

Université de Lorraine
École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy
Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie MAP-CRAI

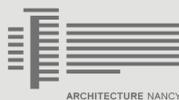
Jonathan Garijo

LE PROTOTYPAGE RAPIDE EN ARCHITECTURE

L'INTÉGRATION DES PROCÉDÉS DE FABRICATION DIGITALE DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION ARCHITECTURALE

Mémoire de fin d'études, dirigé par M. Damien Hanser

Réalisé dans le cadre du master Design Global
Spécialité Architecture Modélisation Environnement
Présenté et soutenu le 7 septembre 2016



Université de Lorraine
École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy
Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie MAP-CRAI

Jonathan Garijo

LE PROTOTYPAGE RAPIDE EN ARCHITECTURE

L'INTÉGRATION DES PROCÉDÉS DE FABRICATION DIGITALE DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION ARCHITECTURALE

Mémoire de fin d'études, dirigé par M. Damien Hanser

Réalisé dans le cadre du master Design Global
Spécialité Architecture Modélisation Environnement
Présenté et soutenu le 7 septembre 2016



AVANT-PROPOS

Ce mémoire a été réalisé dans le cadre de l'obtention du diplôme d'état d'Architecture avec spécialité Architecture Modélisation Environnement (A.M.E.), et est l'issue d'un travail de recherche effectué pendant un stage de quatre mois au MAP-CRAI auprès de Damien Hanser, enseignant-chercheur à l'EN-SAN et responsable de la spécialité A.M.E.

Le sujet de ce stage, un cas d'application concret des techniques et méthodes de prototypage rapide, était pour moi l'occasion d'explorer ce domaine particulier, lequel avait déjà suscité mon intérêt dans le passé en sa qualité de passerelle entre modèle numérique et modèle physique. Ayant déjà une certaine expérience dans l'utilisation des outils numériques, ce stage m'a permis de me rendre compte que malgré des connaissances préexistantes, celles-ci restaient incomplètes, rendant l'utilisation de ces techniques difficiles en l'état. J'ai ainsi pu développer de nouvelles connaissances personnelles par l'expérimentation, pour essayer au mieux de cerner leurs possibilités, leurs limites, et leurs applications dans le domaine de l'architecture.

Le travail de recherche effectué lors de ce stage est directement orienté sur cette notion de découverte, d'apprentissage des outils de prototypage rapide d'un point de vue technique et méthodologique, ouvrant sur la question « pourquoi et comment les utiliser ? ». En effet, la rapide évolution de ces technologies me laisse penser que leur maîtrise sera incontournable dans les années à venir, sur le plan personnel (utilisation de salon) comme sur le plan professionnel (du maquettage à la construction). En tant que futur architecte, il me semblait donc important dans un premier temps d'acquérir ces compétences comme une plus-value à titre individuel, mais aussi de trouver un moyen de les redistribuer afin de mieux faire connaître les méthodes et leurs intérêts pour la profession. Et sans chercher à systématiser leur utilisation qui tient des préférences de chacun, mon but serait de mettre à disposition des outils intellectuels pour mieux comprendre les enjeux et le fonctionnement de ces technologies, un support pour apprendre à les utiliser, simplement pour décider si oui ou non on en a l'utilité.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord je tiens à remercier l'ensemble du personnel du CRAI et de ses occupants, pour leur intérêt et leurs questions, mais aussi pour l'ambiance de travail et la bonne humeur qui régnait au laboratoire

Merci également à Damien Hanser pour m'avoir proposé ce stage, pour m'avoir donné l'occasion de me plonger dans le monde de l'impression 3D et du prototypage rapide, et pour m'avoir permis d'expérimenter librement avec les machines du laboratoire

Je remercie encore une fois Damien Hanser, Vincent Marchal, et Élodie Hochscheid pour avoir partagé avec moi leurs remarques, leurs conseils et leur expérience sur l'impression 3D.

Enfin, je remercie chaleureusement les stagiaires, les doctorants et les docteurs du CRAI, pour leur intérêt et leur soutien continus, pour les discussions et les questions qui ont permis de développer la réflexion autour de ce mémoire, et pour m'avoir donné les moyens de réaliser ce stage.

SOMMAIRE

Avant-propos	7
Remerciements	9
Sommaire	11
Introduction	13
Partie 1 : Enjeux et objectifs du stage	17
Partie 2 : Déroulement du stage	35
Partie 3 : Le prototypage rapide, un outil pour l'architecture ?	73
Conclusion générale	119
Notes de référence	125
Table des matières	129

INTRODUCTION

Dès la première année des études d'architecture, l'enseignement met en avant l'importance de la maquette dans ce domaine. Que ce soit pour étudier la volumