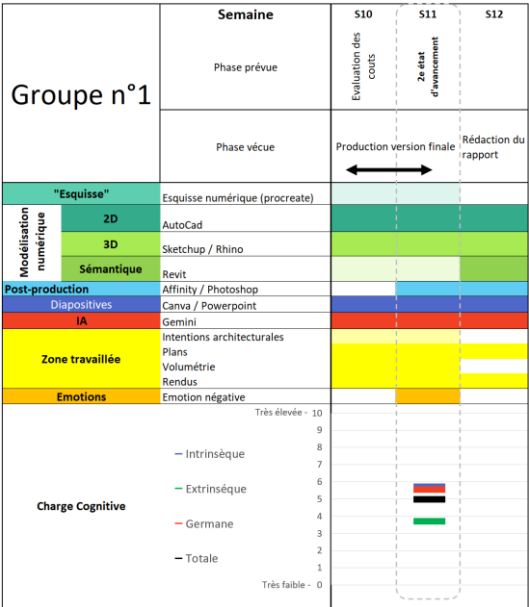


Figure 35 – Grille de codage de la 3<sup>ème</sup> phase-clé pour le groupe n°1



Figure 36 – Rendus IA du groupe n°1

## 5.2.3 Cours d'Atelier IV

5 groupes de conception ont participé aux entretiens sur les 6 que comprenait l'atelier.

### 5.2.3.1 Processus de conception du groupe n°2

Le projet du groupe n°2 avait comme intentions architecturales de relier le site à la passerelle de la Belle Liégeoise et au quartier par une passerelle enjambant le nœud routier adjacent, tout en créant une rue intérieure structurant le site. Le projet démarre dès la première semaine avec la recherche d'un parti architectural, en parallèle des analyses de site menées dans d'autres groupes. S'en suivent des itérations jusqu'au pré-jury, qui fut concluant, malgré de gros changements de structure. Les étudiant-es travaillent ensuite à la production des documents et aux aspects techniques.

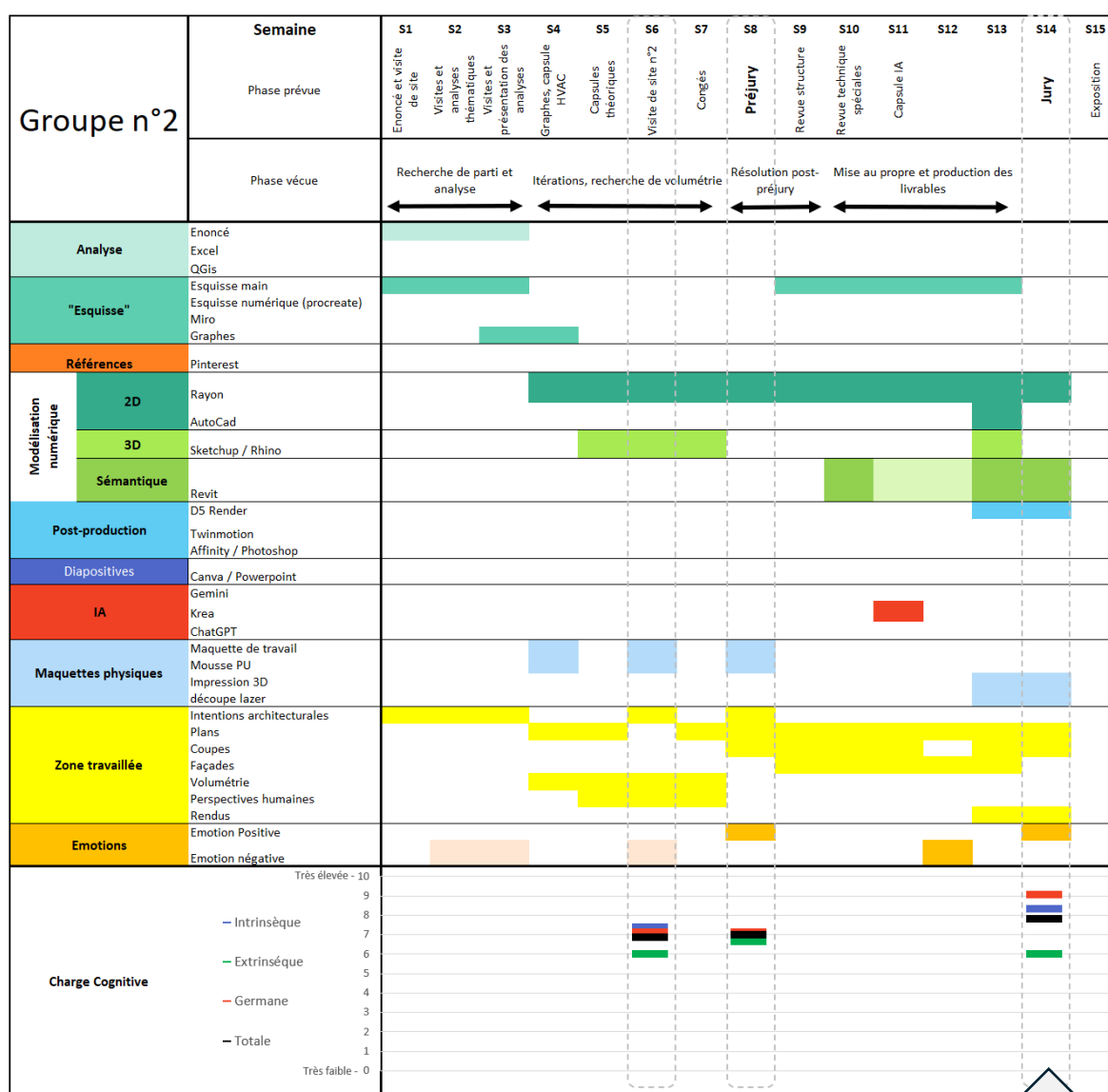


Figure 37 – Grille de Codage du groupe n°2

Figures  
40,41,42,43



Le projet débute lors de la première semaine, avec la découverte de l'énoncé et la première visite de site. Les étudiant-es élaborent ensuite leurs premières intentions architecturales pendant les trois premières semaines. Iels utilisent alors l'esquisse sur papier.

Lors des semaines 3 et 4, les étudiant-es réalisent un **graphe d'adjacence**, d'abord sur papier, puis dans le logiciel Rayon. Ce graphe sera ensuite spatialisé en « **plans** » **patates** dans Rayon. C'est très pratique car très rapide à faire, mais les encadrant-es avaient du mal à se projeter dans leur projet et n'aimaient pas particulièrement. Rayon est un logiciel de dessin 2D, très intuitif à utiliser et très facile à modifier. Il leur permet de collaborer en temps réel, tous·tes en même temps dans le même espace.

C'est aussi pendant la semaine 4 que les étudiant-es réalisent une première maquette de travail en mousse PU afin de commencer leur **recherche de volumétrie**. Les maquettes sont constamment en évolution : elles sont le support des discussions, aussi bien entre les étudiant-es lors des sessions de travail, qu'entre le groupe et les encadrant-es lors des revues.

*« [...] le projet ne se serait pas bien passé sans la maquette de travail. »*

Il est utile de repasser en physique pour discuter entre les membres du groupe pour résoudre des conflits et exprimer les idées de chacun (*« en maquette, on sait localiser facilement »*). La maquette permet de travailler l'intégration dans le site. Les revues se passent autour de la maquette de travail, insérée dans le contexte urbain dense de la maquette de site. Cela permet de visualiser directement la relation du bâtiment avec le contexte. (*« Notre volumétrie a été fixée uniquement avec le site »*). Les changements apportés au projet sont très rapides, contrairement aux logiciels, qui sont *« trop lents »* selon les étudiant-es.

Lors de la semaine 5, les étudiant-es commencent un **modèle numérique** Rhino. Ce modèle est réalisé en parallèle de l'évolution des maquettes de travail. Les étudiant-es trouvent une forme à l'aide de la maquette en PU. Iels la modélisent ensuite dans Rhino, en la rendant *« faisable »*. Ensuite, iels construisent une nouvelle maquette en mousse sur base du Rhino. Les étudiant-es font ainsi des itérations entre les deux, jusqu'au pré-jury (S8).

Il est plus facile de se projeter à un point de vue humain dans Rhino qu'avec une maquette. *« [...] je trouve que ce n'est pas pratique de se projeter dedans »* en parlant de la maquette physique. Les étudiant-es ont besoin du Rhino pour faire des points de vue *« à hauteur du passant »*. De plus, Rhino est plus propre que les maquettes et permet de vérifier si la volumétrie fonctionne.

Lors de la semaine 6, les étudiant-es font encore des itérations en volumétrie, et produisent la seconde maquette de travail, en continuant de travailler sur le modèle numérique Rhino. L'objectif est à la fois d'obtenir une volumétrie harmonieuse dans le site et du point de vue humain, mais aussi de traduire correctement le parti architectural en volumétrie, et de l'adapter si nécessaire. Les étudiant-es se rendent également une seconde fois sur le site.

Les étudiant-es font face à des revues avec l'équipe encadrante où le projet est souvent entièrement remis en question, ce qui provoque des émotions plutôt négatives. Les étudiant-es citent notamment la **forte incidence d'aspects techniques** (tels que la dimension des chemins d'évacuation, qui varie selon que le bâtiment est un bâtiment haut ou un bâtiment bas) et qui changent au fil des revues (les encadrant-es leur faisant remarquer que leur projet est un bâtiment bas, et non un bâtiment haut).

La charge cognitive extrinsèque est légèrement plus faible. Elle est liée aux documents d'énoncé et les ressources externes nécessaires au projet, tandis que la charge cognitive intrinsèque est légèrement plus élevée. Celle-ci est liée au niveau d'interactivité de la tâche, indiquant une tâche avec un haut niveau d'interdépendance entre les éléments.

Entre les semaines 6 et 8, la volumétrie atteint une forme finale, qui sera produite en maquette de travail et présentée par les étudiant-es au pré-jury lors de la semaine 8. Les plans et certaines coupes importantes évoluent dans Rayon en parallèle.

Lors de la semaine 8, les étudiant-es défendent leur projet au **pré-jury**. Le projet est validé dans l'ensemble, même si l'équipe encadrante invalide la passerelle entre les deux parties du bâtiment, présente dans le projet depuis les premières esquisses. Les étudiant-es parviennent à l'enlever sans altérer le fonctionnement du bâtiment et du parti architectural.

Le pré-jury étant concluant, les étudiant-es expriment des émotions positives. Les trois aspects de la charge cognitive sont globalement équivalents, autour de 7/10. Cela montre une charge cognitive importante dans les trois domaines.

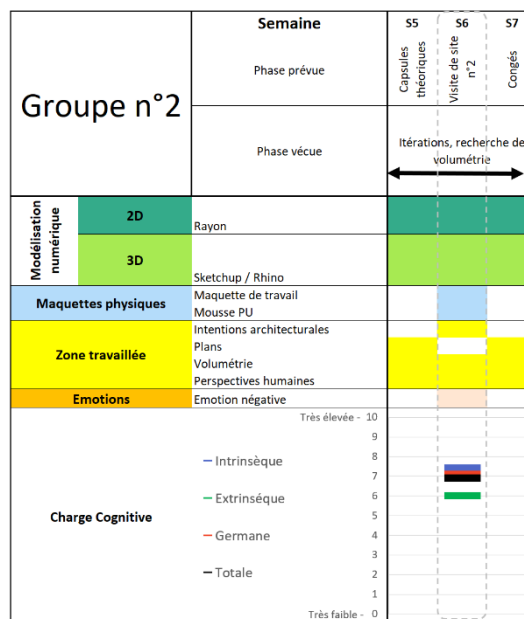


Figure 38 – Grille de codage de la 1<sup>ère</sup> phase-clé pour le groupe n°2

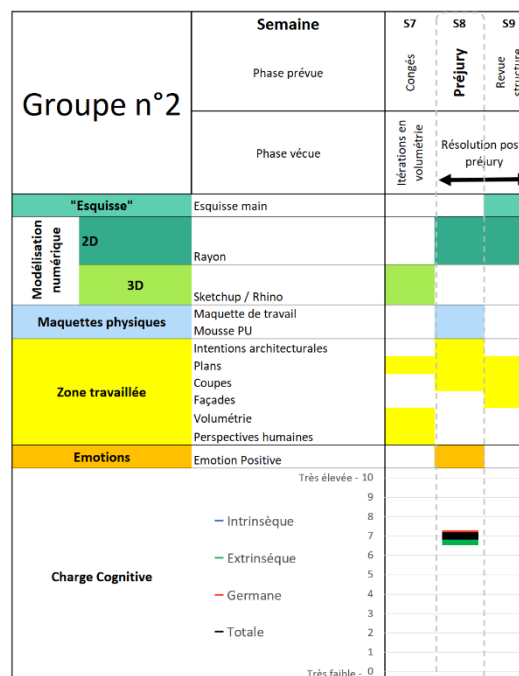


Figure 39 – Grille de codage de la 2<sup>ème</sup> phase-clé pour le groupe n°2

Après le pré-jury et les corrections demandées par l'équipe encadrante, les étudiant-es se lancent dans la réalisation d'un **modèle numérique Revit**. Les plans finaux sont dessinés dans Revit pour vérifier que tout fonctionne en 3D (*Rayon est un logiciel de 2D uniquement*).

Revit remplace Rhino quand le projet est plus défini. Revit n'est pas utilisé dans le processus de conception, mais uniquement pour le modèle numérique final afin d'avoir une bonne précision sur les détails «*Revit, ça permet d'avoir tous les montants de fenêtres pour changer la matérialité et tout*», détails importants aux yeux des étudiant-es dans la réalisation des vues 3D et des façades (voir Figure 40).

«*En fait on ne voulait pas passer trop vite sur Revit parce que c'est chiant de déplacer, c'est plus long, ça va plus vite de déplacer une ligne sur rayon au début que de déplacer tout un mur sur Revit, surtout quand il y a des trucs qui s'attachent et tout et que ça commence à bouger d'autres choses*»

Les plans sont ensuite exportés du Revit pour être aménagés dans Rayon lors de la 12<sup>ème</sup> semaine (voir Figure 41). Le modèle numérique Revit obtenu est utilisé dans D5 afin de produire les **rendus** attendus par l'équipe encadrante.

Sur les rendus D5, les étudiant-es ajoutent des personnages et du mobilier dessiné à la main afin d'obtenir un style de rendu vivant. Iels valorisent la liberté de création pour leurs rendus car cela leur permet d'éviter le style photoréaliste (voir Figure 42).

L'IA est testée lors de la capsule théorique, mais les résultats n'étaient pas concluants «*Vu que ça ne marchait pas, on n'a pas trop porté notre attention*»



Figure 40 – L'une des façades du projet du groupe n°2, produite pour le Jury final



Figure 41 – Le plan du rez-de-chaussée du groupe n°2, produit pour le Jury final

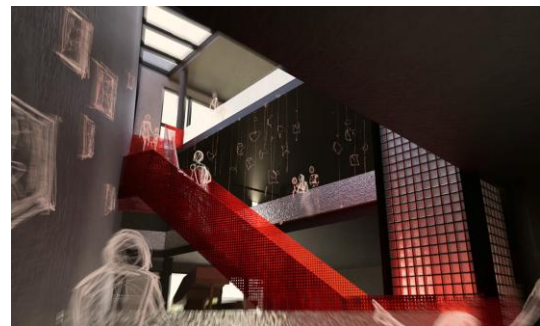


Figure 42 – L'un des rendus du groupe n°2, produit pour le Jury final

Les étudiant-es produisent une maquette pour le jury final, avec découpe laser et impression 3D (voir Figure 43). Elle sert aussi pour une exposition après le jury. La maquette n'est pas utilisée dans le processus de conception, mais uniquement comme un support de présentation. La maquette finale a permis aux membres du jury extérieurs de mieux comprendre le projet. Même chose pour les vues 3D rendues. Les étudiant-es ne mettent pas en place de continuum conception-fabrication.



Figure 43 – Maquette produite pour le jury par le groupe n°2

La maquette finale du jury fait très « vendeur » : « C'est beaucoup de temps pour quelque chose qui est un peu doublon par rapport aux vues 3D ou quoi, mais là on nous demandait vraiment de vendre un projet, et une maquette qui claque et qui a pris deux trois jours à être faite, ça va vraiment être vendeur ». La maquette finale aidait les parents des étudiant-es, présents lors de la présentation, à se projeter dans le projet lors de l'exposition (« c'était tout de suite plus parlant »).

Les éléments de leur maquette finale imprimés en 3D ont été remodelisés dans SketchUp afin de s'adapter aux contraintes de fabrication (« Et le garde-corps était tellement fin qu'en fait ça faisait des filaments qui partaient un peu en couille. Donc j'ai été obligé de refaire en gonflant un peu toutes les proportions de la passerelle pour que ça tienne »). Les éléments découpés au laser ont été redessinés dans Rayon sur des captures des façades du Revit. Enfin, le fichier produit a été vérifié et nettoyé avec AutoCAD.

Lors de la semaine 14, les étudiant-es défendent leur projet au **jury** final. Avant le jury, les étudiant-es sentent qu'ils rattrapent leur retard et sont motivé.es par l'envie de bien faire. Le jury se passant bien, les étudiant-es expriment des émotions positives.

La charge cognitive extrinsèque est la plus faible des trois. Cette diminution indique moins de charge cognitive liée aux documents d'énoncé et les ressources externes nécessaires au projet.

La charge cognitive germane est la plus élevée. Elle est liée au niveau d'engagement des étudiant-es dans le projet, indiquant un haut niveau d'implication nécessaire pour le jury.

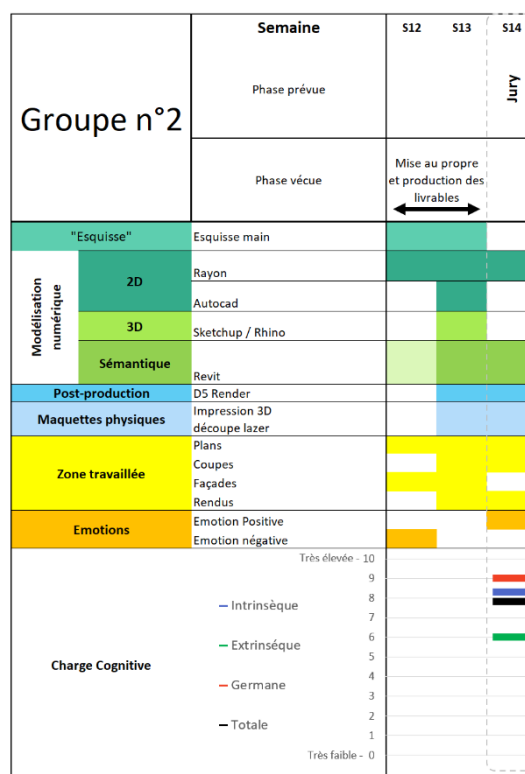


Figure 44 – Grille de codage de la 3<sup>ème</sup> phase-clé pour le groupe n°2

## Évaluation de la charge cognitive sur l'ensemble du projet

Personne 1 : Plutôt une « vallée ». Au début submergée par beaucoup d'informations, les capsules théoriques, les visites et les analyses. Son stress a diminué lors du pré-jury, qui s'est bien passé. Lors du jury final, il y a du travail et donc une augmentation du stress. Toutefois, il s'agissait de bon stress, car elle avait envie de bien faire.

Personne 2 : Dans les premières semaines, le travail itératif lui a paru « énervant » car il fallait qu'ils recommencent tout à chaque fois. Elle a ressenti un pic de stress au pré-jury, suivi d'une baisse de stress à la fin car elle sentait qu'ils rattrapent leur retard vis-à-vis des autres groupes.

Personne 3 : La charge augmente crescendo au cours du quadrimestre, avec un pic au pré-jury.

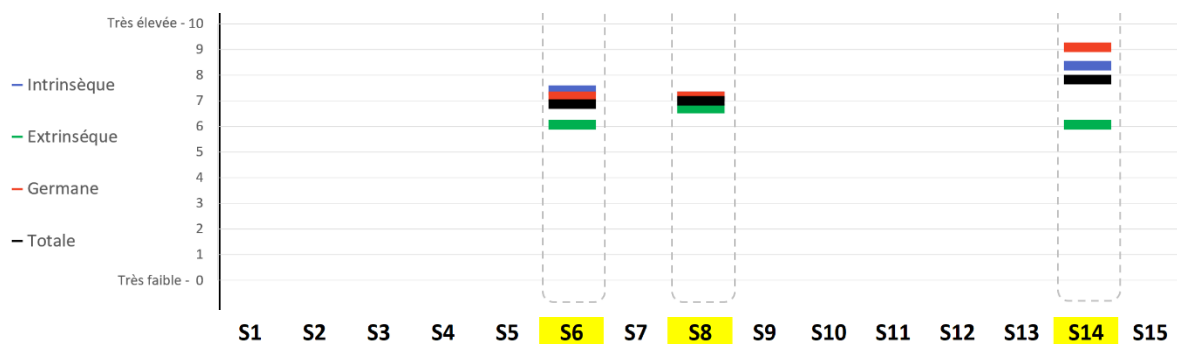
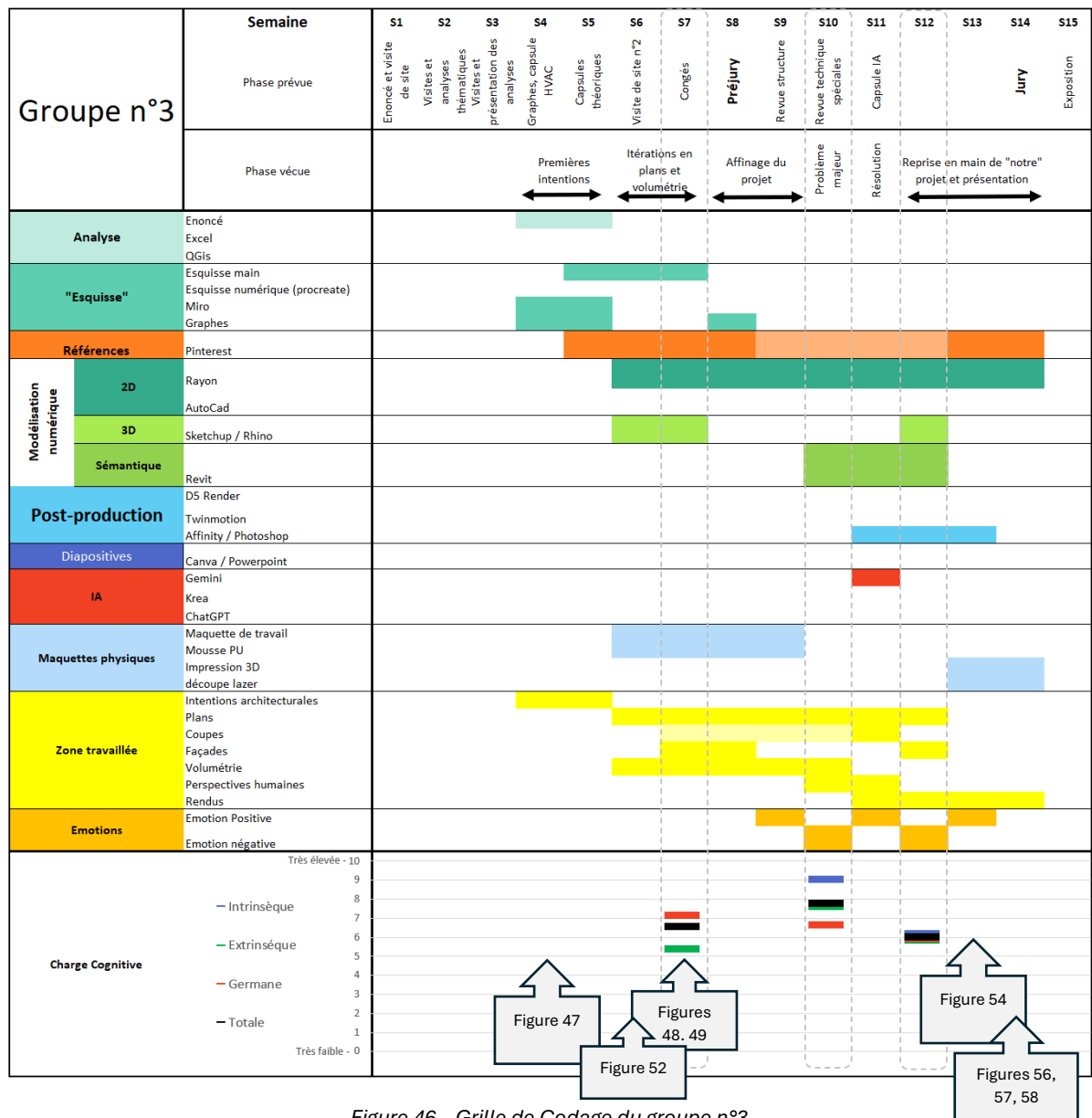


Figure 45 – Evaluation de la charge cognitive sur les 3 phases-clé du projet, groupe n°2

### 5.2.3.2 Processus de conception du groupe n°3

Le projet du groupe n°3 avait comme intentions architecturales de redonner toute sa place au laminoir, en libérant ses abords et en ouvrant des perspectives. Le projet démarre à la quatrième semaine avec la recherche d'intentions architecturales, l'analyse de l'énoncé et le dessin de graphes d'adjacences. S'en suivent des itérations en volumétrie et en plan jusqu'au pré-jury. Après le pré-jury, un problème majeur lié aux escaliers d'évacuation remet en question le projet. Les étudiant-es trouvent une solution, « sauvant » leur projet. Au fil des revues, les étudiant-es ont l'impression que le projet leur échappe à force d'intégrer les idées des encadrant-es. Ils décident de reprendre en main le projet trois semaines avant le jury, et produisent les livrables pour le Jury.





Le projet débute lors de la quatrième semaine par la recherche d'intentions architecturales et la production de graphes d'adjacences sous forme de post-it (voir Figure 47).

Les étudiant-es utilisent Pinterest dès la 5<sup>ème</sup> semaine. Tout au long du projet, les étudiant-es collectent des **références** dans une liste partagée entre eux (voir Figure 48). Selon eux, Pinterest est comme un outil de conception. Beaucoup de références sont montrées en revue et une planche avec uniquement des références est également produite au pré-jury. C'est lors de la 6<sup>ème</sup> semaine que les étudiant-es commencent leurs **itérations en volumétrie**. Pour ce faire, les étudiant-es utilisent en premier lieu SketchUp. Il sera ensuite remplacé par des maquettes de travail en mousse PU.

- Pour préparer la revue, un-e étudiant-e a dessiné un volume dans SketchUp. Mais pendant la revue, iels sont passés à une maquette en mousse afin de collaborer, et de faciliter la réflexion du groupe.

Au fil des semaines, plusieurs maquettes en mousse PU sont produites. Les maquettes évoluent à chaque session de travail, et une nouvelle maquette est produite lorsque cela est nécessaire. Au départ, les maquettes sont demandées par les encadrant-es. Mais ensuite, les étudiant-es découvrent l'intérêt de l'outil « *Ce n'est pas qu'un outil de rendu. Vraiment pas* ».

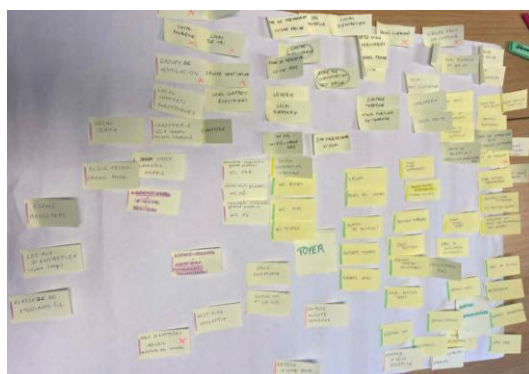


Figure 47 – Analyse du programme et ébauche de graphe d'adjacence du groupe n°3



Figure 48 – Liste de références partagées entre les étudiant-es du groupe n°3



Figure 49 – L'une des maquettes de travail du groupe n°3 insérée dans son contexte

Les maquettes de travail sont beaucoup plus rapides et collaboratives que les logiciels (« *les idées fusent plus vite et c'est plus pratique de travailler en équipe sur une petite maquette* »). Il est très facile de comparer deux options en enlevant/ajoutant un morceau (« *Et là on pouvait rajouter un petit morceau si on rajoutait une volumétrie, supprimer, couper dedans, ça permettait d'explorer pas mal de choses.* »).

Insérer la maquette de travail dans la maquette de site permet de comprendre l'intégration du projet (voir Figure 49). La maquette permet de réaliser directement la proportion entre les volumes. Elle est perçue comme un support de communication en revue (« *C'était plus pratique de montrer la volumétrie, mais sur la maquette qu'autrement* »).

« Pour qu'une maquette serve à la conception, il faut qu'elle soit sommaire. Rapide »

« Je trouve que les petites maquettes de conception, elles ont quand même vite leurs limites dans le sens où tu colles 10 000 trucs, tu te dis ouais ça va, c'est bon. Et puis quand tu essayes de remettre ça à l'échelle sur un logiciel, bah on se rend compte que ça marche moins bien quoi »

En parallèle de ces itérations en volumétrie, les étudiant·es travaillent également sur leurs **plans**. Ceux-ci sont dessinés d'abord sur papier, puis sur Rayon. Il leur est plus facile de modifier les plans sur Rayon lorsque beaucoup de modifications sont nécessaires par rapport au papier.

La définition d'une **trame structurelle** avec le Rayon a été initiée dès la 6<sup>ème</sup> semaine, ce qui facilitera la tâche de conception de la structure bien plus tard dans le projet (voir Figure 52).

Ils trouvent qu'ils ont trop réfléchi en plan 2D dans Rayon et que le projet manquait de réflexion en coupe (« 90% du travail en 2D est sur plan, seulement 10% en coupe »).

Lors de ces itérations en plans et volumétrie, la charge cognitive extrinsèque est la moins élevée des trois, traduisant une moindre charge cognitive liée aux documents d'énoncé et aux ressources externes. La charge cognitive germane est la plus élevée des trois, traduisant un haut niveau d'engagement personnel des étudiant·es (voir Figure 50).

Lors de la semaine 8, les étudiant·es présentent leur projet au **pré-jury**, au moyen des plans, d'une maquette de travail et de schémas de principe (voir Figure 51). Certains schémas de principe sont réalisés sur tablette, avec l'application Concept. Le projet est validé dans son ensemble par l'équipe encadrante.

| Groupe n°3             |            | Semaine             | S6                                | S7                 | S8      |
|------------------------|------------|---------------------|-----------------------------------|--------------------|---------|
|                        |            | Phase prévue        | Visite de site n°2                | Congès             | Préjury |
|                        |            | Phase vécue         | Itérations en plans et volumétrie | Affinage du projet |         |
| Modélisation numérique | "Esquisse" | Esquisse main       |                                   |                    |         |
|                        | Références | Pinterest           |                                   |                    |         |
|                        | 2D         | Rayon               |                                   |                    |         |
| Maquettes physiques    | 3D         | Sketchup / Rhino    |                                   |                    |         |
|                        |            | Maquette de travail |                                   |                    |         |
| Zone travaillée        |            | Mousse PU           |                                   |                    |         |
|                        |            | Plans               |                                   |                    |         |
|                        |            | Coupes              |                                   |                    |         |
|                        |            | Façades             |                                   |                    |         |
| Charge Cognitive       |            | Volumétrie          |                                   |                    |         |
|                        |            | Très élevée - 10    |                                   |                    |         |
|                        |            | 9                   |                                   |                    |         |
|                        |            | 8                   |                                   |                    |         |
|                        |            | 7                   |                                   |                    |         |
|                        |            | 6                   |                                   |                    |         |
|                        |            | 5                   |                                   |                    |         |
|                        |            | 4                   |                                   |                    |         |
|                        |            | 3                   |                                   |                    |         |
|                        |            | 2                   |                                   |                    |         |
|                        |            | 1                   |                                   |                    |         |
|                        |            | Très faible - 0     |                                   |                    |         |

Figure 50 – Grille de codage de la 1<sup>ère</sup> phase-clé pour le groupe n°3

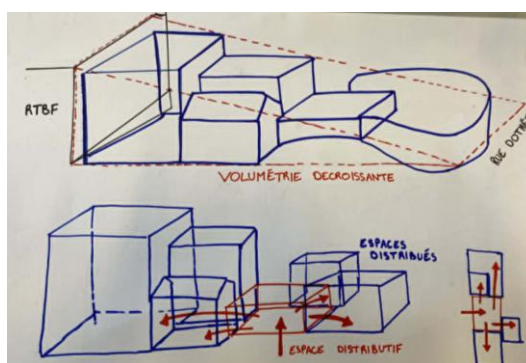


Figure 51 – Schémas de principe en volumétrie présentés au pré-jury par le groupe n°3

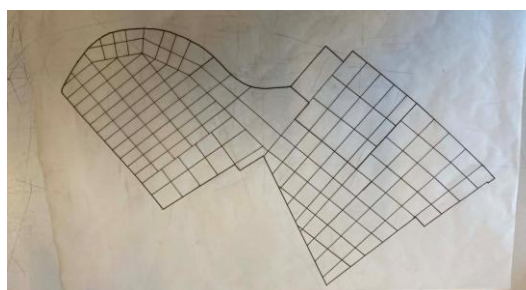


Figure 52 – Trame structurelle définie par les étudiant·es lors de la 6<sup>ème</sup> semaine



Lors de la semaine n°10, les étudiant-es réalisent que le dimensionnement de leurs escaliers d'évacuation, fait plusieurs semaines auparavant, n'était pas correct en raison d'une erreur de classification (bâtiment haut versus bâtiment bas). Les étudiant-es doivent donc élargir grandement leurs cages d'escaliers, ce qui « casse » le projet. Pendant une semaine, iels vont alors tenter de dégager des solutions.

Globalement, la charge cognitive augmente par rapport à la phase précédente. La charge cognitive intrinsèque est la plus élevée, traduisant un haut niveau d'interactivité de la tâche lors du blocage. La charge cognitive germane est la moins élevée des trois, traduisant un moindre engagement personnel des étudiant-es.

Lors de la 11<sup>ème</sup> semaine, les étudiant-es réalisent que leur bâtiment était bien un bâtiment bas. Iels reviennent alors à leur solution précédente « *Pendant une semaine, on s'est on s'est arraché les cheveux à essayer de mettre un énorme escalier [...] mais la séance d'après, on s'est rendu compte qu'on était en bâtiment bas, donc finalement c'est un peu rentré dans l'ordre* ».

Les étudiant-es commencent en parallèle la **modélisation du projet sur Revit**, afin d'en obtenir les plans finaux. Les plans sont corrigés si nécessaire. Ils sont ensuite réexportés dans Rayon pour être aménagés. Cela leur permet aussi d'obtenir une volumétrie, afin de produire les rendus demandés dans l'énoncé de l'atelier. Des captures sont prises dans le logiciel Revit, puis les étudiant-es réalisent des collages à la main.

L'IA est testée lors de la capsule théorique (S11) : « *ça marche trop bien, trop stylé* », sauf qu'iels font une grande quantité de tests, perdant beaucoup de temps, pour finalement abandonner (iels tentaient le photoréaliste) et faire des collages à la main.

|                        |                                      | Semaine                          | S9                 | S10                       | S11        |
|------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------|---------------------------|------------|
| Groupe n°3             |                                      | Phase prévue                     | Revue structure    | Revue technique spéciales | Capsule IA |
|                        |                                      | Phase vécue                      | Affinage du projet | Problème majeur           | Résolution |
| Modélisation numérique | Références                           | Pinterest                        |                    |                           |            |
|                        | 2D                                   | Rayon                            |                    |                           |            |
|                        | Sémantique                           | Revit                            |                    |                           |            |
| Post-production        |                                      | Affinity / Photoshop             |                    |                           |            |
| IA                     |                                      | Gemini                           |                    |                           |            |
| Maquettes physiques    |                                      | Maquette de travail<br>Mousse PU |                    |                           |            |
| Zone travaillée        | Plans                                |                                  |                    |                           |            |
|                        | Coupes                               |                                  |                    |                           |            |
|                        | Volumétrie                           |                                  |                    |                           |            |
|                        | Perspectives humaines                |                                  |                    |                           |            |
| Emotions               | Rendus                               |                                  |                    |                           |            |
|                        | Emotion Positive<br>Emotion négative |                                  |                    |                           |            |
| Charge Cognitive       |                                      |                                  |                    |                           |            |
|                        |                                      | Très élevée - 10                 |                    |                           |            |
|                        |                                      | 9                                |                    |                           |            |
|                        |                                      | 8                                |                    |                           |            |
|                        |                                      | 7                                |                    |                           |            |
|                        |                                      | 6                                |                    |                           |            |
|                        |                                      | 5                                |                    |                           |            |
|                        |                                      | 4                                |                    |                           |            |
|                        |                                      | 3                                |                    |                           |            |
|                        |                                      | 2                                |                    |                           |            |
|                        |                                      | 1                                |                    |                           |            |
|                        |                                      | Très faible - 0                  |                    |                           |            |

Figure 53 – Grille de codage de la 2<sup>ème</sup> phase-clé pour le groupe n°3



Figure 54 – Collage produit par les étudiant-es du groupe n°3 en vue du Jury

La semaine 12 correspond à un moment que les étudiant-es identifient comme la **reprise en main de leur projet**, au sens où iels expliquent qu'un sentiment d'aliénation se faisait sentir par rapport à leur projet (voir Figure 55). Au fur et à mesure des revues, les étudiant-es intégraient de nombreuses idées provenant de l'équipe encadrante, à tel point qu'iels expriment que *« à un moment, notre projet il nous échappait, ce n'étaient plus nos idées, ce n'était plus notre projet »*. Pendant cette semaine, les étudiant-es décident de reprendre la main sur les éléments présents dans leur projet, et entrent alors dans une phase de production des documents. La charge cognitive diminue globalement par rapport aux deux phases précédentes. Afin de produire des schémas de composition éclatés, SketchUp est utilisé ponctuellement. Les autres schémas sont réalisés sur Rayon. La mise en page est réalisée sur Affinity (voir Figure 56).

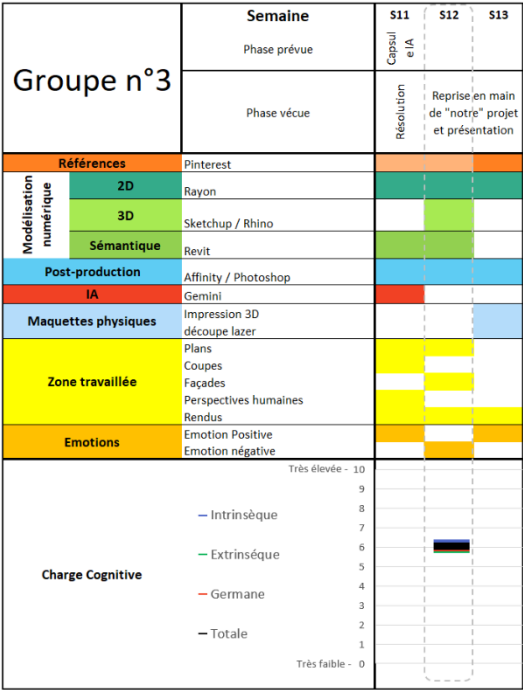


Figure 55 – Grille de codage de la 3<sup>ème</sup> phase-clé pour le groupe n°3

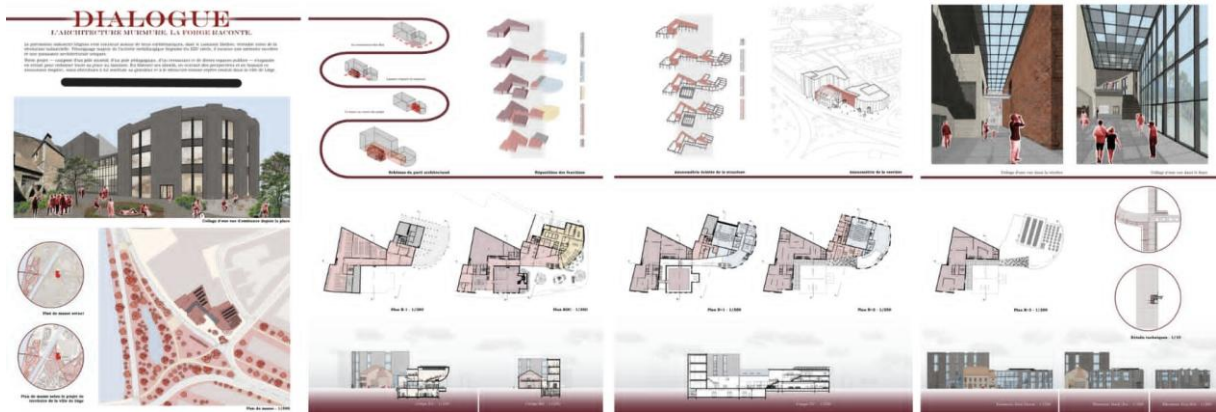


Figure 56 – Panneaux présentés par le groupe n°3 au jury

Pour le jury final, lors de la semaine 13, deux maquettes de présentation sont produites. La première est une maquette en impression 3D de la volumétrie extérieure (voir Figure 57). La deuxième est une maquette en coupe, collée sur le panneau (Figure 58). Ces deux maquettes n'ont pas servi à la conception du projet. Les étudiant-es n'ont pas mis en place de continuum conception-fabrication de leurs maquettes. Les éléments de la maquette finale imprimée en 3D ont été modélisés de nouveau sur SketchUp. *« Ce qui est important avec la maquette, c'est la modularité »* : les maquettes imprimées en impression 3D ne pourraient donc pas



Figure 57 – Maquette volumétrique présentée par le groupe n°3 lors du jury, insérée dans son contexte

participer à leur sens à la conception architecturale.

«[...] le fait de passer à l'ordi et de modéliser, on se rend compte déjà des problèmes sans avoir besoin d'imprimer le modèle qu'on a fait ».

Les maquettes imprimées en 3D sont très rapides, mais elles font perdre le charme du bâtiment « C'est plus facile parce que ça prend environ cinq fois moins de temps que si on s'était fait chier à faire une maquette avec les matériaux. Mais je trouve qu'on perd vite du charme et du coup, le fait de le faire en plein milieu du projet, peut-être qu'on se projette moins »)



Figure 58 – Maquette en coupe présentée par le groupe n°3 lors du jury

### Évaluation de la charge cognitive sur l'ensemble du projet

Personne 1 : La charge augmente crescendo. C'est difficile au début car il y a beaucoup d'informations. S'en suit une partie « fun » où les idées fusent. Les problèmes arrivent après. Mais vers la fin, pas de stress car iel savait qu'iels allaient réussir.

Personne 2 : La charge augmente crescendo, avec un pic au pré-jury. À la fin, a envie d'être en vacances et en a marre du projet.

Personne 3 : Travail régulier et rigoureux tout au long du quadrimestre ; pas trop de stress. Après chaque revue, c'est « dur de redémarrer, c'est démoralisant de se faire casser le projet à chaque fois ». À la fin, il y a beaucoup de travail.

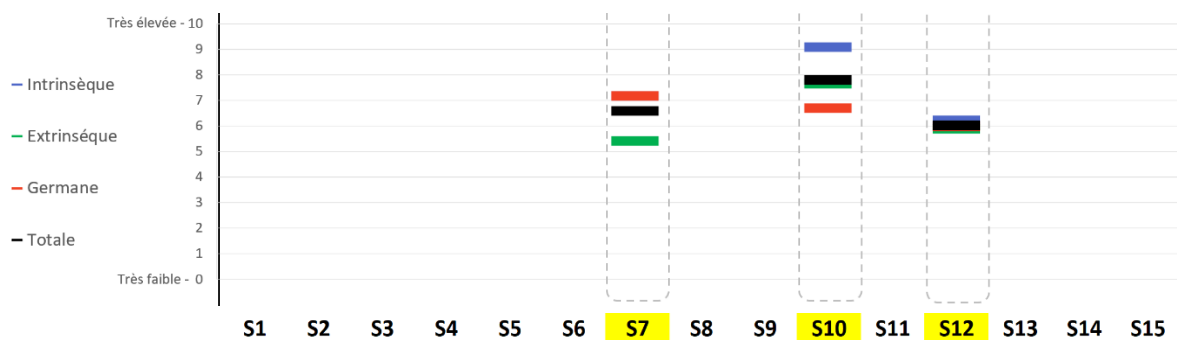
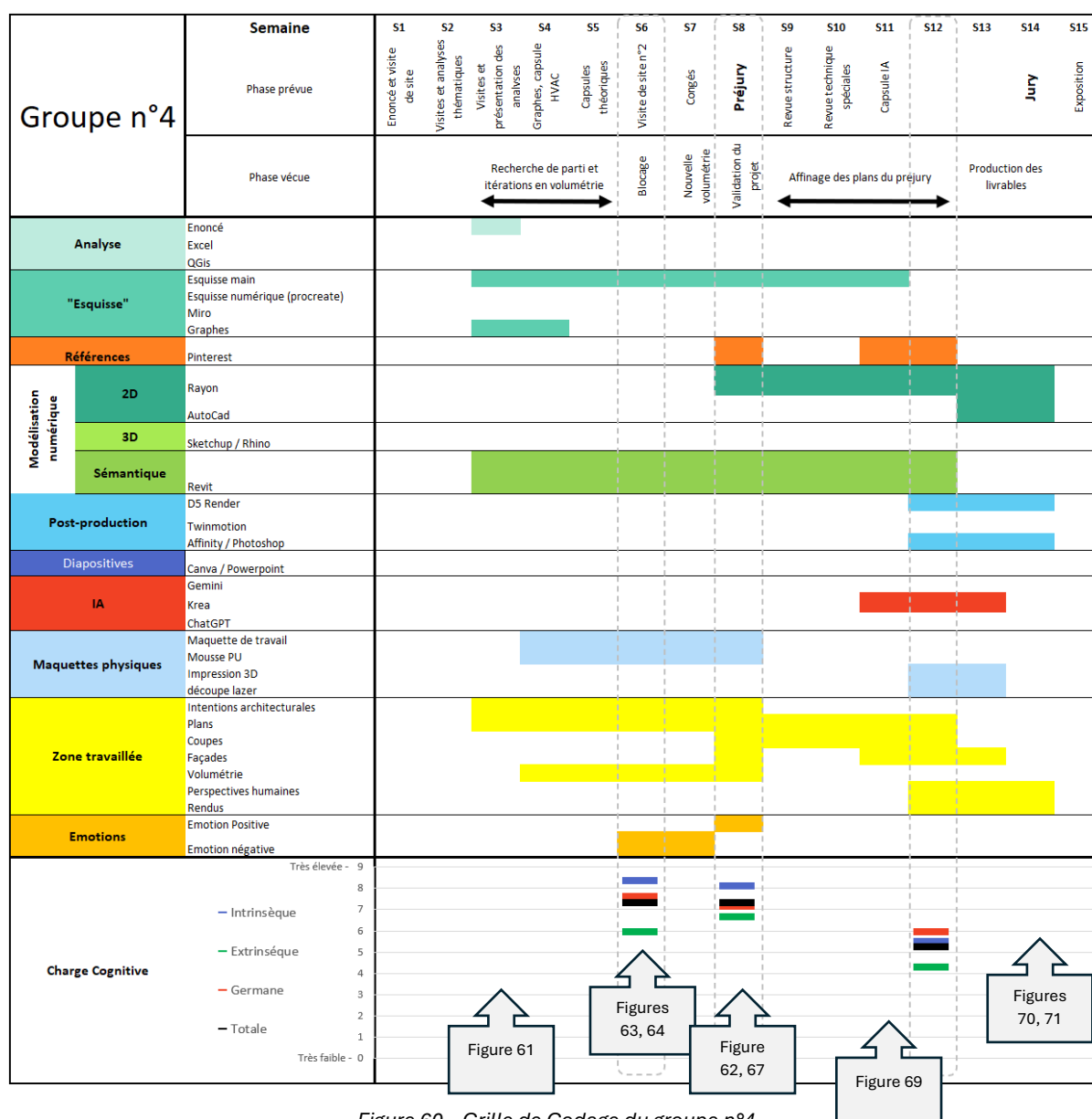


Figure 59 – Evaluation de la charge cognitive sur les 3 phases-clé du projet, groupe n°3

### 5.2.3.3 Processus de conception du groupe n°4

Le projet du groupe n°4 avait comme intentions architecturales de créer un musée « pour le peuple » en exposant certaines des pièces de la collection à l'extérieur, visibles gratuitement. Le musée s'ouvre vers le quartier plutôt que vers la Meuse. Les étudiant·es réalisent les analyses de site dans d'autres groupes durant les 2 premières semaines. Lors de la 3<sup>ème</sup> semaine, le projet débute par la découverte de l'énoncé et la recherche d'un concept architectural. Un Revit est débuté très tôt. Les étudiant·es font ensuite des itérations de volumétrie avec des maquettes en mousse PU et leur modèle Revit en parallèle. Après un blocage, iels trouvent une solution juste avant le pré-jury. Celui-ci se passe bien. Ensuite, les étudiant·es affinent le projet et produisent les livrables.



Le projet débute lors de la 3<sup>ème</sup> semaine par des esquisses rapides en plan, une recherche de concept et l'analyse du programme à l'aide de graphes et de post-its (voir Figure 61).

Un Revit est commencé dès la 3<sup>ème</sup> semaine afin de modéliser des éléments de contexte et le wagon-torpille (pièce exposée dans le musée). Ensuite, les étudiant-es réalisent une « maquette de surface ». Iels ont découpé des carrés de papier aux tailles requises par l'énoncé pour les différentes pièces, puis ont testé différentes configurations sur le plan de masse.

*« C'était une erreur parce qu'on est allé trop vite dans les plans »*

À partir de la semaine 4, les étudiant-es commencent leurs réflexions en volumétrie. Trois maquettes de travail en mousse PU sont alors produites jusqu'au pré-jury. En parallèle, les étudiant-es utilisent Revit pour débiter une modélisation numérique de leur projet. Les maquettes physiques sont de plus en plus précises : la première est constituée de gros blocs, la seconde identifie les ouvertures à l'aide de couleurs, et la troisième est utilisée pour présenter le projet au pré-jury, en plus de croquis en perspective (Voir Figure 62).

Les maquettes de travail les aidaient à se projeter et à voir l'ambiance créée dans le site avec la maquette de site (voir Figure 63). Colorier les ouvertures en bleu sur la maquette de travail les a aidés à visualiser leurs dimensions et proportions (voir Figure 64).

*« La première fois qu'on a fait la maquette, moi je me disais "mais en fait je ne savais pas que ça ressemblait à ça !" »*

Ensuite, le Revit est utilisé pour produire des débuts de plans et un début de volumétrie, en parallèle des maquettes de travail. Les étudiant-es semblent s'être enfermés dans Revit jusqu'au pré-jury (voir Figure 67) *« au début on s'est dit c'est juste du brouillon pour faire la volumétrie. Sauf qu'on avait tellement avancé dessus qu'au final on s'est dit on va continuer pour faire les plans. Sauf que vu qu'au début on avait commencé en brouillon, il fallait tout réarranger. Tout cela a pris beaucoup de temps »*

Le Revit est très long à modifier, cela prend beaucoup de temps pour faire des choses simples, par exemple mettre un bardage bois en façade.

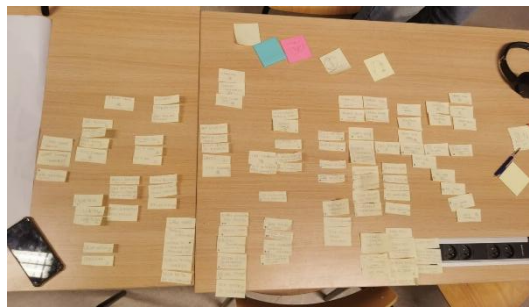


Figure 61 – Analyse du programme par le groupe n°4



Figure 62 – Croquis en perspective du groupe n°4 (S8)



Figure 63 – Deuxième maquette de travail du groupe n°4, insérée dans la maquette de site



Figure 64 – Deuxième maquette de travail du groupe n°4



Lors de la 6<sup>ème</sup> semaine, les étudiant-es expriment avoir rencontré un **blocage** car iels ne trouvaient pas de solution au projet et ressentait de la frustration. Iels travaillaient avec un modèle numérique Revit, en parallèle de maquettes de travail en mousse PU. Le blocage venait de **l'inadéquation entre les plans, le parti et la volumétrie**. Plus précisément, le blocage provenait de la position du restaurant par rapport aux autres fonctions. Initialement, les étudiant-es avaient séparé le restaurant dans une partie annexe du bâtiment. Mais en raison du blocage, iels ont été amenés à réunir le restaurant avec les autres fonctions. Pour ce faire, les étudiant-es sont retournés à l'esquisse sur papier. Selon eux-elles, la maquette de travail a contribué à débloquent la situation, un changement qui a impacté de nombreux aspects du projet. Selon leur témoignage, la solution leur est venue après les vacances<sup>2</sup>.

« Je pense qu'on était un peu trop fixés sur ce qu'on voulait faire en visuel ou en design architectural. On ne s'est pas trop posé la question sur qu'est ce qui marche réellement quoi. »

La charge cognitive extrinsèque est la plus faible des trois. Cela indique une faible charge cognitive liée aux documents d'énoncé et aux ressources externes au projet. En revanche, la charge cognitive intrinsèque est la plus élevée des trois. Elle est liée au niveau d'interactivité de la tâche, indiquant que le blocage rencontré par les étudiant-es touchait de nombreux aspects du projet en même temps.

Lors de la **semaine n°8**, les étudiant-es défendent leur projet au **pré-jury** (voir Figure 66). La semaine précédant ce dernier, iels ont entièrement changé la volumétrie du projet, afin de se sortir de l'impasse rencontrée plus tôt. Ce changement aboutit à la **validation** du projet par l'équipe encadrante.

| Groupe n°4             | Semaine                    | S5                                                                               | S6                 | S7                  |
|------------------------|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------|
|                        | Phase prévue               | Capsules théoriques                                                              | Visite de site n°2 | Congés              |
|                        | Phase vécue                | Recherche de parti et itérations en volumétrie                                   | Blocage            | Nouvelle volumétrie |
|                        | "Esquisse"                 | Esquisse main                                                                    |                    |                     |
| Modélisation numérique | sémantique                 | Revit                                                                            |                    |                     |
|                        | Maquettes physiques        | Maquette de travail Mousse PU                                                    |                    |                     |
| Zone travaillée        | Intentions architecturales |                                                                                  |                    |                     |
|                        | Plans Volumétrie           |                                                                                  |                    |                     |
| Emotions               | Emotion négative           |                                                                                  |                    |                     |
|                        | Charge Cognitive           | Très élevée - 10<br>9<br>8<br>7<br>6<br>5<br>4<br>3<br>2<br>1<br>Très faible - 0 |                    |                     |

Figure 65 – Grille de codage de la première phase-clé pour le groupe n°4

| Groupe n°4             | Semaine                         | S7                                                                               | S8                   | S9                             |
|------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------------------------|
|                        | Phase prévue                    | Congés                                                                           | Pré-jury             | Revue structure                |
|                        | Phase vécue                     | Nouvelle volumétrie                                                              | Validation du projet | Affinage des plans du pré-jury |
|                        | "Esquisse"                      | Esquisse main                                                                    |                      |                                |
| Modélisation numérique | Références                      | Pinterest                                                                        |                      |                                |
|                        | 2D                              | Rayon                                                                            |                      |                                |
| Sémantique             | Revit                           |                                                                                  |                      |                                |
|                        | Maquettes physiques             | Maquette de travail Mousse PU                                                    |                      |                                |
| Zone travaillée        | Concept                         |                                                                                  |                      |                                |
|                        | Plans Coupes Façades Volumétrie |                                                                                  |                      |                                |
| Emotions               | Emotion Positive                |                                                                                  |                      |                                |
|                        | Emotion négative                |                                                                                  |                      |                                |
| Charge Cognitive       | Charge Cognitive                | Très élevée - 10<br>9<br>8<br>7<br>6<br>5<br>4<br>3<br>2<br>1<br>Très faible - 0 |                      |                                |

Figure 66 – Grille de codage de la 2<sup>ème</sup> phase-clé pour le groupe n°4

<sup>2</sup> Les vacances ont eu lieu dans première partie de la S7, un voyage d'étude à Venise

Le projet est dessiné dans Revit en majorité, et une maquette de travail en mousse PU est également présentée au pré-jury. Les étudiant-es expriment des émotions positives, liées à la conclusion prometteuse du pré-jury. La charge cognitive intrinsèque est légèrement supérieure aux deux autres aspects. Cela est lié au niveau d'interactivité de la tâche, dénotant un grand nombre d'éléments devant être considérés simultanément. Étant donné le changement de direction donné au projet, les étudiant-es sont revenu-es sûr de nombreux aspects du projet.



Figure 67 – Plans et coupes issus de Revit, présentés au pré-jury par le groupe n°4

La semaine n°12 marque la **fin de la conception et le début de la phase de production** (voir Figure 68).

La dernière partie du projet restant à définir sont les façades. Des références Pinterest sont utilisées pour leur conception, de même qu'un retour à l'esquisse manuelle (voir Figure 69). Une fois fixée, ces façades sont dessinées dans Revit.

Ensuite, iels exportent leurs contenus vers D5 mais aussi vers Krea afin de produire leurs rendus finaux, générant beaucoup de pression. Leurs essais avec l'IA ne seront pas concluants, et iels privilégieront les vues réalisées dans D5. Les plans finaux sont sortis de Revit et aménagés dans Rayon, de même que les coupes.

La charge cognitive extrinsèque est légèrement inférieure aux deux autres dimensions. Cela indique une diminution de la charge cognitive liée aux documents d'énoncé et aux ressources externes au projet. La charge cognitive germane est légèrement supérieure aux deux autres. Cela indique un haut niveau d'engagement des étudiant-es dans le projet. Globalement, la charge cognitive totale diminue par rapport aux deux phases précédentes. Cela corrobore le témoignage des étudiant-es, qui rapportent une fin de projet peu stressante.

Les plans sont aménagés sur Rayon une fois finalisés dans Revit. La volumétrie est exportée dans D5 afin de produire les rendus. Krea est testée longuement, dans le style photoréaliste, mais abandonnée après de nombreux échecs.

| Groupe n°4             |            | Semaine                                                       | S11                            | S12 | S13                      |
|------------------------|------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----|--------------------------|
|                        |            | Phase prévue                                                  | Capacité IA                    |     |                          |
|                        |            | Phase vécue                                                   | Affinage des plans du pré-jury |     | Production des livrables |
| Modélisation numérique | "Esquisse" | Esquisse main                                                 |                                |     |                          |
|                        | Références | Pinterest                                                     |                                |     |                          |
|                        | 2D         | Rayon<br>AutoCad                                              |                                |     |                          |
|                        | Sémantique | Revit                                                         |                                |     |                          |
| Post-production        |            | D5 Render<br>Affinity / Photoshop                             |                                |     |                          |
| IA                     |            | Krea                                                          |                                |     |                          |
| Maquettes physiques    |            | Impression 3D<br>découpe lazer                                |                                |     |                          |
| Zone travaillée        |            | Plans<br>Coupes<br>Façades<br>Perspectives humaines<br>Rendus |                                |     |                          |
| Charge Cognitive       |            | Très élevée - 10                                              |                                |     |                          |
|                        |            | 9                                                             |                                |     |                          |
|                        |            | 8                                                             |                                |     |                          |
|                        |            | 7                                                             |                                |     |                          |
|                        |            | 6                                                             |                                |     |                          |
|                        |            | 5                                                             |                                |     |                          |
|                        |            | 4                                                             |                                |     |                          |
|                        |            | 3                                                             |                                |     |                          |
|                        |            | 2                                                             |                                |     |                          |
|                        |            | 1                                                             |                                |     |                          |
|                        |            | Très faible - 0                                               |                                |     |                          |

Figure 68 – Grille de codage de la 3<sup>ème</sup> phase-clé pour le groupe n°4



Figure 69 – Façades dessinées à la main par le groupe n°4 lors de la semaine 11 et 12

Une maquette est produite pour le jury et l'exposition (voir Figure 71). Elle ne sert pas au processus de conception du projet. Les étudiant-es n'ont pas mis en place de continuum conception-fabrication. Une partie de la maquette de présentation a été faite à la main car il aurait été trop long de tout dessiner dans AutoCAD pour utiliser la découpe laser, selon eux-elles. Les éléments découpés au laser ont été redessinés dans AutoCAD, notamment la façade, décomposée en plusieurs panneaux.



Figure 70 – Planches présentées par le groupe n°4 au jury

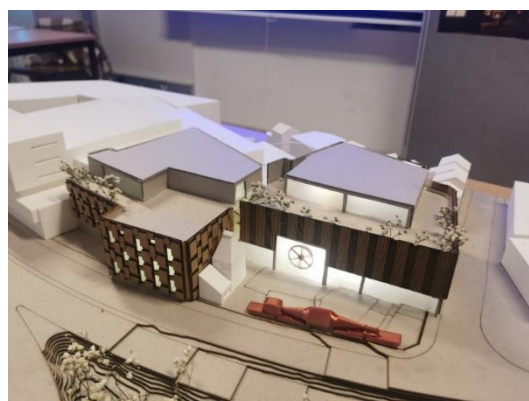


Figure 71 – Maquette pour le jury final du groupe n°4

## Évaluation de la charge cognitive sur l'ensemble du projet

Personne 1 : « Des hauts et des bas », selon le problème du moment. Elle a trouvé le début plus difficile, car il fallait trouver et définir le parti architectural. Plutôt frustrée en raison de la distance entre ses ambitions personnelles et ce qu'était le projet. Après le pré-jury, les problèmes lui semblaient gérables et donc elle a ressenti peu d'inquiétudes. Elle était calme lors du jury final.

Personne 2 : Le début était « bien », mais ce n'était « pas top » quand iels « tournaient en rond ». Frustrée également car elle ne comprenait pas pourquoi cela ne fonctionnait pas. La pression rediminue après la validation du pré-jury, puis remonte de nouveau à la fin car il y a la « pression de tout finir ».

Personne 3 : « Difficile de se projeter au début », et n'avait pas l'impression que le projet aboutissait à quelque chose de fonctionnel qui lui plaise. Le blocage avant les congés a été très stressant « on est foutus ». Après la validation du pré-jury, « ça va mieux », avec du bon stress à la fin. La pression provient plutôt du fait d'avoir envie de bien faire que de la peur de l'échec.

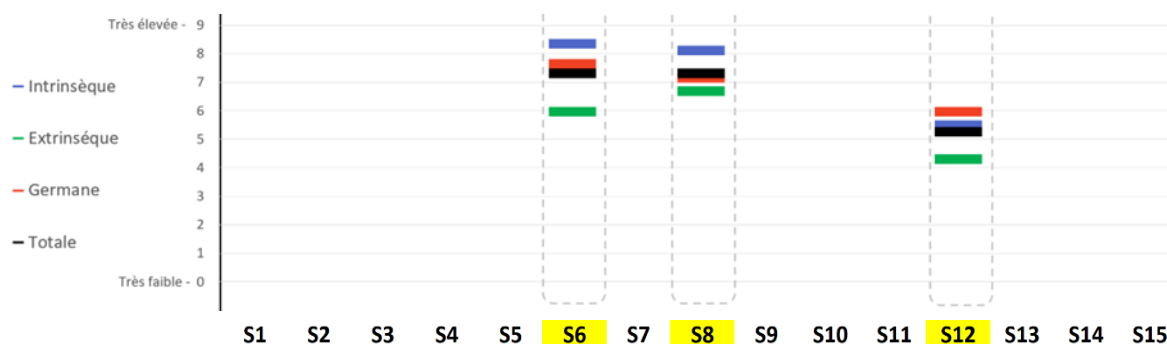


Figure 72 - Evaluation de la charge cognitive sur les 3 phases-clé du projet, groupe n°4



### 5.2.3.4 Processus de conception du groupe n°5

Le projet du groupe n°5 avait pour objectif de conserver au maximum l'existant, de venir offrir une nouvelle place en se décalant du boulevard et d'exploiter la courbe du fleuve. Le projet débute dès la 1<sup>ère</sup> semaine par l'analyse du quartier et du programme. Ensuite, les étudiant-es se lancent dans la recherche d'intentions architecturales, et suivent avec des itérations en volumétrie à l'aide d'une maquette de travail en mousse et d'un modèle numérique SketchUp. Rayon participe au processus de conception dès le début. Le pré-jury se passe bien et les étudiant-es développent ensuite les aspects techniques du projet. Lors de la semaine précédant le jury (S13), l'équipe encadrante fait des retours tels que le projet doit être entièrement revu. Les étudiant-es vont alors modifier une partie seulement et présenter le projet en l'état.

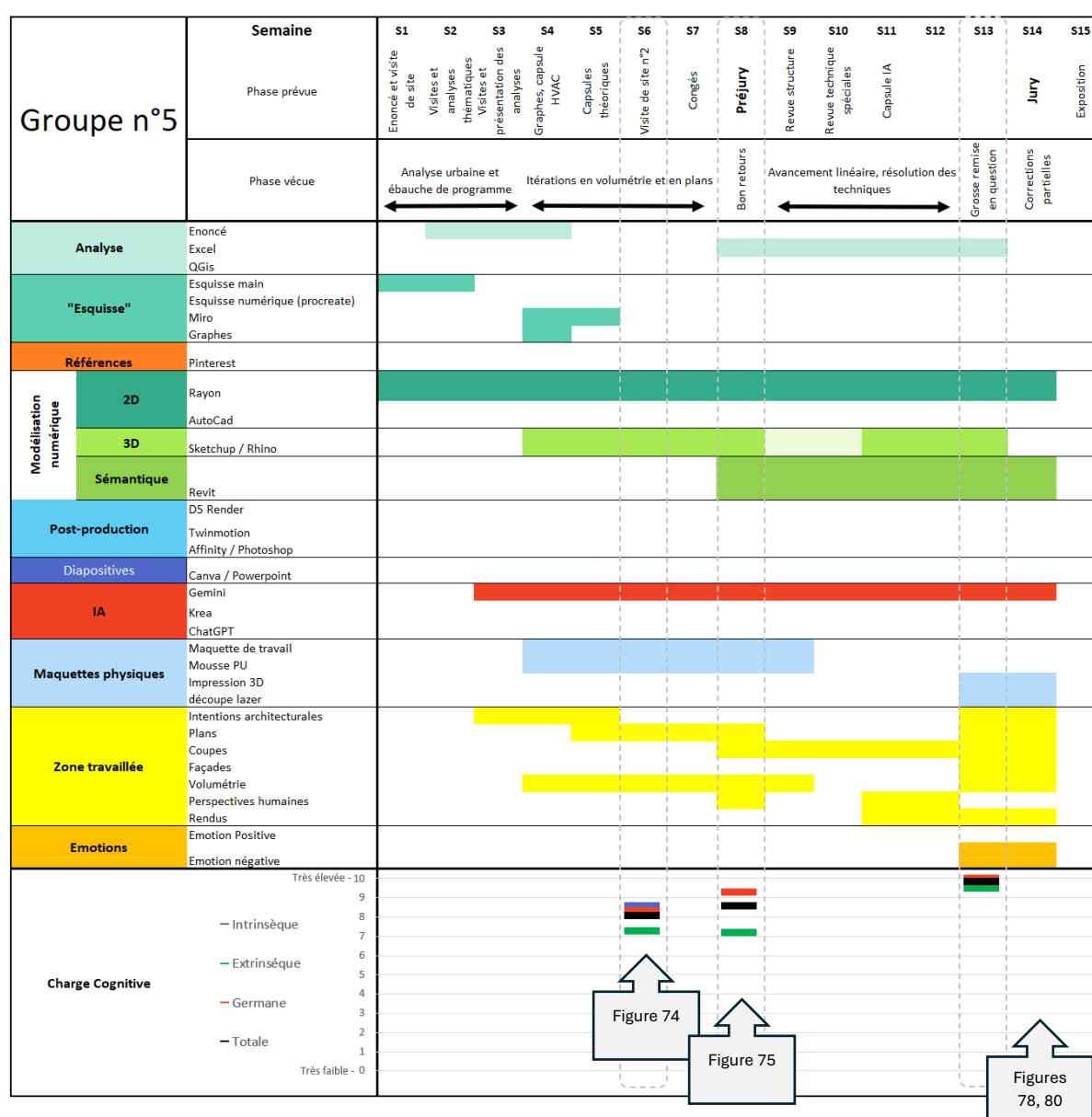


Figure 73 – Grille de Codage du groupe n°5

Les étudiant-es commencent le projet dès la 1<sup>ère</sup> semaine. Iels réalisent une analyse urbaine, une analyse de l'énoncé et une ébauche de programme. Mais le projet avance peu car iels doivent réaliser en parallèle les analyses thématiques dans d'autres groupes. Dès la 1<sup>ère</sup> semaine, les étudiant-es créent un Rayon et esquissent à la main sur papier. Rayon est utilisé tout au long du projet ; au départ pour des esquisses 2D, puis plus tard pour les plans, les coupes, puis plus tard encore pour aménager les coupes de Revit et dessiner sur les 3D de SketchUp. Il est aussi utilisé pour coordonner le groupe et rassembler les inspirations. Les étudiant-es s'interrogent sur leurs **intentions architecturales** à partir de la 3<sup>ème</sup> semaine.

Lors de la 4<sup>ème</sup> semaine, les étudiant-es terminent les analyses thématiques menées dans d'autres groupes et se lancent dans la **réalisation de graphes**. Ils utilisent aussi Miro, afin de structurer le dense programme de l'énoncé. À partir de la semaine 4, les étudiant-es esquissent uniquement sur Rayon.

C'est aussi lors de cette 4<sup>ème</sup> semaine que les étudiant-es commencent à rechercher une **volumétrie**, tout en continuant à développer leurs intentions architecturales. Des maquettes de travail en mousse PU sont produites dans ce but, en parallèle d'une maquette SketchUp. Ces itérations ont lieu entre les semaines 4 et 9. Les maquettes évoluent lors des sessions de travail ou lors des revues avec les encadrant.es. Les revues se passent autour de la maquette de travail. Une fois la volumétrie fixée, les étudiant-es la modélisent dans SketchUp afin de vérifier sa faisabilité à l'échelle.



Figure 74 – L'une des maquettes de travail du groupe n°5, avec ombres portées

*« Ce qui est bien à la main, c'est qu'il n'y a pas besoin de savoir quelle mesure ça fait quoi. Sur SketchUp, tu es obligé d'indiquer une dimension où le trait doit être précis »*

La maquette leur permet de tester l'insertion dans la maquette de site, c'est une aide visuelle pour formaliser les choses. La maquette permet de voir les ombres portées du bâtiment sur lui-même, à l'aide du flash du téléphone (voir Figure 74).

SketchUp permet de vérifier que la volumétrie proposée en maquette est « *faisable* ».

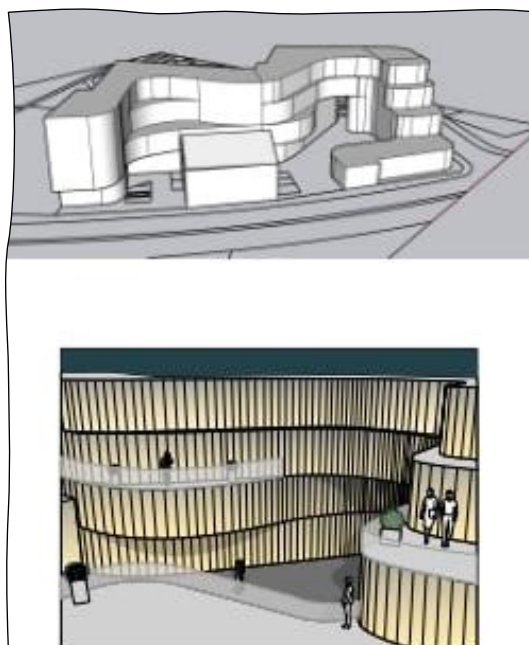


Figure 75 – Modèle numérique SketchUp produit en parallèle de la maquette de travail en mousse

Lors de la semaine 6, les étudiant-es se rendent pour la deuxième fois sur site. Iels se rendent alors compte de **conflits entre leurs idées et le site**. Cela permet de rediriger leurs itérations, avec pour objectif de trouver un agencement idéal (aussi bien en plans qu’en volumétrie) que de l’avis de l’équipe encadrante.

Ce travail itératif est assez long. La tâche n’est pas facilitée par le contexte urbain dense, ni par le programme très fourni. Les plans évoluent en parallèle dans Rayon. Ces plans sont dessinés à partir de la volumétrie mais l’influencent également en retour. Gemini sert déjà aux étudiant-es de soutien dans de nombreuses tâches.

Comme reportée à la Figure 76, la charge cognitive extrinsèque est légèrement plus faible que les deux autres dimensions, indiquant que la charge cognitive liée aux documents d’énoncé & ressources externes est relativement faible, bien que l’on se situe au début du projet.

Tout au long du projet, Gemini est comme un collaborateur supplémentaire. L’IA est utilisée pour l’analyse du programme, la recherche d’inspirations, pour aider à réaliser les graphes d’adjacences ou encore pour améliorer la résolution des plans. Les étudiant-es témoignent qu’« avec de bons prompts », cela fonctionne très bien.

Lors de la semaine n°8, les étudiant-es défendent leur projet au **pré-jury** (voir Figure 77). Celui-ci se déroule bien, et le projet est validé dans son ensemble. Les étudiant-es décident de fixer la volumétrie et leurs intentions architecturales, et se lancent dans la correction des remarques, puis le dimensionnement des techniques.

Comme reporté à la Figure 77, la charge cognitive augmente globalement par rapport à la phase précédente. La charge cognitive extrinsèque est la plus faible, traduisant de nouveau une faible charge cognitive liée à l’énoncé et aux ressources externes au projet. La charge cognitive germane est la plus élevée des trois. Cela montre un haut niveau d’engagement dans le projet lors du pré-jury.

Entre les semaines 8 et 12, les étudiant-es affinent leur projet, et parlent d’un « *avancement linéaire* », « *tout droit* ». Iels ajoutent les techniques spéciales, et passent à la modélisation du projet sur Revit. Les étudiant-es justifient ce choix par le fait que le logiciel offre une plus grande précision que le SketchUp précédemment utilisé. Cela leur permet

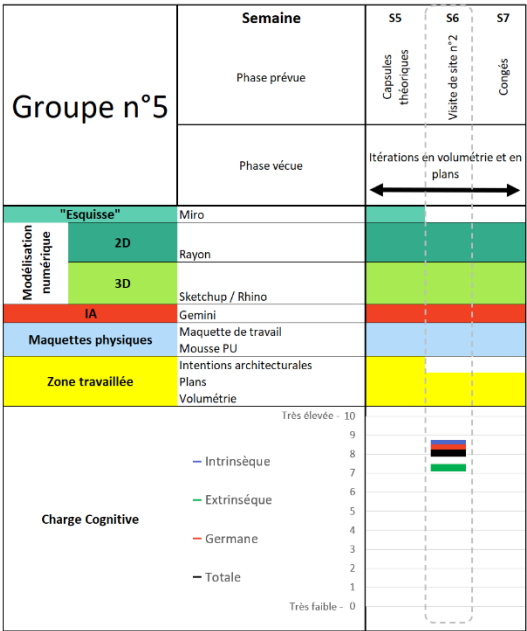


Figure 76 – Grille de codage de la 1<sup>ère</sup> phase-clé pour le groupe n°5

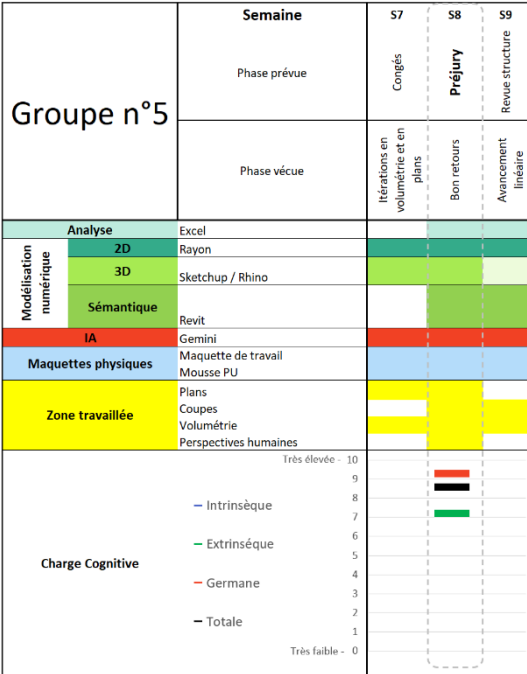


Figure 77 – Grille de codage de la 2<sup>ème</sup> phase-clé pour le groupe n°5

d’obtenir des coupes dans leur projet ainsi que la volumétrie à partir des plans.

Lors de la semaine 11, les étudiant-es reçoivent une capsule théorique sur l’IA. Iels essaient alors de produire des rendus avec leur modèle Revit dans Nano Banana (Gemini). Malheureusement, la volumétrie du Revit «*n’était pas exploitable*». Le modèle Revit contenait trop de détails, ce qui perturbait la tâche de l’IA. Iels ont alors modélisé le projet de nouveau sur SketchUp entre la semaine 11 et 14, en plus simplifié, afin de faciliter la tâche de l’IA (voir le résultat à la Figure 78).



Figure 78 – L’un des rendus produit par le groupe n°5

Lors de la semaine 13, **l’équipe encadrante formule de nombreuses critiques** à l’encontre du projet, forçant les étudiant-es à en reprendre une grande partie (voir Figure 79). De nombreuses choses sont à changer dans le projet : les façades, les axes de circulation, l’emplacement des fonctions. Le jury étant prévu la semaine suivante, les étudiant-es décident de ne reprendre qu’une partie des travaux déjà effectués, à savoir les façades, par manque de temps. La maquette du jury, déjà imprimée en partie, est recommencée. Ces retours négatifs provoquent en eux-elles des émotions plutôt négatives, allant de la frustration à l’incompréhension.

La charge cognitive augmente par rapport aux deux phases précédentes, et ce dans les trois dimensions. Cela indique que les retours négatifs de l’équipe encadrante sur le projet ont provoqué une charge cognitive aussi bien liée aux ressources externes, au niveau d’interactivité de la tâche et à l’engagement des étudiant-es. Cela est aussi à mettre en lien avec le jury final imminent.

A la fin du projet, une maquette est produite pour le jury final en impression 3D et travail manuel pour partie (voir Figure 80). La moitié de la maquette est déjà imprimée lorsqu’iels font face à la remise en question de la semaine 13. Ces parties déjà imprimées n’ont pas servi à la conception, et ont été recommencées.

La maquette permet de se figurer la proportion des espaces, surtout avec des personnages à l’échelle. Iels font des prises de photo de la maquette pour rendre des vues proches du réel. Le projet a été remodelisé sur SketchUp pour faire la maquette imprimée en 3D. Ces machines simplifient la tâche, notamment pour la production des éléments courbes du projet.

|                        |                            | Semaine                     | S12                       | S13                       | S14                    |
|------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| Groupe n°5             | Phase prévue               |                             |                           |                           |                        |
|                        | Phase vécue                |                             | Résolution des techniques | Grosse remise en question | Corrections partielles |
| Modélisation numérique | Analyse                    | Excel                       |                           |                           |                        |
|                        | 2D                         | Rayon                       |                           |                           |                        |
|                        | 3D                         | Sketchup / Rhino            |                           |                           |                        |
|                        | Sémantique                 | Revit                       |                           |                           |                        |
| IA                     |                            | Gemini                      |                           |                           |                        |
|                        |                            |                             |                           |                           |                        |
| Maquettes physiques    |                            | Impression 3D découpe lazer |                           |                           |                        |
| Zone travaillée        | Intentions architecturales |                             |                           |                           |                        |
|                        | Plans                      |                             |                           |                           |                        |
|                        | Coupes                     |                             |                           |                           |                        |
|                        | Façades                    |                             |                           |                           |                        |
|                        | Volumétrie                 |                             |                           |                           |                        |
|                        | Perspectives humaines      |                             |                           |                           |                        |
| Emotions               |                            | Emotion négative            |                           |                           |                        |
| Charge Cognitive       | Très élevée - 10           |                             |                           |                           |                        |
|                        | 9                          |                             |                           |                           |                        |
|                        | 8                          |                             |                           |                           |                        |
|                        | 7                          |                             |                           |                           |                        |
|                        | 6                          |                             |                           |                           |                        |
|                        | 5                          |                             |                           |                           |                        |
|                        | 4                          |                             |                           |                           |                        |
|                        | 3                          |                             |                           |                           |                        |
|                        | 2                          |                             |                           |                           |                        |
|                        | 1                          |                             |                           |                           |                        |
|                        |                            | Très faible - 0             |                           |                           |                        |

Figure 79 – Grille de codage de la 3<sup>ème</sup> phase-clé pour le groupe n°5



Figure 80 – Maquette pour le jury final du groupe n°5

Lors du jury, l'équipe encadrante formule des critiques négatives à l'encontre du projet, étant donné qu'ils n'ont pas pu intégrer l'ensemble des remarques. Les étudiant-es expriment également des émotions négatives, liées aux retours de l'équipe encadrante.

### Évaluation de la charge cognitive sur l'ensemble du projet

Personne 1 : Grâce au fait que le groupe était bien organisé, elle n'a pas ressenti de pics importants de travail ni de stress. Il y en a quand même eu malgré tout, notamment à la semaine 13.

Personne 2 : Avant le pré-jury, c'était énormément d'aller-retour, de négociations, afin de comprendre les autres membres du groupe et les encadrant-es. Le pré-jury se passe bien. Ensuite, c'est « tranquille », le groupe avance linéairement jusqu'à la remise en question de la semaine 13.

Personne 3 : Le début est calme, malgré qu'il y ait beaucoup de travail, avec un gros programme à faire rentrer dans une petite surface et un contexte urbain dense. La pression augmente d'un coup lors de la semaine 13.

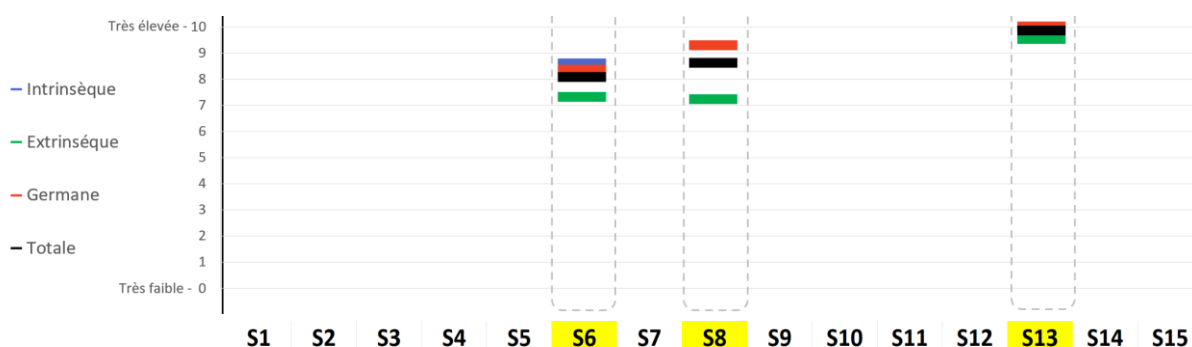


Figure 81 - Evaluation de la charge cognitive sur les 3 phases-clé du projet, groupe n°5

### 5.2.3.5 Processus de conception du groupe n°6

Les intentions architecturales des étudiant-es consistent à insérer le site dans un axe perpendiculaire à la Meuse, en s'intégrant ainsi dans le tissu existant, tout en devenant un pôle attracteur central pour le quartier. Ce groupe a la particularité d'avoir produit la maquette de site, commune à tous les groupes, entre les semaines 1 et 4. En parallèle de la maquette de site, iels commencent leur projet par l'analyse de l'énoncé et des esquisses à la main pour la recherche du parti architectural. Cela reste très lent, et iels commencent véritablement à concevoir lors de la 4e semaine avec les graphes et post-its. S'ensuit une maquette de travail, définissant la volumétrie du projet. Iels produisent ensuite les documents pour le pré-jury. Les retours du pré-jury sont négatifs, et iels fournissent un travail intense durant la semaine 9. Le projet est résolu à la semaine 10, où iels rentrent en production des livrables pour le jury final.

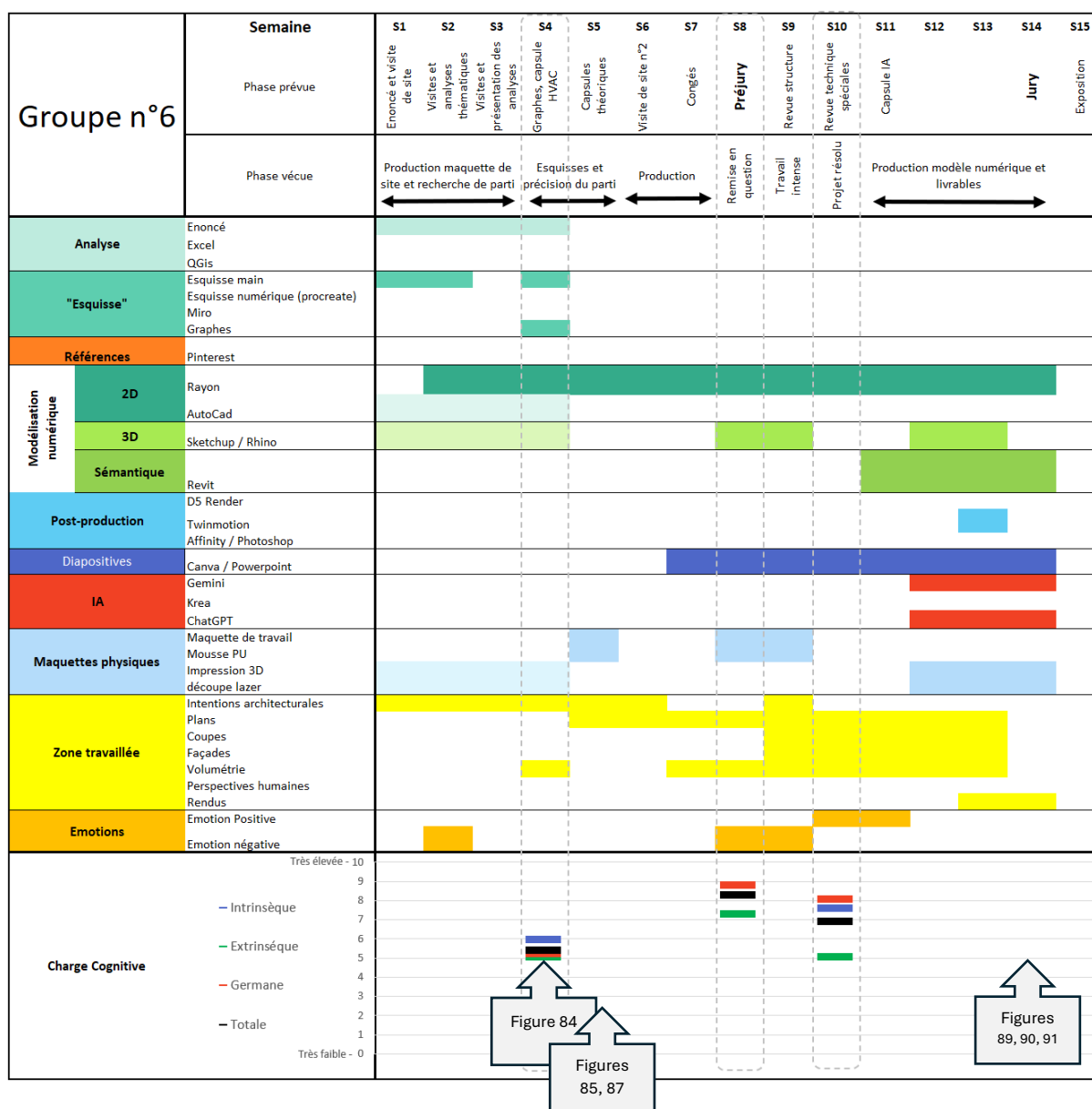


Figure 82 – Grille de Codage du groupe n°6



Le projet débute lentement au départ, en raison de la production de la maquette de site en même temps. Les étudiant-es cherchent en parallèle leurs intentions architecturales au moyen d'esquisses sur papier. Lors de la semaine n°2, les étudiant-es créent un Rayon afin d'esquisser ensemble. Lors de la 3e semaine, iels se concentrent sur la maquette de site, afin de la terminer pour la semaine suivante.

Lors de la semaine 4, iels démarrent véritablement la **conception de leur projet** (voir Figure 83). Iels travaillent alors sur un graphe d'adjacence des esquisses à la main (voir Figure 84) ainsi qu'une maquette de travail la semaine suivante. C'est également à cette période qu'iels définissent leur parti architectural.

La charge cognitive est globalement moyenne pour cette phase. La charge cognitive intrinsèque est légèrement plus élevée. Cela indique que les étudiant-es doivent à ce moment considérer de nombreux aspects du projet en parallèle.

Lors de la semaine 5, les étudiant-es entrent dans une phase de **recherche de volumétrie** en accord avec leurs intentions architecturales et les esquisses produites plus tôt. Une maquette de travail en mousse a été produite dans ce but (voir Figure 85).

« On a beau essayer de faire des perspectives en 2D, au bout d'un moment faut se rendre compte comment ça fonctionne en 3D. Et du coup, tu ne vas pas t'embêter à modéliser ça sur un logiciel parce que ça va être plus long qu'autre chose »

Cette première volumétrie a « choqué » le groupe : « la première fois qu'on a fait vraiment une volumétrie de ce qu'on avait en plan, on s'est dit c'est moche, on s'est dit c'est beaucoup trop massif ! ». Heureusement, la modification est facile « Je crois que c'est un des premiers ateliers où la maquette en PU a vraiment été utile, on s'est rendu compte de la puissance du truc » « vraiment la maquette a quand même été utile niveau conception, et pas juste parce que les profs nous en demandent ».

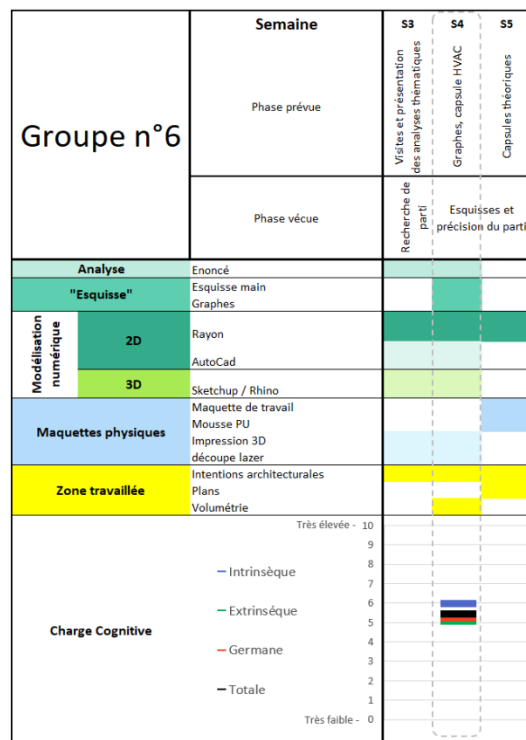


Figure 83 – Grille de codage de la 1<sup>ère</sup> phase-clé pour le groupe n°6

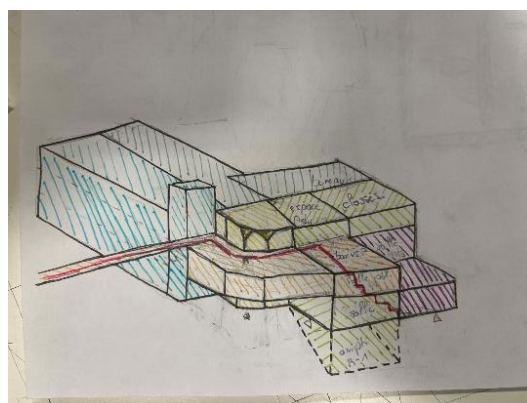


Figure 84 – Esquisse en volumétrie du groupe n°6 (S4)



Figure 85 – Maquette de travail du groupe n°6 (S5)

C'est plus rapide de se projeter avec la maquette de site en réel en revue plutôt que sur l'écran d'ordi, les revues se font autour de la maquette de travail insérée dans la maquette de site. On peut simuler des ombres projetées avec le téléphone, on se projette tout de suite et c'est très facile à faire.

Lors de la semaine 8, les étudiant-es défendent leur projet au **pré-jury** (voir Figure 86). Une seconde maquette de travail est produite afin de présenter le projet au pré-jury. Celui-ci se passe mal, et les étudiant-es expriment des émotions négatives. Les étudiant-es décrivent que « *la forme n'a pas de sens et ne répond pas aux partis architecturaux* ».

Après l'échec du pré-jury, iels reprennent la maquette qu'ils avaient présentée et la modifient pour trouver une solution, en coupant dedans afin de libérer de l'espace. Iels ont utilisé un système de blocs, attachés ensemble par des épingles métalliques, ce qui leur permettait de tout modifier très facilement (voir Figure 87). Un modèle numérique Rhino est également utilisé pour dégager des solutions.

Pendant la semaine n°9, se déroule la revue de structure, et les étudiant-es vont alors produire énormément pendant une semaine afin de ne pas « *gâcher* » cette revue (c'est-à-dire se présenter à la revue sans projet). Ce sur-travail entraînera une baisse de la motivation et de la créativité des étudiant-es, bien qu'ayant permis aux étudiant-es de rattraper leur retard. À la fin de cette période chargée, iels finissent épuisés, exprimant à nouveau des émotions négatives.

La charge cognitive augmente par rapport à la phase précédente. La charge cognitive extrinsèque est la moins élevée des trois. Cela montre une plus faible charge cognitive liée aux ressources externes au projet. En revanche, la charge cognitive germane est la plus élevée, traduisant un haut niveau d'engagement des étudiant-es dans le projet.

Lors de la semaine n°10, les étudiant-es considèrent avoir **résolu l'ensemble des critiques** du pré-jury. Iels rentrent alors en phase de production des différents livrables demandés par l'équipe encadrante, ainsi que l'ajout et dimensionnement des techniques. Iels commencent aussi un modèle numérique Revit de leur bâtiment, afin d'en obtenir les coupes et volumétrie. L'arrivée d'une solution au projet fait naître des émotions positives en eux-elles.

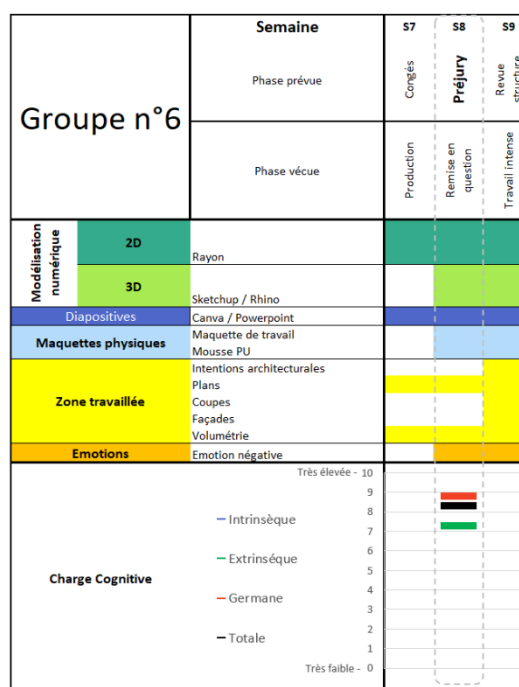


Figure 86 – Grille de codage de la 2<sup>ème</sup> phase-clé pour le groupe n°6

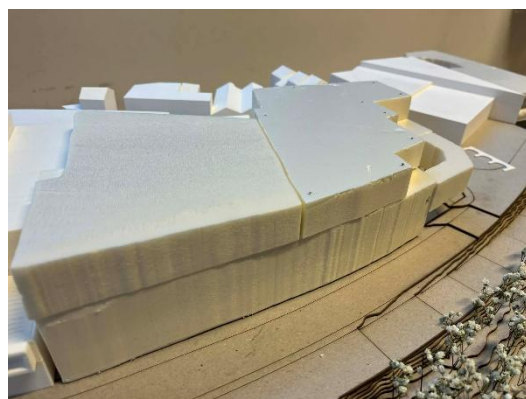


Figure 87 – Maquette de travail du groupe n°6 (S5)



La charge cognitive globale diminue par rapport à la phase précédente. La solution apportée au projet semble avoir libéré les étudiant-es de la charge ressentie deux semaines auparavant. La charge cognitive extrinsèque est la plus faible des trois. Cela montre à nouveau, tout comme lors de la première phase, un impact moindre des ressources externes au projet. La charge cognitive germane reste la plus élevée, montrant que les étudiant-es s'investissent encore beaucoup dans le projet.

Une fois le projet corrigé vis-à-vis des retours du pré-jury, les étudiant-es modélisent leur projet sur Revit, car le logiciel permet d'obtenir les coupes et façades. Iels réalisent aussi une esquisse de leur passerelle sur Rhino, afin de détailler le fonctionnement structurel. Quand le Revit était plus abouti, iels montrent le Revit en revue plutôt que les maquettes « *On a perdu l'intérêt de faire des maquettes physiques quand le Revit était plus précis.* »

Le bardage bois fait en Revit a pris énormément de temps. La personne responsable aurait aimé le faire en Grasshopper si elle avait su que ça serait si long, mais une fois lancée, elle ne s'est pas arrêtée (voir Figure 91).

Les plans, coupes et façades sont ensuite exportés de Revit dans Rayon afin d'être aménagés. Afin de produire les **rendus** attendus par l'exercice (voir Figure 89), deux stratégies sont mises en place. Premièrement, la volumétrie est exportée de Revit dans Twinmotion. Deuxièmement, l'IA est également utilisée pour produire des rendus depuis Revit et pour obtenir le prompt idéal à la première tâche. Les étudiant-es colorent le modèle avec des couleurs criardes pour que l'IA reconnaisse les éléments facilement.

Pour le jury final, une maquette a été produite avec de l'impression 3D et un peu de découpe laser (voir Figure 90). Ce groupe n'a pas mis en place un véritable continuum conception-fabrication. Néanmoins, on observe que la volumétrie Revit a pu en partie être utilisée pour l'impression 3D du bâtiment. En effet, les étudiant-es ont exporté la volumétrie obtenue, puis l'ont nettoyée dans SketchUp afin d'obtenir un modèle propre et imprimable.

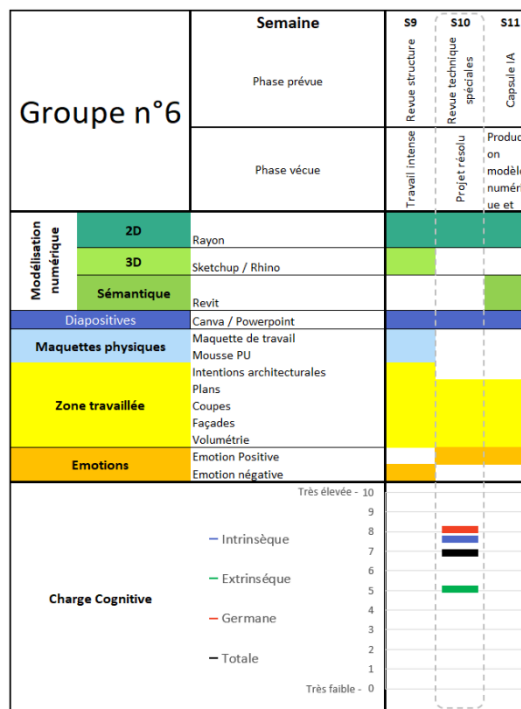


Figure 88 – Grille de codage de la 3<sup>ème</sup> phase-clé pour le groupe n°6

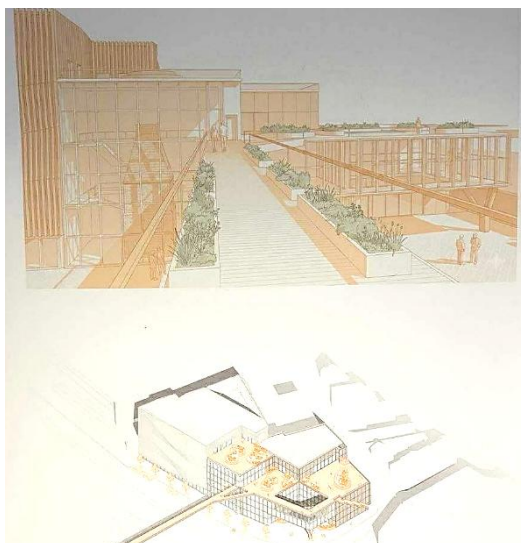


Figure 89 – L'une des planches présentées par le groupe n°6 au jury final

« J'avoue que moi j'ai plus kiffé notre maquette une fois qu'elle était finie que quand elle était juste numérique ».

Iels doivent couper leur bâtiment en petites parties pour éviter de monopoliser la seule grosse imprimante 3D du fab52.

Les outils de fabrication sont complexes à prendre en main au début mais le cours de MAN a aidé (ainsi que le « personnel sympathique » du Fab52).

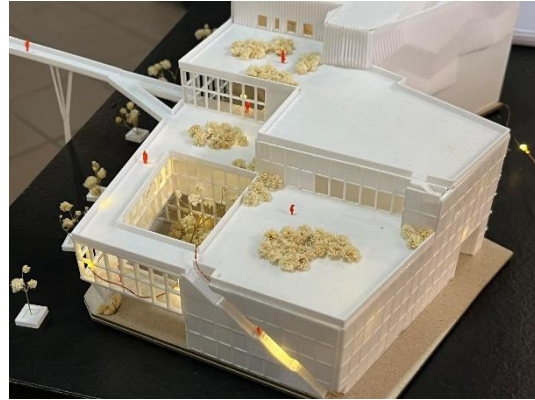


Figure 90 – Maquette présentée par le groupe n°6 au jury final

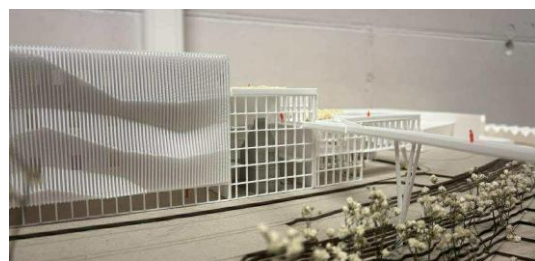


Figure 91 – Maquette présentée au jury final par le groupe n°6 ; détail de façade

### Évaluation de la charge cognitive sur l'ensemble du projet

Personne 1 : le projet a été lent au démarrage, ce n'était pas clair si ce qu'ils faisaient lui plaisait. Ensuite, le pré-jury a été démoralisant. Vers la fin du quadrimestre, le projet devient « fun » car les profs apprécient plus le projet, et cela motive. Le jury final était « chouette ».

Personne 2 : Lent au début avec beaucoup d'informations, par toutes les visites et les capsules théoriques. Vers la fin, « Ça je crois que ça nous a vraiment aidé. Qu'on sache que ce qu'on faisait, c'était cool ». Le projet la prend aux tripes, elle y pense tout le temps.

Personne 3 : Le projet est lent au démarrage. Grosse remise en question au pré-jury, même personnelle. Le projet est « fun » vers la fin, avec une reprise d'ambition vers les dernières étapes.

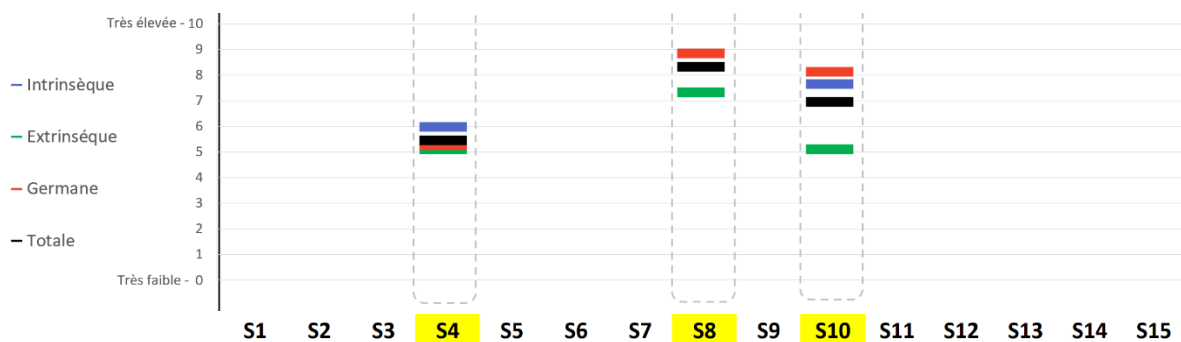


Figure 92 - Evaluation de la charge cognitive sur les 3 phases-clé du projet, groupe n°6

### **5.2.3.6 Retour des étudiant-es sur l'Atelier**

Les entretiens ont également pu faire émerger des retours des étudiant-es concernant leur Atelier :

- Le timing de la revue « structure » est compliqué car juste après le pré-jury qui s'est mal passé, donc sans projet à présenter (ITW6)
- Il y a beaucoup de visites au début (entre les semaines 1 et 3) ainsi qu'énormément d'informations, ce qui peut submerger les étudiant-es car iels ne savent pas comment tout intégrer. Les visites sont néanmoins intéressantes. (ITW2)
- Les graphes d'adjacences ont naturellement incité les étudiant-es à d'abord penser en plans, ce qui a fortement dirigé les premières idées (contrairement à d'autres ateliers plus libres où on pourrait penser d'abord en volume) (ITW2)
- « *Par rapport à la fac archi, nous sommes super bien encadrés* ». (ITW3)
- Baisse de motivation après chaque revue où on « casse » le projet, du mal à redémarrer après les revues (ITW3)

### **5.2.3.7 Notes obtenues par les groupes à l'atelier**

Les notes obtenues par les différents groupes de conception sont les suivantes :

|          |   |
|----------|---|
| Groupe 2 | B |
| Groupe 3 | B |
| Groupe 4 | B |
| Groupe 5 | C |
| Groupe 6 | B |

Avec A>17/20 ; B : 15,16 ; C<15/20

### 5.2.4 Charge cognitive pendant le processus de conception

Le questionnaire d'évaluation de la charge cognitive administré pendant les entretiens permet d'observer des tendances générales parmi les groupes d'étudiant-es. Les résultats peuvent être reportés semaine par semaine. Les semaines où des données sont disponibles sont reportées à la Figure 93.

| Semaine | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 | S14 |
|---------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Données |    |    |    | X  |    | X  | X  | X  |    | X   |     | X   | X   | X   |
| Groupes | 2  |    |    |    |    | X  |    | X  |    |     |     |     |     | X   |
|         | 3  |    |    |    |    |    | X  |    |    | X   |     | X   |     |     |
|         | 4  |    |    |    |    | X  |    | X  |    |     |     | X   |     |     |
|         | 5  |    |    |    |    | X  |    | X  |    |     |     |     | X   |     |
|         | 6  |    |    | X  |    |    |    | X  |    | X   |     |     |     |     |
| Total   |    |    |    | 1  |    | 3  | 1  | 4  |    | 2   |     | 2   | 1   | 1   |

Figure 93 – Semaines où des données sont disponibles

Les données obtenues pour la semaine 13 proviennent du groupe n°5. Ce groupe avait alors rencontré un changement de direction majeur une semaine avant le jury. Les étudiant-es ont répondu le maximum à toutes les questions. Ce résultat ne reflète sans doute pas l'état d'esprit des autres groupes.

Les étudiant-es répondaient au moyen d'échelles de Likert à 7 points. Pour faciliter l'analyse, les résultats ont été exprimés sur une échelle allant de 0 – Très faible à 10 – Très élevée. En reportant les résultats du questionnaire par semaine, on constate à la Figure 94 que la charge cognitive augmente en moyenne avec l'avancement du projet, traduisant l'augmentation de la quantité de travail pour le jury final. Lors des semaines 6, 8, 10, 12 et 14, la charge cognitive extrinsèque est inférieure d'un écart type des deux autres aspects. Lors des semaines 4 et 7, la charge cognitive intrinsèque est plus élevée d'un écart type des deux autres aspects. Lors des semaines 7, 8 et 10, la charge cognitive intrinsèque reste la plus élevée. Lors des semaines 12 et 14, c'est la charge cognitive germane qui devient la plus élevée, sans toutefois dépasser un écart type de différence.

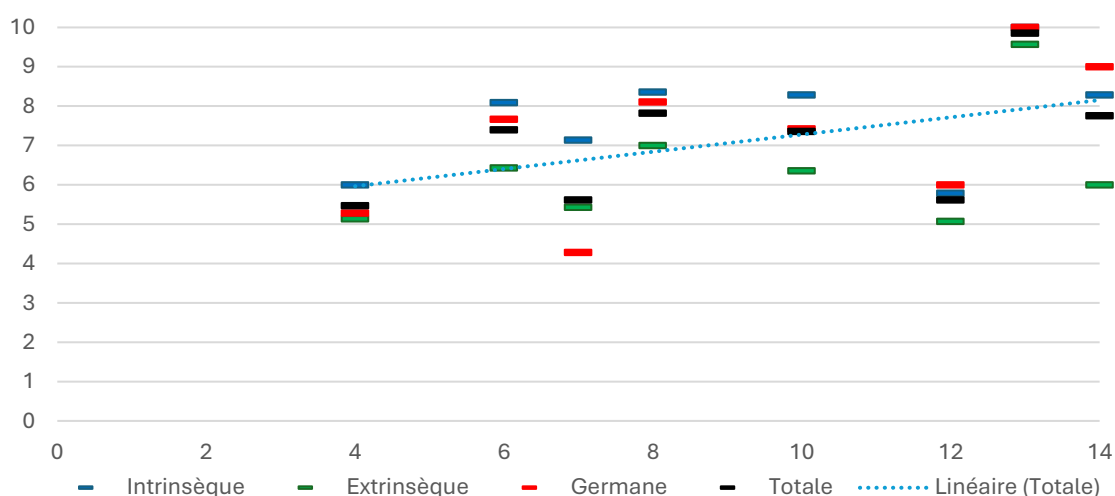


Figure 94 – Évolution moyenne des trois aspects de la charge cognitive pour les groupes d'Atelier IV

Lorsque l'on observe les groupes individuellement, en alignant les 3 phases-clés pour chaque groupe, on peut observer deux tendances (voir Figure 95). Premièrement, les groupes où la charge cognitive totale augmente linéairement avec le temps passé (groupes 2 et 5). La troisième phase du groupe n°2 était le jury final. Celle du groupe n°5 est la semaine 13, et correspond à une forte remise en question du projet. Ces groupes sont conformes à la moyenne générale. Deuxièmement, les groupes avec une diminution de la charge cognitive dans la troisième phase (groupes 3, 4 et 6). La troisième phase des groupes 3 et 4 est la semaine 12. La troisième phase du groupe 6 est la semaine 10. Pour ces trois groupes, cela correspond au moment de la fin de la conception, et du début de la production des livrables.

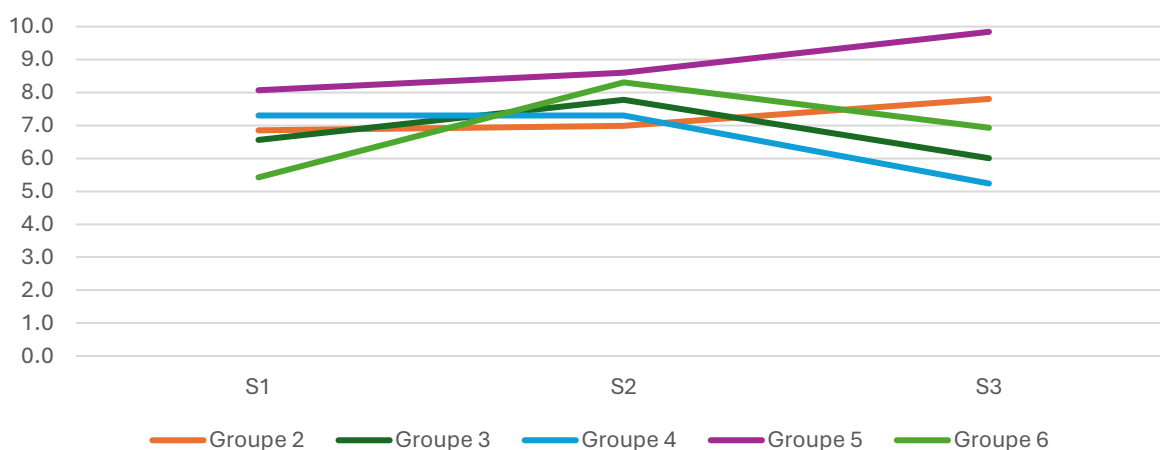


Figure 95 – évolution de la charge cognitive totale pour les 5 groupes d'atelier IV

Si l'on s'intéresse aux trois dimensions de la charge cognitive pour chaque groupe individuellement, les deux tendances sont toujours clairement visibles (voir Figure 96, Figure 97, Figure 98, Figure 99). En particulier, les groupes 3 et 4 montrent une forte baisse de charge cognitive lors de la 12e semaine, à deux semaines du jury final. Au contraire, les groupes 2 et 5 montrent une hausse de charge cognitive sur les dernières semaines. Malgré cette augmentation globale, la charge cognitive extrinsèque du groupe n°2 diminue dans les dernières semaines. Les groupes 3 et 4 montrent une charge cognitive germane en baisse. Le groupe 6 présente un pic lors du pré-jury (semaine 8). Les groupes 2 et 5 montrent une charge cognitive germane en augmentation. Le pré-jury est un point d'inflexion pour la charge cognitive extrinsèque pour les groupes 2, 4, 5 et 6. Pour les groupes 2, 4 et 6, la charge cognitive extrinsèque part à la baisse après le pré-jury, tandis qu'elle augmente pour le groupe 5.

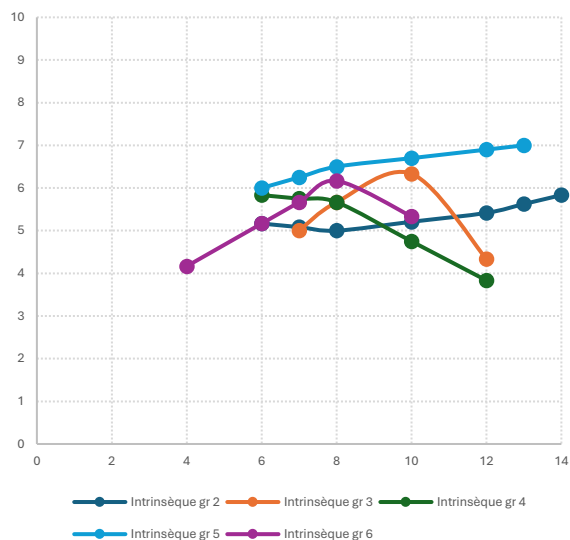


Figure 96 – Charge cognitive intrinsèque pour les 6 groupes d'atelier IV

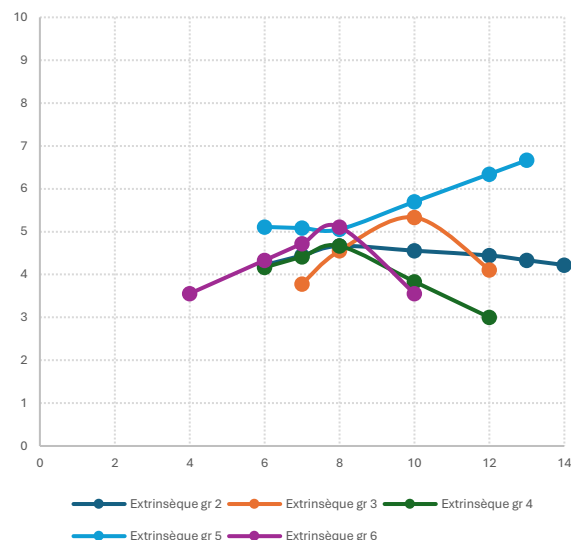


Figure 97 – Charge cognitive extrinsèque pour les 5 groupes d'atelier IV

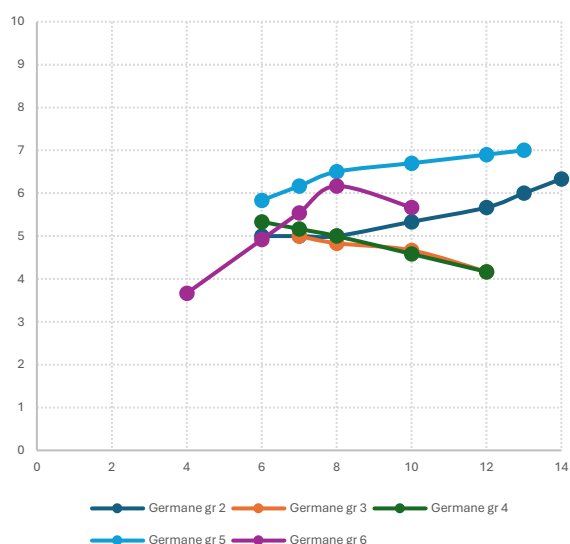


Figure 98 – Charge cognitive germane pour les 5 groupes d'atelier IV

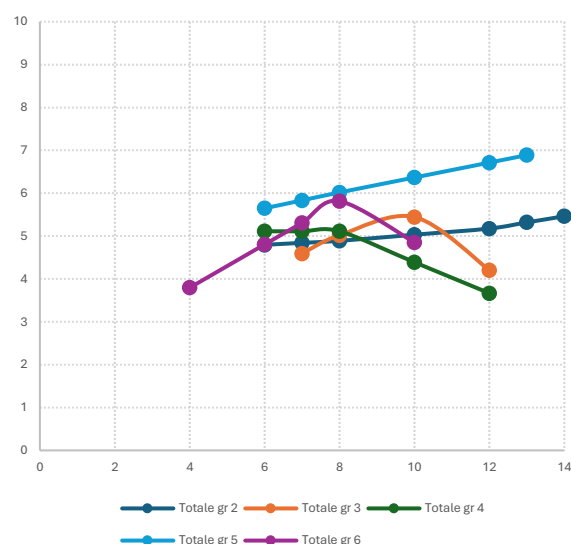


Figure 99 – Charge cognitive totale pour les 5 groupes d'atelier IV



## Chapitre 6    DISCUSSION

*« L'imagination est le précurseur de la connaissance »*

*Florence Nightingale, infirmière et statisticienne*



Dans ce chapitre, nous allons revenir sur nos trois questions de recherche (voir Chapitre 3) afin de mettre en relief les résultats obtenus à la section précédente.

## **6.1 À L'ÈRE DE L'INFORMATION, QUELS RÔLES POUR LES MAQUETTES PHYSIQUES DANS LA CONCEPTION ARCHITECTURALE ? LES MODÈLES NUMÉRIQUES POURRAIENT-ILS REMPLACER LES MAQUETTES PHYSIQUES ?**

Afin de répondre à notre question de recherche, nous allons tout d'abord discuter du contexte pédagogique et de son influence sur les perceptions des étudiant·es. Ensuite, nous aborderons les rôles des maquettes physiques, de travail comme de présentation. Enfin, les rôles des modèles numériques seront abordés, ainsi que leurs enjeux propres.

### **6.1.1 Influence du cadre pédagogique**

Notre étude portant sur des étudiant·es, il est naturel de questionner l'influence du cadre pédagogique sur les résultats obtenus. En comparant les résultats du questionnaire des étudiant·es de L'ULiège, entre les étudiant·es de troisième bachelier, première master et deuxième master, un **effet de cohorte** très important apparaît. Les étudiant·es ayant suivi l'Atelier IV (Master 1) reconnaissent un rôle central des maquettes physiques dans la conception, tandis que les étudiant·es de troisième bachelier et de Master 2 sont beaucoup moins affirmatifs. Selon eux·elles, la maquette n'est même pas indispensable à la présentation du projet. Pourtant, les étudiant·es de Master 2 ont suivi l'Atelier IV l'année précédente. Notons toutefois que le programme de l'atelier a été modifié depuis : les maquettes de travail ont été rendues obligatoires par l'équipe encadrante. Ce changement semble avoir considérablement amélioré la perception des maquettes chez les étudiant·es de première master. La perception des étudiant·es de master 2 conforte les résultats de Monaco (2023). Il est cependant étonnant d'observer que les étudiant·es de troisième bachelier accordent si peu de crédit aux maquettes physiques, d'autant plus que la moitié de la classe est composée de passerelles, qui suivent l'ensemble des cours d'architecture sur une année. Ces personnes suivent donc en même temps les ateliers de conception des premières années, on aurait donc pu s'attendre à une meilleure perception des maquettes physiques de leur part. Comme nous le verrons plus tard, ce constat appelle à une culture du projet par la maquette de travail, dès les premières années et renforcé au cours du parcours d'apprentissage, non seulement dans un contexte de conception, mais aussi par l'apprentissage d'un savoir-faire manuel (Mahy, 2020). Dans les chapitres suivants, nous nous baserons donc la discussion portant sur les maquettes physiques de travail sur les résultats obtenus auprès des étudiant·es de première master.

### 6.1.2 Quels rôles pour les maquettes physiques ?

Tous les groupes interrogés lors des entretiens (Master 1 de l'ULiège) ont réalisé une ou plusieurs maquette(s) de travail. Quels sont les rôles joués par ces artefacts ?

#### **Les maquettes de travail, véritables outils de co-conception.**

Lors des entretiens, le **rôle médiateur** de la maquette de travail est apparu central, allant dans le sens de la seconde hypothèse de recherche, qui était : « *Les maquettes physiques permettent une meilleure interaction entre les différents acteurs (concepteurs-concepteurs ou concepteurs-encadrants) grâce à une meilleure perception de l'objet tridimensionnel qu'à travers les écrans, par leur dimension physique « saisissable » (Fairchild et al., 2021; Snow et al., 2014) »*. La maquette permet de soutenir les discussions entre les membres du groupe, mais aussi avec l'équipe encadrante. Les revues se passent autour de la maquette de travail, insérée dans la maquette de site. À première vue, la maquette de site représentant le contexte particulier du projet semble être l'un des avantages principaux poussant les étudiant-es à réaliser une maquette. Le projet est évalué par le groupe dans son insertion à l'existant, et pas comme un objet détaché et isolé, faisant écho à la thèse de Boudon et al. (1994) que la perception de la maquette précède la perception du projet construit. Les étudiant-es disposaient également d'une version numérique de la maquette de site. Pourtant, iels ne l'ont pas autant utilisée que son pendant physique. On peut alors s'interroger sur cette **différence apparente d'usage entre l'insertion de la maquette physique dans son contexte**, qui est tant mise en avant par les étudiant-es, et **l'absence d'utilisation du contexte numérique pour leurs modèles numériques**. Cela est peut-être à mettre en relation avec la dimension de la saisissabilité expliquée dans le Chapitre 0, permettant aux groupes de conception de saisir la spatialité du projet de manière plus immédiate en maquette physique, tandis que le contexte numérique alourdit le modèle sans permettre de saisir cette spatialité.

Lorsqu'un-e des concepteur-rices souhaite exprimer une idée avec une maquette de travail, tout le monde pourra se représenter de quelle partie du projet il s'agit : « *en maquette, on sait localiser facilement* » (ITW2). De plus, les maquettes de travail physique en mousse PU sont très **simples à modifier** : en quelques minutes, une toute nouvelle maquette peut être produite, que ce soit à partir de matériau brut ou en coupant dans une version précédente. Ainsi, iels peuvent comparer plusieurs itérations très simplement, ce qui est la véritable puissance de l'artefact pour plusieurs auteur-rices (Estévez, 2014; Jones, 1986; Yaneva, 2013). Pour les étudiant-es, c'est bien cette caractéristique qui permet aux maquettes de participer à la conception du projet : « *Pour qu'une maquette serve à la conception, il faut qu'elle soit sommaire. Rapide* » (ITW3).

Les maquettes de travail permettent également de tester les ombres portées du bâtiment sur lui-même ainsi que sur le contexte. C'est pourtant une fonctionnalité disponible dans les logiciels utilisés par les étudiant-es, mais aucun des groupes n'a mentionné avoir testé les ombres portées avec le modèle numérique. Cela indique peut-être que projeter soi-même les ombres avec son téléphone offre une valeur supplémentaire, peut-être par **l'aspect ludique** et immédiat, au contraire des logiciels, qui demandent de paramétrer le soleil selon de véritables angles, dates et heures. Là où les logiciels offrent de la précision, les étudiant-es semblent valoriser davantage l'immédiateté et l'interactivité qu'offre l'espace physique.

## Les maquettes de présentation : simples vitrines du projet ?

Les maquettes de présentation qui sont produites pour le jury final ont manifestement un **rôle « marketing »** : « *une maquette qui claque et qui a pris deux trois jours à être faite, ça va vraiment être vendeur* » (ITW2). Ce résultat est aussi corroboré par l'observation faite par Kuppens (2020) lors d'une exposition, où c'est la maquette physique présente qui a suscité le plus d'intérêt du public. La maquette est donc pleinement un outil de communication du projet, confirmant ainsi la quatrième hypothèse de recherche (« *Les maquettes physiques sont essentielles pour communiquer le projet à des tiers naïfs de l'architecture (Kuppens, 2020)* »). Sont-elles alors de simples vitrines pour le projet, ne servant qu'à le « vendre » ?

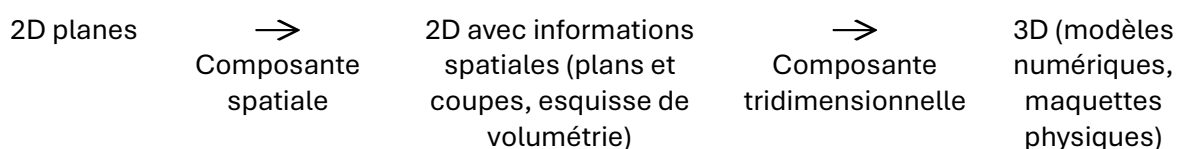
Les maquettes physiques, de travail comme de présentation, sont des objets tridimensionnels, au sens où l'on peut tourner autour, les saisir, les observer en se déplaçant physiquement dans l'espace. Cela peut sembler anodin : ne peut-on pas faire de même avec un modèle numérique en changeant de point de vue ? Lors des entretiens, il est apparu que le projet est perçu différemment selon le support : lorsqu'il constitue un modèle numérique projeté sur écran d'ordinateur ou lorsqu'il est une maquette physique, conformément aux articles présentés à la section 2.1.3. Les étudiant-es rapportent en effet une perception différente de leur projet lorsqu'ils ont terminé de réaliser la maquette physique de présentation de leur projet : « *J'avoue que moi j'ai plus kiffé notre maquette une fois qu'elle était finie que quand elle était juste numérique* » (ITW6). Pourtant, le projet reste le même, et les étudiant-es ont passé plusieurs heures à le modéliser dans les moindres détails. Ils *connaissent* donc très bien leur projet, sous forme du modèle numérique. Pourtant, lorsqu'ils le représentent en maquette pour le jury, ils le *redécouvrent* autrement. Certains groupes identifient les personnages à l'échelle, végétations et autres détails ajoutés comme des éléments centraux de cette perception. Cette différence de perception du projet pourrait-elle offrir de nouvelles opportunités pour la conception ?

Tout d'abord, cette redécouverte du projet au travers de l'artefact est l'un des trois mécanismes de raisonnement de l'idéation (Baudoux, 2023). Il semble donc que ce constat va dans le sens d'une génération de nouvelles solutions. Pourtant, les maquettes de présentation n'ont pas servi à la conception des projets, et cela pour deux raisons. Tout d'abord, les maquettes de présentation ont été réalisées pendant les semaines précédant le jury. Les étudiant-es n'avaient plus le loisir de modifier leurs projets ; il s'agissait de produire les documents demandés et de terminer le projet. La maquette ne *pouvait* donc pas influencer les projets. Ensuite, les étudiant-es ont pointé que pour qu'une maquette participe véritablement à la conception du projet, elle devait être *modifiable*. C'est-à-dire, pouvoir être altérée par les échanges entre les concepteur-rices. Or, les maquettes de présentation ont toutes été réalisées en impression 3D. Les étudiant-es mettent en avant que ces maquettes ont un aspect « figé ». Elles ne peuvent pas être modifiées à souhait, et sont dans un état fixe, qui impose de les recommencer si le projet devait être modifié. Ces maquettes n'ont pas participé aux itérations du projet. Ce constat sera développé plus en détails dans la section 6.2.2 consacrée au continuum conception-fabrication.

## Les maquettes physiques : dépasser la perception plane par la tridimensionnalité physique

Comme nous venons de le discuter, les maquettes de présentation ont permis d'identifier une différence de perception interne entre une représentation plane d'un objet tridimensionnel et un objet tridimensionnel dans l'espace, confirmant la seconde hypothèse de recherche (« *Les maquettes physiques permettent une meilleure interaction entre les différents acteurs (concepteurs-concepteurs ou concepteurs-encadrants) grâce à une meilleure perception de*

*l'objet tridimensionnel qu'à travers les écrans, par leur dimension physique « saisissable » (Fairchild et al., 2021; Snow et al., 2014) »* et corroborant les résultats issus des sciences psychologiques (Fairchild et al., 2021; Korisky & Mudrik, 2021; Snow et al., 2014; Snow & Culham, 2021). Cette différence de perception existe aussi avec les maquettes de travail. Les témoignages corroborent cette intuition : *« On a beau essayer de faire des perspectives en 2D, au bout d'un moment faut se rendre compte comment ça fonctionne en 3D »* (ITW6) ; de même que la devise des enseignant·es de l'architecture dans les premières années *« faites des coupes ! »*. De nombreux groupes **commencent la conception par un travail en plans**. Cela a forcément une incidence non négligeable sur les projets, puisque ce sont des représentations externes planes, sans intégration de la composante spatiale, puisque **très peu de groupes envisagent des coupes** ou des volumétries dans leurs premières idées. En effet, la perception de l'espace tridimensionnel à partir du plan n'est pas évidente ni immédiate, preuve en est ce témoignage : *« La première fois qu'on a fait la maquette, moi je me disais mais en fait je ne savais pas que ça ressemblait à ça »* (ITW4). Selon Joachim (2016) ces documents 2D plans ne peuvent faire état de la troisième dimension d'un projet. Le groupe n°6 illustre ces propos : l'une de leurs premières idées était un schéma en volumétrie du projet, une représentation externe plane mais intégrant donc la composante spatiale. C'est un pas en avant vers la tridimensionnalité par rapport au travail avec des représentations planes uniquement. Se pose la question de savoir si ce pas est suffisant pour atteindre une vraie compréhension du projet dans l'espace. Pourtant, voici ce qu'ils déclarent lorsqu'ils réalisent leur maquette physique de travail : *« Et c'est là qu'on s'est rendu compte que ce n'était vraiment pas ce à quoi on s'attendait »* (ITW6). C'est un nouvel indice que la perception d'un objet physique tridimensionnel dans l'espace est différente d'une représentation plane, même contenant des informations spatiales. Ces résultats sont confirmés par les recherches en psychologie, qui démontrent un avantage des objets physiques par rapport aux représentations planes, surtout pour les objets que l'on peut manipuler et toucher (Fairchild et al., 2021; Korisky & Mudrik, 2021; Snow et al., 2014; Snow & Culham, 2021). Cela fait également écho à l'aspect « sensoriel » des maquettes, mis en avant par différents auteur·rices (Boudon et al., 1994; Cristia et al., 2018; Mahy, 2020).



Une ouverture est possible vers les outils de réalité virtuelle et augmentée. Si la perception de la représentation externe dépend du support de matérialisation, qu'en est-il des modèles numériques que l'on peut explorer en réalité virtuelle, ou en réalité augmentée ? Les outils de VR/AR sont définis par Vilar et al. (2022, p. 9) comme *« a way of transporting a person to a digital reality in which he/she is not physically present but feels like he/she is »*. Ces outils donnent un sentiment de *présence* aux personnes, comme dans un environnement physique. Les concepteur·rices peuvent tourner autour des objets projetés, engager le mouvement de leurs corps dans l'action. Cela serait-il néanmoins suffisant pour déclencher les réseaux neuronaux similairement à un objet « saisissable » ?

## Limites des maquettes physiques

Les maquettes physiques de travail ne sont pas pour autant des outils parfaits. Pendant les entretiens, les étudiant-es ont identifié plusieurs limites à ces outils. Premièrement, pour 2 groupes, la maquette ne permettait pas de « *se projeter au niveau piéton* », à hauteur humaine « *je trouve que ce n'est pas pratique de se projeter dedans* » (ITW2). Pour ces étudiant-es, il était plus facile d'utiliser un modèle numérique. Cela semble donc enrichir la proposition de Boudon et al. (1994), qui était que la perception visuelle de la maquette, ici du modèle numérique, précède la perception du projet. Une deuxième limite pointée par les étudiant-es est le niveau d'abstraction des maquettes de travail, qui peut parfois être trop élevé (« *je trouve que cette petite maquette de conception, elles ont quand même vite leurs limites dans le sens où tu colles 10 000 trucs, tu te dis ouais ça va, c'est bon. Et puis quand tu essayes de remettre ça à l'échelle sur un logiciel, bah on se rend compte que ça marche moins bien quoi* », ITW4). Cela peut s'expliquer par l'échelle de la maquette de travail. Les étudiant-es travaillaient au 1/250e afin de s'insérer dans la maquette de site. Peut-être que pour des perspectives à hauteur humaine et un niveau d'abstraction moins élevé, des maquettes à une plus grande échelle auraient été bienvenues, par exemple au 1/100e ou 1/50e.

### 6.1.3 Quels rôles pour les modèles numériques ?

Tous les groupes étudiés ont réalisé des modèles numériques de leur projet. Quels sont les rôles joués par ces modèles ?

#### Maquettes physiques et modèles numériques : des jumeaux complémentaires

Presque tous les groupes (2, 3, 4 et 5) font des itérations en volumétrie, à la fois avec des maquettes physiques et des modèles numériques. Ce comportement démontre des avantages et inconvénients propres à chaque outil, et montre aussi que **la combinaison des deux outils semble être la meilleure stratégie**, confirmant la première hypothèse de recherche (« *Les deux sont nécessaires, aussi bien des maquettes physiques de travail que des modèles numériques, à chacun son rôle, et c'est la combinaison des deux environnements qui offre les meilleures solutions (Ibrahim & Pour Rahimian, 2010)* »). Ces itérations semblent fonctionner selon la même structure entre tous les groupes, en deux phases principales. Dans un premier temps, les étudiant-es sont en session de travail, tous ensemble, autour de leur maquette de travail. Iels la modifient, testent plusieurs versions, l'insèrent dans le site. Lorsqu'une solution est trouvée collectivement, les étudiant-es passent à la seconde étape de l'itération. Iels modélisent leur maquette dans un environnement numérique. Ce résultat fait écho à ceux de Ibrahim & Pour Rahimian (2010) où ce sont les étudiant-es qui combinent numérique et physique qui obtiennent les meilleures performances, de même que les résultats de Elsen (2011). Les étudiant-es justifient le recours aux modèles numériques pour plusieurs raisons. La question de l'échelle revient régulièrement dans les discussions : les modèles numériques sont à l'échelle, au sens où chaque élément possède une dimension. Ils permettent ainsi de vérifier que la volumétrie proposée par la maquette de travail est « *faissable* ». Cet aspect de « *vraie échelle* » du projet implique aussi que les étudiant-es préfèrent les modèles numériques pour la production de vues « à hauteur humaine » (groupe 2 et 5). Il leur est plus aisé de se représenter l'ambiance créée par les volumes plutôt que sur la maquette de travail. Pourtant, il est intéressant de constater qu'avec la maquette de présentation finale, la dynamique s'inverse pour les groupes 5 et 6, qui

reconnaissent préférer leur projet dans la maquette de communication plutôt qu'avec le modèle numérique. Pour le groupe 5, ce sont l'ajout d'éléments à l'échelle, comme des personnages, qui leur ont permis d'apprécier pleinement la dimension des éléments par rapport à leurs modèles numériques. Le constat est le même dans le groupe 5, après l'ajout de personnages, de végétation et de lumières.

D'après ces résultats, pour qu'un modèle, qu'il soit numérique ou physique, participe à la perception de la proportion des espaces, il faut que ce dernier comporte ces deux caractéristiques :

- Contenir les espaces aux vraies dimensions de l'objet projeté, avec suffisamment de précision ;
- Offrir des points de comparaison visuels rapides par rapport à l'échelle humaine (personnages, végétation) qui serviront de points d'ancrage pour la perception visuelle.

Un dernier point intéressant à relever est le groupe 6, le seul groupe n'ayant pas mis en place ce travail entre outils physiques et outils numériques. Même s'ils arrivent à une solution de qualité équivalente aux autres groupes, il est frappant de noter que c'est après une remise en question du projet au pré-jury que les étudiant-es vont alors rattraper leur retard, au moyen de maquettes physiques et d'outils numériques. Ce manquement en début de conception s'est transformé en une « dette » que les étudiant-es ont dû payer au pré-jury. Cela semble confirmer de nouveau la première hypothèse de recherche, que les deux types d'outils offrent un avantage significatif lorsqu'ils fonctionnent de pair.

### **Des logiciels pas tous égaux**

Lorsque le niveau de définition du projet augmente, les représentations externes gagnent en précision. Les logiciels les plus adaptés à la modélisation de ces artefacts changent. Par exemple, le groupe 2 est intéressant à cet égard. Au début du projet, ils utilisent le logiciel Rhino afin de modéliser la volumétrie de leur projet. Lorsque le projet évolue et devient plus « fixé », ils décident de passer au logiciel Revit. Ce choix est posé par les étudiant-es afin d'obtenir un modèle numérique précis de leur projet « *Revit, ça permet d'avoir tous les montants de fenêtres pour changer la matérialité et tout* », « *En fait on ne voulait pas passer trop vite sur Revit parce que c'est difficile à modifier, c'est plus long, ça va plus vite de déplacer une ligne sur rayon au début que de déplacer tout un mur sur Revit, surtout quand il y a des trucs qui s'attachent et tout et que ça commence à bouger d'autres choses* » (ITW2). Ce choix n'est pas anodin : les étudiant-es viennent de changer de catégorie d'outil. Ils viennent de passer d'un outil de modélisation volumétrique à un outil de modélisation sémantique BIM.

Ce changement de catégorie d'artefact de conception reflète les qualités intrinsèques aux outils utilisés pour créer ces artefacts. Les logiciels de modélisation volumétriques permettent de gérer des modèles moins détaillés, mais offrent une plus grande liberté formelle. Les logiciels de modélisation numérique sémantique offrent plus de précision, mais les modèles sont aussi plus difficilement modifiables selon les étudiant-es. Chaque élément pouvant être très détaillé, ce sont autant d'efforts qui doivent être déployés pour les adapter aux changements rapides d'un projet d'architecture en début de conception. De manière générale, les logiciels sont plus lents qu'une maquette de travail pour tous les groupes. Lorsque le projet est plus défini, ce niveau de détails élevé permet au contraire de valider la cohérence géométrique tridimensionnelle du projet. La question du niveau de détails de l'artefact semble donc centrale à la définition des

artefacts, à leur spécification (Baudoux, 2023). Cela fait écho à la troisième hypothèse de recherche (« *Les maquettes physiques de travail favorisent la créativité et l'innovation par rapport aux modèles numériques* »), qui serait à reformuler à la lumière de ces résultats, dans la mesure où les modèles numériques de type sémantique sont moins facilement modifiables, ils sont moins porteurs de cette dimension plastique chère à Lebahar (1983).

Une question reste ouverte : celle de savoir si ce changement de catégorie d'outil ne pourrait pas être aussi expliqué par un manque d'expertise dans les logiciels utilisés. En effet, le logiciel Revit, cité plus haut, permet aussi de modéliser des formes géométriques simples, d'une manière similaire à ce que font les étudiant-es avec Rhino. Peut-être que les étudiant-es n'ont pas connaissance de ces fonctionnalités, ou bien que celles-ci sont moins pratiques que ce que proposent les logiciels de dessin volumétrique.

Ce changement d'outil est visible chez tous les groupes étudiés, sauf le groupe n°4. Ce groupe est le seul groupe à avoir utilisé un modèle sémantique de type BIM dès la phase de recherche de volumétrie et d'intentions architecturales, en commençant par un modèle peu détaillé. Peut-on dire pour autant que les modèles sémantiques BIM n'encouragent pas la créativité et l'innovation ? Le groupe n'a pas reçu de note inférieure aux autres groupes, et leur projet n'est pas moins bien, moins performant ou moins intéressant. Si on compare ce groupe avec le groupe n°6, le seul groupe à avoir défini sa volumétrie avec une maquette physique, on ne peut pas en conclure à une innovation moindre dans le groupe n°4. Ce groupe sera abordé plus en détails dans une prochaine section.

## 6.2 POURQUOI LA MAQUETTE PHYSIQUE DE TRAVAIL EST-ELLE MOINS UTILISÉE PAR LES ÉTUDIANT·ES EN CONCEPTION ARCHITECTURALE ? POURQUOI SE LIMITER À DES MAQUETTES DE COMMUNICATION ? COMMENT ENCOURAGER UN RETOUR À LA MATÉRIALITÉ ?

À la lumière des résultats présentés récemment, nous répondrons à cette question de recherche sous trois grands axes. Tout d'abord, nous discuterons de l'impact de l'omniprésence des maquettes de communication sur les maquettes de travail. Ensuite, nous aborderons la question de la fabrication numérique et si elle peut ou non encourager un retour à la matérialité.

### 6.2.1 La maquette de jury a-t-elle tué la maquette de conception ?

Dans le cadre de l'Atelier IV, comme souligné dans la section 5.1.2, l'équipe encadrante a demandé aux étudiant·es d'utiliser des maquettes de travail dans leur processus de conception du projet. Les réactions des étudiant·es montrent que ce n'est pas une habitude pour eux·elles, malgré qu'ils soient en première année de master. Heureusement, cette contrainte imposée s'est rapidement transformée en un véritable atout pour les étudiant·es (« *vraiment la maquette a quand même été utile niveau conception, et pas juste parce que les profs nous en demandent* », [ITW6]), « *Ce n'est pas qu'un outil de rendu. Vraiment pas* », [ITW3]). Il semble donc qu'il existe une **certaine résistance à produire des maquettes**. Au départ, ils manquent de motivation pour s'y mettre, peut-être **car les étudiant·es réalisent plus souvent des maquettes de présentation que des maquettes de conception**. Les maquettes de présentation demandent beaucoup de temps et de soin par rapport aux maquettes de travail. Vis-à-vis de l'hypothèse de recherche n°1, qui était pour rappel que « *La production d'une maquette physique de communication requiert plus de ressources cognitives que celle d'un modèle numérique.* », les questionnaires n'ont pas pu montrer spécifiquement que les maquettes de présentation utilisent plus de ressources cognitives. Ce biais de perception négative du temps requis par les maquettes peut être observé chez les étudiant·es de l'Atelier V (Master 2), avec une majorité des répondant·es considérant ces outils comme trop chronophages. Or, les étudiant·es de l'Atelier IV montrent un résultat opposé : seul·es 27% d'entre eux pensent que la maquette est un outil trop chronophage. **Il semble donc que la contrainte imposée aux étudiant·es leur a permis de redécouvrir les maquettes de travail**, ce qui a baissé leur perception du coût en termes de temps d'une maquette et encouragé un retour à la matérialité. L'hypothèse de recherche n°2, qui était pour rappel « *Le retour à la matérialité peut avoir lieu grâce à l'emploi de maquettes physiques de travail manuelles et grâce au continuum conception-fabrication.* » peut donc être partiellement confirmée à ce stade. Au départ, la demande pédagogique de produire des maquettes était une motivation *extrinsèque* à la tâche. Mais une fois que les étudiant·es se sont lancé·es dans la tâche, il semble qu'elle se soit transformée en une motivation *intrinsèque* : « *Je crois que c'est un des premiers ateliers où la maquette en PU a vraiment été utile, on s'est rendu compte de la puissance du truc* » (ITW6). Il est vraisemblable que ces étudiant·es ont une plus grande chance de produire des maquettes de travail lors de leurs prochaines activités de conception, puisqu'ils ont internalisé l'intérêt que procurent les maquettes physiques.

Ce résultat est aussi à mettre en parallèle avec les résultats de l'enquête menée par Monaco (2023) auprès des étudiant·es en architecture, montrant que les maquettes physiques sont



moins appréciées au fil des années d'étude. Ce constat pose la question de la **culture de la maquette**, qui serait à enseigner tout au long de la formation, surtout au moyen de maquettes de travail rapides à produire. Cela permettrait de rappeler aux étudiant-es tous les bienfaits des maquettes physiques, afin d'éviter le biais de perception abordé plus tôt. De même, Mahy (2020) met en avant que le manque de pratique de la maquette physique mène aussi à une vision plus négative de celle-ci, renforçant l'appel à une culture pédagogique du projet par la maquette.

## 6.2.2 Encourager un retour à la matérialité par la fabrication numérique ?

### La fabrication numérique largement reconnue...

Un premier résultat est que les machines de fabrication numérique sont devenues des outils indispensables aux étudiant-es en architecture. Selon le questionnaire, elles permettent un gain de temps pour les trois quarts des répondant-es. Lors des entretiens également, les étudiant-es considèrent les outils de fabrication numérique comme de véritables aides à la réalisation des maquettes. Certains étudiant-es soulignent que les maquettes sont très propres, rapides, et que les machines peuvent gérer des courbes (groupe n°5). Les machines ne font pas d'erreurs, et sont capables de toujours réaliser précisément le même geste. D'autres, en revanche, expriment que les maquettes réalisées par impression 3D ont peu de charme et qu'elles « *manquent de sensibilité* » par rapport aux maquettes manuelles. Peut-être est-ce ici l'aspect « artisanal » que peuvent incarner les maquettes, ce que Estévez (2014) regroupe sous les « *traces* » des opérations qui ont permis de les réaliser (Estévez, 2014) qui sont ici absentes, le processus étant réalisé en une opération continue. Néanmoins, les machines semblent limitées à la présentation du projet. Peu des répondant-es les considèrent comme indispensables à la conception. Certaines limites sont récurrentes : la difficulté d'accès ou le coût de ces outils.

### ... sans mise en place d'un continuum conception-fabrication.

Les résultats montrent que bien que la technologie de fabrication à commande numérique soit largement utilisée et produise de bons résultats, le continuum conception-fabrication n'est pas si simple à mettre en œuvre. En effet, aucun groupe interviewé de l'Atelier IV n'y a eu recours pour matérialiser leurs modèles numériques. Concernant le cours de MAN, si la moitié des étudiant-es ont indiqué avoir utilisé (ou exporté) directement leur modèle numérique pour l'impression 3D ou la découpe laser sans aucunes modifications supplémentaires, ces résultats ne sont pas exploitables. En effet, j'occupe le poste d'étudiant moniteur pour ce cours, et j'ai pu constater qu'aucun des groupes n'avait réussi à exporter directement leur modèle pour la fabrication. Les tentatives se soldaient toujours par un échec, que ce soit au moment du *slicing*<sup>3</sup> ou lors de l'impression (exemple : parois d'épaisseur nulle ou encore trous dans la géométrie). Les étudiant-es ont dû réaliser des étapes supplémentaires, il semble donc que la formulation de la question n'ait pas permis d'identifier cette nuance. Quelles sont les raisons qui expliquent cette absence de continuum chez les étudiant-es ?

---

<sup>3</sup> Étape précédant l'impression ; le modèle numérique est *découpé* en couches de matières à déposer dans un logiciel dédié (un *slicer* tel que *PrusaSlicer*).

L'une des premières raisons ayant limité les étudiant-es est **l'intégration des contraintes de fabrication dans leurs environnements numériques**. La majorité des groupes des entretiens ont créé un nouveau modèle numérique *de fabrication*, souvent dans SketchUp. Seul un groupe des entretiens se rapproche d'un continuum, avec l'exportation de leur modèle numérique Revit comme base pour l'impression. Cependant, ils ont dû nettoyer et simplifier ce modèle dans SketchUp, de nouveau, avant de l'imprimer (groupe n°6). Cela fait écho à la thèse de Mansouri (2026), qui est que c'est par la connaissance fine de la géométrie que se débloquent le potentiel du continuum conception fabrication.

Pour le cas de l'impression 3D, les contraintes de fabrication revenant le plus dans les entretiens sont la taille du plateau (groupe 6), la hauteur de couche et le diamètre de la buse. En effet, la taille du plateau d'impression, assez limitée, impose de redécouper le modèle en plusieurs parties distinctes. Le Fab52 dispose d'une imprimante avec un plateau plus grand, une PrusaXL, mais les étudiant-es ne pouvaient pas monopoliser cette machine sans créer une injustice vis-à-vis des autres groupes. Au-delà de cela, pour être efficacement imprimée, la maquette demande d'être segmentée de sorte à utiliser le moins de matière possible pour des opérations de remplissage ou de support. Ensuite, la hauteur de couche minimale ainsi que le diamètre des buses ont une incidence sur le niveau de détail qui peut être représenté. Dans leurs modèles numériques, les étudiant-es ont souvent trop de détails, un aspect qui revient aussi chez les étudiant-es de troisième bachelier. Ce sont toutes ces raisons qui poussent les étudiant-es à recommencer la modélisation du projet dans un logiciel volumétrique, souvent dans SketchUp. Les étudiant-es de MAN offrent un éclairage très particulier : la fabrication est reconnue comme plutôt facile, tandis que la modélisation numérique est considérée comme plutôt complexe. La transition entre modélisation et fabrication est, elle aussi, difficile. Il est intéressant de noter que dans leur formation, les étudiant-es de master avaient été formés à l'impression 3D dans le cours de MAN sur le logiciel Rhino. Pourtant, l'ensemble des groupes de Master 1 ont préféré utiliser SketchUp. Deux hypothèses pourraient expliquer ce choix selon nous : la disponibilité du logiciel (versions avec licences, versions pirates) et la facilité d'utilisation du logiciel. Parmi les 15 répondant-es au sondage pour le cours de MAN et donc disposant de licences pour le logiciel Rhino, 4 ont également utilisé le logiciel SketchUp, suggérant que la disponibilité des licences seule n'est pas une hypothèse suffisante. La relative difficulté de la modélisation numérique est un indice allant dans le sens que l'apprentissage du logiciel s'est révélé peut-être trop complexe pour ces étudiant-es.

Concernant la découpe laser, la plupart des groupes d'atelier IV ont redessiné les éléments à découper dans un logiciel de dessin 2D (Rayon ou AutoCAD). Le groupe n°4 est intéressant à cet égard. Ils ont réalisé leur maquette avec de la découpe laser, en dessinant les panneaux de façade dans AutoCAD. Ils n'ont pas exploité leurs façades Revit, pourtant abouties. Mais toutes leurs façades n'ont pas été réalisées à la découpe laser. En effet, selon les étudiant-es, il aurait été trop long de tout dessiner dans AutoCAD. Ils ont donc fabriqué la partie restante à la main. Cela démontre au moins que le dessin 2D à partir du modèle numérique n'est **ni intuitif ni rapide**, au contraire du travail manuel. Ce constat nous permet d'enrichir l'hypothèse n°1 : lorsque le modèle est trop détaillé, il est plus intéressant de le réaliser avec des machines à commande numérique. En revanche, quand le modèle est plus simple, il est plus aisé de le réaliser manuellement. Cela montre que la charge cognitive liée à la matérialisation d'un modèle numérique va dépendre du niveau de détails attendu. Ce résultat peut être représenté par la Figure 100 dans le cas de la découpe laser. Il existerait donc un optimum entre le niveau de détails attendu d'une maquette, le temps requis à sa production et les outils utilisés.

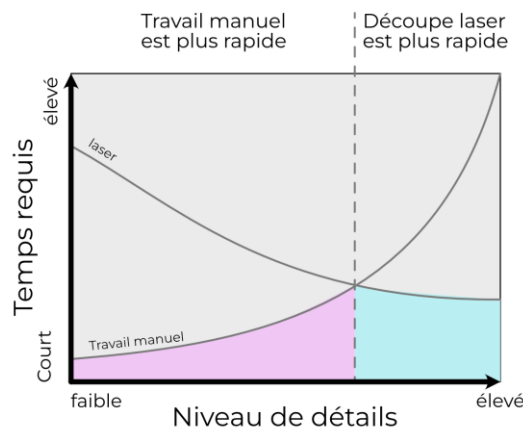


Figure 100 – Quel optimum entre le niveau de détail et le temps imparti dans la création d'une maquette ?

Une seconde limite aux modèles imprimés en 3D par procédés FDM est leur **aspect « figé »**. Pendant les interviews, les étudiant-es soulignent que leurs maquettes de travail doivent être **modulables** « *Ce qui est important avec la maquette, c'est la modularité* » (ITW3). Or, les maquettes volumétriques produites par l'impression 3D ne remplissent pas ce critère. Elles peuvent uniquement s'en rapprocher en étant réalisées en plusieurs morceaux, morceaux que l'on pourrait alors décrocher et remplacer. Mais même avec cette solution, on n'est pas encore du tout à l'aspect presque « fluide » des maquettes de travail en mousse PU, où tout élément peut être redécoupé selon l'envie. Les éléments découpés au laser se rapprochent plus d'éléments que l'on pourrait faire à la main. C'est d'ailleurs la machine revenant le plus souvent dans le questionnaire, étant utilisée par presque tous.tes les répondant-es. On pourrait se dire que ces éléments sont à priori simple à modifier, autant que des éléments de carton découpés à la main. Pourtant, comme vu précédemment, il existe un optimum entre le niveau de détail et le temps requis. La flexibilité n'est donc pas suffisante pour garantir une adoption par les étudiant-es. Le questionnaire montre aussi clairement ces réserves exprimées par les étudiant-es, avec seulement 10% des étudiant-es considérant que les machines de fabrication numérique sont indispensables à la conception du projet.

Une troisième limite au continuum est le sentiment ressenti chez certain-es que **le modèle numérique est suffisant**, et que se lancer dans la réalisation d'un modèle physique serait une perte de temps. Ce sont ainsi 22% des répondant-es qui le pensent. Dans les interviews, les étudiant-es ont indiqué que les modèles physiques n'étaient « *plus nécessaires* » une fois qu'un certain niveau de définition a été atteint (« *le fait de passer à l'ordi et de modéliser, on se rend compte déjà des problèmes sans avoir besoin d'imprimer le modèle qu'on a fait* », ITW3). Ce sentiment, exprimé dans le groupe n°3, est sans doute à mettre en lien avec leur procédé de conception. Iels sont débuté la recherche de volumétrie à l'aide aussi bien de maquettes de travail que d'un modèle numérique SketchUp. C'est cette volumétrie ainsi trouvée qui a défini leurs plans et modèle numérique. Il semblerait donc qu'une fois leur volumétrie fixée, à la fois en maquette et dans SketchUp, iels n'aient plus eu besoin d'y revenir, justifiant sans doute l'absence de maquettes dans les phases ultérieures du projet. Cette constatation est tout de même à nuancer dans le cas de volumétries qui seraient trop complexes à réaliser à la main (par exemple, des projets issus de la conception computationnelle). Dès lors, il semblerait que lorsque la volumétrie a été fixée, que ce soit numériquement ou physiquement pourvu qu'elle fonctionne, les étudiant-es ne voient pas d'intérêt suffisant à revenir à un modèle physique.

## Quelles caractéristiques pour les maquettes issues du continuum conception fabrication ?

Il est intéressant d'étudier les maquettes physiques produites par les étudiant-es au prisme de leur niveau de définition. On constate que les étudiant-es ont eu recours à deux catégories de maquettes : **des maquettes de travail**, très rapides à produire et présentant un faible niveau de détail, et **des maquettes de jury**, très détaillées et longues à produire. Seules les premières ont participé à la conception du projet. Si l'on souhaite introduire un modèle physique dans les phases plus avancées par un continuum conception-fabrication, il faudrait offrir un niveau de détail plus élevé que les maquettes de travail à la main, tout en garantissant une modularité suffisante pour que les étudiant-es puissent les utiliser comme outils de conception. Actuellement, mettre en place un continuum demande beaucoup de temps, en plus de demander une connaissance pointue des logiciels. L'investissement en temps est équivalent, voire supérieur aux modèles de jury.

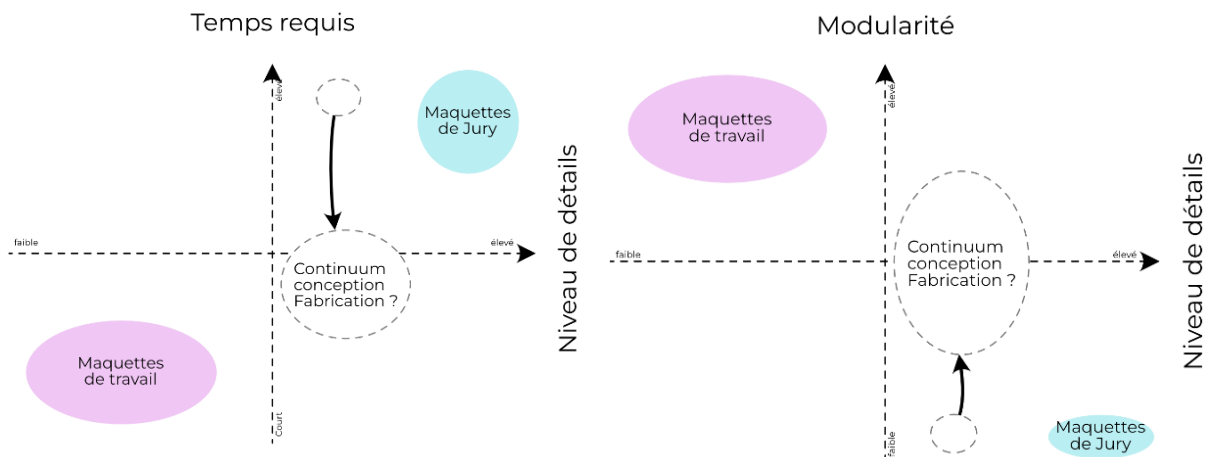


Figure 101 – Quelles caractéristiques pour les modèles issus du prototypage rapide ?

Le continuum conception-fabrication doit donc avoir lieu à l'échelle du prototype, en intégrant les contraintes de fabrication directement dans les modèles numériques pour éviter que les étudiant-es doivent les intégrer dans un second temps. Cette intégration permettrait d'éviter de modéliser un modèle numérique dédié à la fabrication. On peut penser aux développements relativement récents de Rhino.Inside, un plugin permettant notamment d'automatiser la création de modèles énergétiques à partir de modèles BIM. Poursuivre ces développements permettrait peut-être d'automatiser la création de modèles de fabrication à partir de modèles BIM ? L'hypothèse de recherche n°2 doit donc être reformulée : le continuum conception-fabrication ne peut pas, à lui seul, encourager un retour à la matérialité dans l'état actuel des solutions logicielles. Intégrer la modularité aux modèles semble en revanche un défi plus important encore. Comment rendre « modifiable » un matériau solide comme le plastique PLA tel qu'utilisé par les imprimantes 3D ? Une piste de solution pourrait être de remplacer ce matériau. Les développements récents des imprimantes à argile pourraient ainsi fournir des matériaux malléables à souhait, permettant peut-être de renouer avec la *plastique* des artefacts.

### 6.3 QUELLE EST LA CHARGE COGNITIVE DES ÉTUDIANT·ES LORS DU PROCESSUS DE CONCEPTION ? CETTE CHARGE POURRAIT-ELLE ÊTRE DIMINUÉE À L'AIDE DES MAQUETTES PHYSIQUES DE TRAVAIL ET DU CONTINUUM CONCEPTION-FABRICATION À L'ÉCHELLE DE LA MAQUETTE PHYSIQUE ?

Pour répondre à notre troisième question de recherche, nous allons tout d'abord nous intéresser à la charge cognitive des étudiant·es pendant le processus de conception, avec l'étude de cas particuliers qui se sont présentés. Ensuite nous aborderons la matérialisation avec des maquettes de travail et comment celles-ci encouragent la créativité. Enfin, nous discuterons de la possibilité pour le continuum conception-fabrication de diminuer la charge cognitive.

#### 6.3.1 Charge cognitive pendant le processus de conception

Les résultats du questionnaire évaluant la charge cognitive montrent que bien que la charge cognitive soit élevée pendant le processus de conception, elle n'est pas maximale au début du projet, infirmant l'hypothèse de recherche n°1. Pour rappel, elle était la suivante : « *la charge cognitive est élevée durant le processus de conception, en particulier au début. Cela implique que les étudiant·es ne disposent pas de suffisamment de ressources cognitives au moment d'utiliser des maquettes de conception, expliquant leur faible usage* ». Au contraire, elle adopte deux profils d'évolution : une augmentation linéaire jusqu'au jury final et un « pic » lors d'un moment-clé du projet (voir Figure 102).

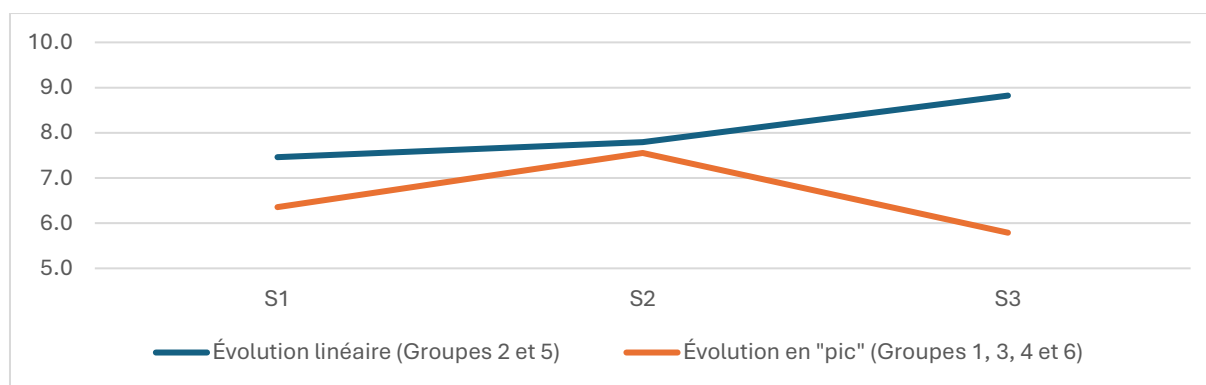


Figure 102 – Évolution de la charge cognitive totale pour les deux catégories de groupes

Les questionnaires proposés pendant les entretiens n'ont pas permis de mettre en avant de manière claire une charge cognitive différente selon le support utilisé. En effet, ce ne sont pas les phases où les étudiant·es travaillent en volumétrie avec des maquettes qui sont les plus chargées. Les entretiens ont montré qu'il n'existe pas d'opposition entre les différents types d'artefacts, mais plutôt des synergies entre les environnements numérique et physique. L'hypothèse de recherche n°2 ne peut pas être confirmée à ce stade. Pour rappel, elle était la suivante : « *La charge cognitive est différente selon l'artefact utilisé : un objet tangible demandera moins de ressources cognitives qu'une projection 2D pour atteindre un même niveau de compréhension spatiale (Snow et al., 2014)* ».

### **La charge cognitive en constante augmentation**

Le premier profil d'évolution de la charge cognitive correspond aux groupes 2 et 5, où elle augmente linéairement. Ces deux groupes ont un processus de conception très différent, avec une différence majeure. Là où le groupe n°2 ne rencontre pas de blocage particulier et avance linéairement pendant les 14 semaines de conception, le groupe n°5 rencontre un blocage en fin de projet. Pour le groupe n°2, la phase évaluée est le jury final. Cette forte charge cognitive est conforme à ce que l'on pourrait attendre d'un jury, qui demande de produire énormément de documents différents. Pour le groupe n°5, la dernière phase évaluée correspond à la remise en question du projet une semaine avant le jury.

### **La charge cognitive connaît un pic**

La seconde catégorie correspond aux groupes 1, 3, 4 et 6, où la charge cognitive atteint un « pic » avant de diminuer. Pour le groupe n°3, le pic correspond à un problème majeur rencontré lors de la semaine 10. La charge diminue avec la résolution de ce problème, et les étudiant-es se lancent alors dans la production des documents. Dans le groupe n°4, le pic de charge cognitive correspond au pré-jury. Dans ce groupe, les étudiant-es avaient complètement revu leur projet la semaine précédant le pré-jury, entraînant une grande quantité de travail, et sans doute beaucoup de stress quant à savoir si leur solution serait acceptée ou non. La phase d'évaluation de la charge cognitive postérieure a lieu lors de semaine 12, un moment où les étudiant-es terminent la conception et se lancent dans la production des livrables. Dans le groupe n°6, le pic correspond au pré-jury, qui se passe plutôt mal. On peut interpréter ce pic de charge cognitive comme un moment intense où de nombreux aspects du projet doivent être revus. Ces trois groupes voient une diminution de leur charge cognitive allant de pair avec l'arrêt de la phase de conception du projet. Il semble donc que, contrairement aux idées reçues, les *charrettes* d'avant jury ne soient pas nécessairement intenses en raison d'une grande charge cognitive, mais plutôt en raison d'une grande quantité de travail à produire.

### 6.3.2 Cas particuliers

#### Cas particulier : le groupe avec la charge cognitive la plus élevée

Le groupe n°5 présente une charge cognitive très élevée tout au long du processus, et est également le groupe qui ressent la plus grande charge cognitive, et ce dans toutes les dimensions, pendant tout le processus (Voir Figure 99). Comment l'expliquer ?

La première hypothèse serait d'envisager des différences individuelles chez les étudiant·es. On peut penser à une situation de vie compliquée, qui impacterait la perception de la charge de travail réelle. Cette hypothèse peut être écartée lorsque l'on compare les résultats des trois étudiant·es constituant le groupe. Les trois membres du groupe étaient globalement en accord sur les 3 phases. Si un·e étudiant·e avait une situation personnelle compliquée, ses résultats personnels se seraient démarqués des deux autres. Or, ce n'est pas le cas. De plus, aucune mention n'en a été faite en interview. **L'hypothèse d'une différence individuelle est donc selon nous à écarter.**

L'une des particularités de ce groupe est **l'utilisation déclarée<sup>4</sup> de l'intelligence artificielle**, exploitée à foison dès le début du projet. Il y a peut-être ici un lien à établir avec les résultats de recherches récents dans le domaine, notamment l'article de Liu et al (2026). Celui-ci montre que les personnes qui utilisent l'IA voient certes leur performance immédiate s'améliorer, mais cela se fait au coût d'un désengagement cognitif dans la tâche. Et lorsque l'IA est inaccessible, ces personnes montrent une performance significativement réduite et abandonnent plus rapidement (Liu et al., 2026). Alombert (2023) écrit que : « *En déléguant aux performances analytiques des automates algorithmiques le travail qui consiste à synthétiser un texte, nous risquons de cesser d'exercer ces facultés et de désapprendre à penser* ». Nos étudiant·es auraient-ils pu se faire piéger par l'IA, ce qui les aurait amenés à une performance moindre ? Difficile à dire, car corrélation n'implique pas causalité. Ce qui est certain, c'est qu'il s'agit du groupe avec la note la plus faible (C) par rapport aux autres groupes. Ce constat pose donc la question de l'usage intensif de l'intelligence artificielle dans la conception en architecture, et des recherches futures devraient interroger ces aspects rapidement au vu de l'attractivité et de la vitesse d'évolution des modèles grand public d'IA.

#### Cas particulier : le groupe « piégé » dans Revit

Le groupe n°4 présente une particularité unique : c'est le seul groupe à avoir réalisé leur projet sur le **logiciel Revit de A à Z**. Et de leur propre témoignage, cela ne semblait pas être tout à fait prévu. C'est donc un point qui va dans le sens de la cinquième hypothèse de recherche, qui était pour rappel « *Les modèles numériques peuvent piéger les étudiant·es et demander plus de ressources cognitives que l'emploi de maquettes physiques de travail* ». Il semble que le groupe se soit **laissé séduire par le logiciel, et qu'ils ont fini par regretter ce choix** : « *au début on s'est dit c'est juste du brouillon pour faire la volumétrie. Mais on avait tellement avancé dessus qu'au final on s'est dit on va continuer pour faire les plans. Sauf que vu qu'au début on avait commencé en brouillon, il fallait tout réarranger. Tout cela a pris beaucoup de temps* » (ITW4). Cela se reflète dans leur charge cognitive : ils sont le deuxième groupe avec la charge cognitive la plus élevée en début de projet. Plus particulièrement, c'est leur charge cognitive intrinsèque qui est la plus élevée des trois, et cela se sent dans leur témoignage lorsqu'ils parlent de la

---

<sup>4</sup> Il existe une possibilité non négligeable que certains groupes ont préféré taire leurs pratiques de l'intelligence artificielle, par honte ou pour d'autres raisons.

difficulté de passer du mode « *brouillon* » au mode « *projet final* ». La tâche est alors hautement interactive, avec un travail supplémentaire requis, corroborant les résultats de Baudoux et Leclercq (2022). Pourtant, iels sont aussi le groupe avec la charge cognitive intrinsèque, extrinsèque et globale **la plus faible en fin de projet**. L'utilisation du logiciel pourrait donc leur avoir donné un avantage par rapport aux autres groupes en fin de projet. La baisse de la charge cognitive intrinsèque pourrait s'envisager comme la conséquence du fonctionnement même du logiciel, où la modification d'un élément en plan entraîne sa **modification automatique** en coupe, élévation et volumétrie, une fonctionnalité particulièrement appréciée des étudiant-es. Comme l'indiquent Baudoux & Leclercq (2022) cet avantage constitue un vrai atout par rapport à d'autres catégories de logiciels, qui permet de réduire l'inconsistance entre les différents documents. La tâche est donc peut-être **moins interactive** (c'est-à-dire moins liée, interdépendante) que dans les groupes où chaque modification en plan doit être traitée dans les autres représentations 2D du projet. Néanmoins, ce constat n'est peut-être pas uniquement lié à l'utilisation du logiciel. Des facteurs personnels ou encore la validation précoce du projet lors du pré-jury sont autant de facteurs pouvant expliquer cette constatation. Comme point de comparaison, le groupe n°6 offre un contraste intéressant : le logiciel Revit ne leur a servi qu'une fois le projet complètement fixé. Ce groupe n'a pas exprimé de regret lié aux logiciels utilisés. Leur charge cognitive totale est inférieure au groupe n°4 en début de projet, bien que leur charge cognitive extrinsèque soit supérieure au groupe n°4. En fin de projet, la charge cognitive du groupe n°6 passe au-dessus de celle du groupe n°4 (voir Figure 103). Il semble donc que le groupe n°6 n'ait pas bénéficié de l'avantage dont a pu bénéficier le groupe n°4. L'hypothèse de recherche est donc à compléter : bien que les modèles numériques demandent plus de ressources cognitives en début de processus, ils offrent un **gain de ressources à long terme**.

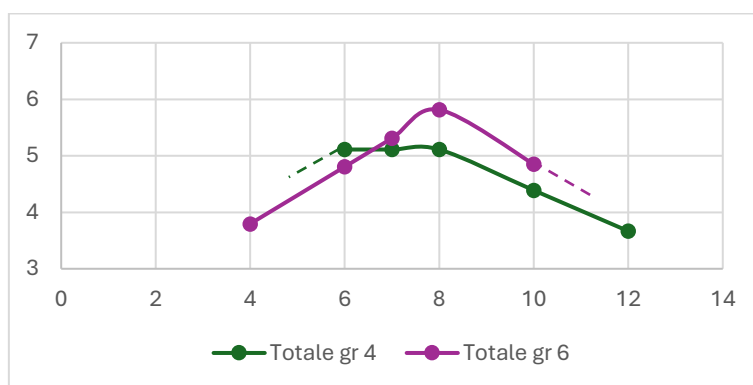


Figure 103 – Comparaison de la charge cognitive totale entre le groupe n°4 et le groupe n°6

### 6.3.3 Les maquettes de travail au service de la créativité

Lorsque les étudiant-es comparent les modèles numériques aux modèles physiques, iels mettent en avant la facilité de modification des secondes « *Ce qui est bien à la main, c'est qu'il n'y a pas besoin de savoir quelle mesure ça fait quoi. Sur SketchUp, tu es obligé d'indiquer une dimension où le trait doit être précis* » (ITW5). Cette facilité encourage l'idéation et l'échange : « *les idées fusent plus vite et c'est plus pratique de travailler en équipe sur une petite maquette* ». Un parallèle est donc à établir avec la théorie de la créativité, notamment avec le modèle de Grossberg (1999). Selon ce modèle, les neurones entrent en résonance positive ou négative face à l'environnement extérieur selon ce qu'il devrait ou ne devrait pas être (« *Et là on pouvait rajouter un petit morceau si on rajoutait une volumétrie, supprimer, couper dedans, ça permettait d'explorer pas mal de choses.* », ITW3). On peut postuler qu'avec l'objet physique, les étudiant-es



peuvent tester plusieurs options presque simultanément en enlevant ou ajoutant un morceau à leur maquette. L'effet de cette altération provoque alors une résonance, stimulant la créativité. L'ajout peut par exemple équilibrer la composition, ou bien créer un déséquilibre désagréable, comme théorisé par Grossberg (1999). Ces différences perçues nourrissent le débat entre les membres du groupe, chacun ayant sa perception propre. On retrouve également ici l'aspect « mémoriel » des maquettes, mis en avant par Estévez (2014), qui permet de comparer différents états du projet, de les mettre en relief. Nous pouvons donc postuler, en regard de ces constatations, que la maquette de travail est une représentation externe très facile d'accès, au même titre que l'esquisse, confirmant l'hypothèse de recherche n°3, qui était pour rappel « *Les maquettes physiques de travail demandent moins de ressources cognitives que les modèles numériques car elles possèdent des caractéristiques similaires à l'esquisse : elles sont malléables, plastiques et réversibles (Lebahar, 1983)* ». Cette facilité de modification, cette plastique comme l'appelle Lebahar (1983), est néanmoins à questionner dans le cadre des modèles issus du prototypage rapide, comme nous l'avons vu à la section 6.2.2.

### 6.3.4 Quelle charge cognitive pour le continuum conception-fabrication ?

Actuellement, comme vu précédemment, la charge cognitive associée au continuum conception-fabrication est trop élevée pour qu'il soit « rentable » pour les étudiant-es. Comme iels l'expliquent, faire une maquette est coûteux en temps. Actuellement, le temps requis pour la mise en place d'un continuum semble trop élevé, avec des modèles de fabrication devant être modélisés par les étudiant-es. Comme la littérature le montre, des étapes logicielles restent à franchir pour permettre de vraiment intégrer les contraintes de fabrication aux modèles numériques (Mertens et al., 2023). Les modèles issus du continuum conception-fabrication doivent donc également respecter un équilibre entre le temps requis à son usage et la complexité d'usage, comme représenté à la Figure 104. Ces constats vont à l'encontre de la quatrième hypothèse de recherche, qui était pour rappel la suivante « *Le continuum conception-fabrication demande moins de ressources cognitives qu'une production manuelle de maquettes, grâce au déplacement de la complexité vers le modèle numérique (Mansouri, 2026)* » et qui doit donc être infirmée : sans des percées logicielles et une formation suffisante, le continuum conception-fabrication ne demande pas moins de ressources que des maquettes de travail manuelles.

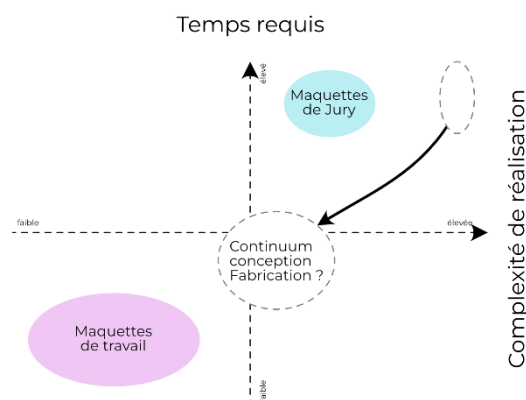


Figure 104 – Optimum à atteindre pour les modèles issus du continuum conception fabrication

## 6.4 LIMITES

Le choix de l'étude dans un contexte étudiant pose la question de la généralisation des résultats au monde professionnel. Ce contexte a néanmoins l'avantage d'être à l'avant-garde des outils numériques. En effet, les pratiques du numérique sont encore en cours d'adoption dans le contexte professionnel, et restent très hétérogènes en ce qui concerne le BIM, voire très limitées pour le design computationnel (de Boissieu, 2021). En outre, le contexte professionnel dépend de bien d'autres facteurs qui peuvent ainsi être exclus, tels que la rentabilité, les questions de hiérarchie ou encore la formation initiale des personnes.

L'enquête par questionnaire pose la question de l'adéquation entre la réponse obtenue et la question posée. Bien qu'ayant été testé sur deux participant·es zéro et ayant fait l'objet de nombreuses corrections, le questionnaire ne saurait être parfait. Il existe donc un risque de ne pas avoir collecté la bonne information. L'un·e des répondant·es l'illustre bien. Iel a indiqué ne pas avoir utilisé de modèle numérique pour son projet. Pourtant, iel a indiqué avoir réalisé la maquette de son projet avec un cutter numérique et de la découpe laser. Il semble donc que soit certains éléments ont manqué (dessin de pièces à découper directement sur la machine ?), soit la formulation des questions relatives à l'emploi de modèles numériques n'ait pas été suffisamment claire pour inclure le cas d'usage rencontré ici. De plus, les questions à choix multiples sont toujours délicates car elles nécessitent d'identifier le plus de situations possibles au préalable. Afin d'éviter de manquer certains aspects, des cases de réponses libres ont été prévues partout où cela était possible.

Une limite commune au questionnaire, aux entretiens et à l'évaluation de la charge cognitive sont leur aspect rétrospectif, dans la mesure où le premier est envoyé aux étudiant·es juste après la fin de leur atelier, et le second réalisé après l'évaluation des projets. Cette temporalité implique un biais rétrospectif. Ce biais est expliqué par Roese & Vohs (2012) par la superposition de trois illusions : la distorsion de la mémoire, l'inévitabilité et la prévisibilité. Les souvenirs s'alignent avec le résultat connu, brouillant les ressentis survenus avant ce résultat. En l'occurrence, les entretiens se déroulant après l'évaluation des projets, il est possible que des étudiant·es ayant reçu une mauvaise évaluation aient un regard plus négatif sur leur projet et sur leur processus de conception que s'ils avaient reçu un retour positif. L'inévitabilité implique que nos cerveaux tissent des liens de causalité à posteriori ; ce qui efface les causes réelles d'un événement (Roese & Vohs, 2012). Dans notre cas, si des étudiant·es ont par exemple rencontré un blocage lors d'une semaine de conception, les raisons évoquées par les étudiant·es lors des entretiens risquent de ne pas être les mêmes raisons évoquées si la question leur avait été posée à l'instant du blocage. Enfin, la prévisibilité implique que les signes avant-coureurs d'un événement positif ou négatif étaient évidents à comprendre, alors même que ces signes précurseurs ne seront connus qu'après la survenue de l'événement (Roese & Vohs, 2012). Par exemple, des étudiant·es travaillant exclusivement en plan pendant plusieurs semaines vont déclarer d'emblée lors de l'interview que c'était une erreur car cela a entraîné des conséquences plus tard. Or, si la question leur avait été posée durant ces semaines de conception, leur réponse aurait été bien différente. Le format de l'entretien s'est révélé parfois complexe ; en particulier pour le groupe de test, qui ne disposait pas d'exemple de ligne du temps complétée, et avait donc du mal à démarrer. La ligne du temps aurait pu être améliorée en ajoutant les mois, offrant une référence temporelle supplémentaire à la remémoration des événements.

L'analyse du processus de conception des étudiant·es est soumise en outre à deux autres limites. Tout d'abord, l'analyse des artefacts produits par les groupes se limite à ceux que les groupes ont souhaité partager. De plus, ces artefacts ne sont qu'une partie du processus de conception, l'espace interne et les discussions autour du projet n'étant pas accessibles. Les dynamiques collaboratives ne sont pas étudiées, ni même accessibles. Néanmoins, les entretiens collectifs permettent de simuler la dynamique du groupe le temps d'une heure, et la ligne du temps permet aux étudiant·es d'explicitier certains aspects de leur stratégie de collaboration. Ensuite, l'analyse de la charge cognitive ne repose que sur trois moments-clés, et pas sur l'ensemble du processus. Cette évaluation repose donc sur l'identification des trois phases les plus importantes au projet. Les 2 premières phases sont identifiées par l'enquêteur, puis précisées avec les participant·es. Le troisième moment-clé est choisi par les participant·es eux-mêmes.

# Chapitre 7 CONCLUSION

*« Le dessin autorise un processus viral, de transmission et d'appropriation rapide d'un support hautement transférable »*

*Catherine Elsen, Chercheuse FNRS*

Les résultats mettent en évidence que les maquettes de travail agissent comme un puissant **catalyseur dans le processus de conception**, en particulier dans un contexte de conception collaborative. Par leur tangibilité et leur facilité de modification, elles facilitent la communication immédiate entre les membres des groupes de conception tout en permettant d'évaluer rapidement l'insertion urbaine du projet. Plus les étudiant-es seront amené-es à pratiquer la maquette, plus elle leur sera bénéfique, et moins elle leur semblera être une perte de temps (Mahy, 2020). Toutefois, les maquettes de jury pourraient exercer une influence négative sur la production de maquettes de travail. En effet, elles tendent à faire oublier aux étudiant-es la simplicité de fabrication des maquettes de travail, ce qui induit alors une perception fortement négative des maquettes en général. Ce constat plaide en faveur d'une **pédagogie continue du projet par la maquette de travail** tout au long du cursus académique.

En outre, les modèles numériques ne remplacent pas les modèles physiques. Au contraire, ils viennent les compléter pour créer une véritable synergie lorsqu'ils sont combinés. Si les modèles numériques offrent une précision accrue et la possibilité de se déplacer dans l'espace projeté, ils ont le désavantage d'être longs à modifier, et la perception de la volumétrie du projet dans son contexte urbain y est moins évidente qu'en physique. Les étudiant-es se basant uniquement sur ces modèles risquent d'accumuler une dette cognitive vis-à-vis du projet, qu'ils devront alors rattraper tôt ou tard. De plus, **le niveau de détail des modèles s'avère être un aspect central**. Bien qu'ils demandent initialement une charge de travail plus importante (le temps de modéliser tous ces détails), cela se traduit par un **allègement de la charge cognitive en fin de projet**, notamment grâce à la génération automatique d'éléments tels que des coupes ou de la volumétrie. Ce constat ouvre la voie à une pédagogie du *projet numérique par le détail*, visant à apprendre à jauger le niveau de détails adéquat pour optimiser leur charge de travail.

Bien que les outils de fabrication numérique soient perçus positivement par la majorité des étudiant-es (car perçus comme de véritables soutiens à la réalisation de maquettes très soignées pour les jury finaux), ils ne sont **pas encore pleinement intégrés aux processus d'idéation**. Le continuum conception-fabrication n'est pas encore intégré naturellement dans les ateliers d'architecture. Même lorsque l'usage de ces outils est imposé, les étudiant-es peinent à établir une continuité entre leur modèle numérique de conception, (riche et détaillé) et leur modèle numérique de fabrication, adapté aux contraintes de matérialisation. Le **niveau de détails de l'artefact** est une question centrale, les étudiant-es devant fréquemment le réduire pour permettre la fabrication, alors même qu'ils souhaitent que leurs modèles contiennent de nombreux détails. Au-delà des questions logicielles, les entretiens révèlent une limite matérielle importante : dans l'état actuel de la technologie, les impressions 3D ne parviennent pas encore à s'inscrire dans le processus de conception. **Les étudiant-es recherchent des matériaux presque fluides et malléables, ce que le plastique ne peut pas offrir**. L'aspect lisse et robotique des maquettes semble aussi être un frein à leur usage, car il enlève la dimension artisanale et les traces mémorielles fondamentales pour l'apprentissage.

En conclusion, la pertinence de la maquette de travail demeure indiscutable, pour autant qu'on lui donne la possibilité d'exister. Le numérique ne signe pas la fin de la matérialité ; au contraire, il en redéfinit le besoin. Le numérique et le physique sont des environnements de conception complémentaires, offrant une synergie uniquement lorsqu'ils sont combinés. Encourager un retour à la matérialité nécessite néanmoins une incitation initiale, par une pédagogie par la maquette de travail. Il en va de même pour les technologies de fabrication numérique, qui doivent faire l'objet d'un accompagnement spécifique afin d'améliorer le savoir-faire des étudiant-es en la matière.

# **BIBLIOGRAPHIE**

- Alexander, C. (1971). *De la synthèse de la forme : essai* (R. Loué, J. Engelmann, & J. Sinizergues, Eds.) [Book]. Dunod.
- Alombert, A. (2023). Panser la bêtise artificielle. *Appareil*, 26. <https://doi.org/10.4000/appareil.6979>
- Amabile, T. M., & Pratt, M. G. (2016). The dynamic componential model of creativity and innovation in organizations: Making progress, making meaning [Article]. *Research in Organizational Behavior*, 36, 157–183. <https://doi.org/10.1016/j.riob.2016.10.001>
- Artige, L. (2022). Innovation. In *The Palgrave Encyclopedia of the Possible* (pp. 1–7). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-98390-5\\_237-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-98390-5_237-1)
- Baudoux, G. (2023). *De l'idéation en conception architecturale à l'instrumentation numérique de l'information bâtiment : Etude des conversations réflexives multi-instrumentées*. Uliège - Université de Liège.
- Baudoux, G., & Leclercq, P. (2022). Usability of BIM in Preliminary Design: A Study of the Relevance of the Different Representations Allowed by BIM. In Y. Luo (Ed.), *Cooperative Design, Visualization, and Engineering* (Vol. 13492, pp. 305–316). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-16538-2\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-031-16538-2_31)
- Baudoux, G., Leclercq, P., & Le Coguiec, E. (2019). *Analyse des méthodes de travail collaboratif en conception intégrée*. Uliège - Université de Liège.
- Bejan, A. (2022). *Time and beauty: why time flies and beauty never dies* [Book]. World Scientific. <https://doi.org/10.1142/12506>
- Bejan, A., & Merks, G. W. (2007). *Constructal Theory of Social Dynamics*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-47681-0>
- Bejan, A., & Zane, J. P. (2012). *Design in nature : how the constructal law governs evolution in biology, physics, technology, and social organization* (1st ed.) [Book]. Doubleday.
- Bilda, Z., & Demirkan, H. (2003). An insight on designers' sketching activities in traditional versus digital media. *Design Studies*, 24(1), 27–50. [https://doi.org/10.1016/S0142-694X\(02\)00032-7](https://doi.org/10.1016/S0142-694X(02)00032-7)
- Boudon, P., Deshayes, P., Pousin, F., & Schatz, F. (1994). *Enseigner la conception architecturale : Cours d'architecturologie*. Éditions de la Villette.
- Bourbonnais, S. (2014). *Sensibilités technologiques : expérimentations et explorations en architecture numérique 1987-2010*. Université Paris-Est, Université Laval (Québec, Canada).
- Camburn, B., Viswanathan, V., Linsey, J., Anderson, D., Jensen, D., Crawford, R., Otto, K., & Wood, K. (2017). Design prototyping methods: State of the art in strategies, techniques, and guidelines. *Design Science*, 3. <https://doi.org/10.1017/dsj.2017.10>

- Carmo, M. (2017). The Second Digital Turn. In *The Second Digital Turn* (pp. 9–98). The MIT Press.  
<https://doi.org/10.7551/mitpress/9976.003.0004>
- Collin, J., Elsen, C., Leclercq, P., Jancart, S., & Gallas, M.-A. (2017). *La matérialisation en conception architecturale numérique*. Université de Liège.
- Cristia, É., Zalio, P.-P., & Guéna, F. (2018). Quand le BIM met la maquette à l'épreuve du numérique. *SHS Web of Conferences*, 47, 01007.  
<https://doi.org/10.1051/shsconf/20184701007>
- Csikszentmihályi, M. (1997). *Creativity: flow and the psychology of discovery and invention* [Book]. HarperPerennial.
- de Boissieu, A. (2020). *Super-utilisateurs ou super- spécialistes ? Cartographie des catalyseurs de la transformation numérique en agence d'architecture*.
- de Boissieu, A. (2021). *Architecture et pratiques orientées sur les données : Pour un décroisement du BIM et du design computationnel*.
- de Boissieu, A. (2022). *Introduction to Computational Design: subsets, challenges in practice and emerging roles*.
- Dubois, P., Aoussat, A., & Duchamp, R. (2000). Prototypage rapide - Généralités. *Conception et Production*. <https://doi.org/10.51257/a-v1-bm7017>
- Duchesne, S., & Haegel, F. (2004). *L'enquête et ses méthodes : L'entretien collectif*. Nathan ; SEJER.
- Elsen, C. (2011). *La Médiation par les objets en design industriel - Perspectives pour l'ingénierie de conception*. ULiège - Université de Liège.
- Elsen, C., Mertens, A., Papillon, V., & Robinson, B. (2025). *Énoncé de l'Atelier IV - MMIL*.
- Estévez, D. (2014). Chapitre 5. Dialogue entre maquette et modèle en architecture. In *Les modèles, possibilités et limites* (p. 77). Editions Matériologiques.  
<https://doi.org/10.3917/edmat.levy.2014.01.0077>
- Fairchild, G. T., Marini, F., & Snow, J. C. (2021). Graspability modulates the stronger neural signature of motor preparation for real objects vs. Pictures. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 33(12), 2477–2493. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_01771](https://doi.org/10.1162/jocn_a_01771)
- Fraser, K. L., Ayres, P., & Sweller, J. (2015). Cognitive Load Theory for the Design of Medical Simulations. *Simulation in Healthcare: The Journal of the Society for Simulation in Healthcare*, 10(5), 295–307. <https://doi.org/10.1097/SIH.0000000000000097>
- Grossberg, S. (1999). The Link between Brain Learning, Attention, and Consciousness. In *Consciousness and Cognition* (Vol. 8). <http://www.idealibrary.comon>
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In *Advances in Psychology* (pp. 139–183). Elsevier Science & Technology. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- Ibrahim, R., & Pour Rahimian, F. (2010). Comparison of CAD and manual sketching tools for teaching architectural design. *Automation in Construction*, 19(8), 978–987.  
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.003>

- Joachim, G. (2016). *L'apprentissage des conversations de conception. Analyse exploratoire des pratiques discursives et graphiques médiées par ordinateur*. Université de Liège.
- Jones, J. Christopher. (1986). *Design methods : seeds of human futures*. J. Wiley.
- Kirsh, D. (2010). Thinking with external representations. *AI and Society*, 25(4), 441–454. <https://doi.org/10.1007/s00146-010-0272-8>
- Klepsch, M., Schmitz, F., & Seufert, T. (2017). Development and validation of two instruments measuring intrinsic, extraneous, and germane cognitive load. *Frontiers in Psychology*, 8(NOV). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01997>
- Koolhaas, R., Mau, B., Sigler, J., & Werlemann, H. (1997). *Small, medium, large, extra-large* (R. Koolhaas, B. Mau, J. Sigler, & H. Werlemann, Eds.) [Book]. Benedikt Taschen.
- Korisky, U., & Mudrik, L. (2021). Dimensions of Perception: 3D Real-Life Objects Are More Readily Detected Than Their 2D Images. *Psychological Science*, 32(10), 1636–1648. <https://doi.org/10.1177/09567976211010718>
- Koudoua, F., & Nia, H. A. (2025). Enhancing Learning Outcomes In Architecture Project Management: A Cognitive Load Theory Approach. *International Journal of Architecture and Design*, 11(2), 93–107. [https://doi.org/10.17932/iau.arch.2015.017/arch\\_v011i2001](https://doi.org/10.17932/iau.arch.2015.017/arch_v011i2001)
- Kriegelstein, F., Beege, M., Rey, G. D., Ginns, P., Krell, M., & Schneider, S. (2022). A Systematic Meta-analysis of the Reliability and Validity of Subjective Cognitive Load Questionnaires in Experimental Multimedia Learning Research. *Educational Psychology Review*, 34(4), 2485–2541. <https://doi.org/10.1007/s10648-022-09683-4>
- Kuppens, R., Leclercq, P., Roosen, M., & Calixte, X. (2020). *Rôle des artefacts dans le projet d'architecture : qualification de représentations dans le cadre d'un concours*. ULiège - Université de Liège.
- Lawson, B. (1990). *How designers think: The design process demystified* (2nd ed). Elsevier Science & Technology.
- Lebahar, J.-Charles. (1983). *Le dessin d'architecte : simulation graphique et réduction d'incertitude*. Editions Parenthèses ; Diffusion, Presses universitaires de France.
- Leclercq, P., & Heyligen, A. (2002). *5,8 analogies per hour. A designer's view on analogical reasoning*.
- Lecourtois, C., Guéna, F., & de Boissieu, A. (2012). Conception architecturale et nouvelles pratiques expertes. In *Transformation des horizons urbains*. L'œil d'or.
- Leroi-Gourhan, A. (1965). *Le geste et la parole* [Book]. Albin Michel.
- Liu, G., Christian, B., Dumbalska, T., Bakker, M. A., & Dubey, R. (2026). *AI Assistance Reduces Persistence and Hurts Independent Performance*. <http://arxiv.org/abs/2604.04721>
- Lubart, T., Mouchiroud, C., Tordjman, S., & Zenasni, F. (2025). *Psychologie de la créativité* (2nd ed.). Dunod.
- Mahy, R., & Le Coguiec, E. (2020). *Mémoire de fin d'études : "Les enjeux de la réalisation d'une maquette dans la conception d'un projet."* <http://hdl.handle.net/2268.2/9117>



- Mansouri, M. (2026). Continuum Conception-fabrication numérique. In *L'architecte et les machines intelligentes* (1).
- McLuhan, M., & Gordon, W. T. (2003). *Understanding media: the extensions of man*. Gingko Press.
- Mertens, A., Collin, J., Stals, A., de Boissieu, A., & Elsen, C. (2023, December 1). Interactions between analogue and digital explorations in Computational Design: lessons learned from Architectural Workshops. *LearnxDesign 2023*. <https://doi.org/10.21606/drsld.2023.093>
- Mille, C. (2021). *Études des facteurs cognitifs liés aux outils numériques pour les phases amont de la conception*. <https://pastel.hal.science/tel-03450182v1>
- Monaco, E. (2023). *L'utilisation de la fabrication digitale pour la réalisation de maquettes lors des études en architecture : état des lieux en Belgique francophone*. ULiège - Université de Liège.
- Naismith, L. M., Cheung, J. J. H., Ringsted, C., & Cavalcanti, R. B. (2015). Limitations of subjective cognitive load measures in simulation-based procedural training. *Medical Education*, 49(8), 805–814. <https://doi.org/10.1111/medu.12732>
- Negroponte, N. (1975). *Soft architecture machines*. The MIT Press.
- Oxman, R. (2002). The thinking eye: visual re-cognition in design emergence [Article]. *Design Studies*, 23(2), 135–164. [https://doi.org/10.1016/S0142-694X\(01\)00026-6](https://doi.org/10.1016/S0142-694X(01)00026-6)
- Parotte, C. (2025). *Méthodes de recherche qualitative: Approches et pratiques réflexives en sciences politiques et sociales*. Presses universitaires de Liège.
- Piaget, J. (1949). *La psychologie de l'intelligence* [Book]. Armand Colin.
- Picon, A. (2010). *Culture numérique et architecture : une introduction*. Birkhauser.
- Rabardel, P., & Bourmaud, G. (2003). From computer to instrument system: a developmental perspective [Article]. *Interacting with Computers*, 15(5), 665–691. [https://doi.org/10.1016/S0953-5438\(03\)00058-4](https://doi.org/10.1016/S0953-5438(03)00058-4)
- Roese, N. J., & Vohs, K. D. (2012). Hindsight Bias. *Perspectives on Psychological Science*, 7(5), 411–426. <https://doi.org/10.1177/1745691612454303>
- Safin, S. (2011). *Processus d'externalisation graphique dans les activités cognitives complexes : le cas de l'esquisse numérique en conception architecturale individuelle et collective* (P. Leclercq & A.-S. Nyssen, Eds.).
- Safin, S. (2025a). *Cognitive Activities in Architectural Design* (1st ed.) [Book]. John Wiley & Sons, Incorporated. <https://doi.org/10.1002/9781394411214>
- Safin, S. (2025b). *Cognitive Activities in Architectural Design* (1st ed.). John Wiley & Sons, Incorporated. <https://doi.org/10.1002/9781394411214>
- Schön, D. A. (2017). *The Reflective Practitioner*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315237473>
- Shepard, R. N. (2001). Perceptual-cognitive universals as reflections of the world. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(4), 581–601. <https://doi.org/10.1017/S0140525X01000012>

- Silvestri, C. (2009). *Perception et conception en architecture non-standard. Architecture, aménagement de l'espace.*
- Singly, F. de. (1994). *L'enquête et ses méthodes : le questionnaire* [Book]. Nathan.
- Snow, J. C., & Culham, J. C. (2021). The Treachery of Images: How Realism Influences Brain and Behavior. In *Trends in Cognitive Sciences* (Vol. 25, Number 6, pp. 506–519). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2021.02.008>
- Snow, J. C., Skiba, R. M., Coleman, T. L., & Berryhill, M. E. (2014). Real-world objects are more memorable than photographs of objects. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8(OCT). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00837>
- Stals, A. (2019). *Pratiques numériques émergentes en conception architecturale dans les bureaux de petite taille - Perceptions et usages de la modélisation paramétrique.*
- Sweller, J. (1988). Cognitive Load During Problem Solving: Effects on Learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257–285. [https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202\\_4](https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4)
- Vilar, E., Filgueiras, E., & Rebelo, F. (2022). Virtual and Augmented Reality for Architecture and Design. In *Virtual and Augmented Reality for Architecture and Design*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003051381>
- Wu, J.-C., & Chen, C.-C. (2012). *Comparison of Designer's Design Thinking Modes in Digital and Traditional Sketches.* <https://dl.designresearchsociety.org/drs-conference-papers/drs2012/researchpapers/152>
- Yaneva, A. (2013). *Made by the Office for Metropolitan Architecture: An Ethnography of Design.* Nai010 Publishers.
- Yu, R., Gu, N., Ostwald, M., & Gero, J. S. (2014). Empirical support for problem-solution coevolution in a parametric design environment. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM*, 29(1), 33–44. <https://doi.org/10.1017/S0890060414000316>
- Zeisel, J. (2006). *Inquiry by design : environment, behavior, neuroscience in architecture, interiors, landscape, and planning* (J. P. Eberhard, Ed.; Revised edition) [Book]. W.W. Norton & Company.

# DE LA MODÉLISATION À LA MATÉRIALISATION

## ENJEUX COGNITIFS DES ARTEFACTS DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION ARCHITECTURALE

### RÉSUMÉ :

Ce travail a pour objectif d'investiguer les modèles architecturaux numériques et les maquettes physiques tels qu'utilisés par les étudiant·es en architecture, afin d'étudier leurs rôles dans le processus de conception. Il s'inscrit dans la continuité de nombreux travaux de recherche, interrogeant l'évolution des artefacts de conception au prisme des nouveaux outils numériques de l'architecte. Ce mémoire déploie une recherche qualitative, divisée en deux phases : une enquête par questionnaire suivie d'entretiens collectifs rétrospectifs. L'enquête par questionnaire a permis d'évaluer l'usage des modèles numériques et des maquettes physiques auprès des étudiant·es de bachelier et master de l'Université de Liège ainsi que de l'Université de Paris La Villette. Les entretiens collectifs rétrospectifs ont été menés avec des groupes de conception de l'Atelier IV organisé en première master à l'Université de Liège, et avaient pour objectif d'analyser le processus de conception mis en place par ces groupes, en particulier les artefacts et outils utilisés. Lors de ces entretiens, ce travail s'est appuyé sur une méthode originale de co-construction des données, tout en évaluant la charge cognitive des étudiant·es afin d'affiner la compréhension des mécanismes sous-jacents. Les résultats obtenus démontrent que tant les maquettes physiques de travail que les modèles numériques sont des artefacts essentiels à la conception d'un projet d'architecture. Leur combinaison permet aux étudiant·es d'atteindre les meilleures solutions, grâce aux qualités propres aux deux environnements. Alors que les maquettes physiques sont délaissées par les étudiant·es, les résultats de ce mémoire montrent que leur usage est susceptible d'induire un changement de perception positif sur le projet. Ce travail met également en évidence les caractéristiques que devraient prendre les maquettes physiques issues des procédés de fabrication numérique pour véritablement participer à la conception des projets d'architecture. Ces résultats corroborent les travaux de recherche précédents, et ouvrent la perspective d'une pédagogie du projet architectural par l'artefact physique, permettant d'en révéler toutes les qualités.

**JURY : AURÉLIE DE BOISSIEU ; CATHERINE ELSSEN ; GAËLLE BAUDOUX**

**ÉTUDIANT : FLORENT ROOSEN**

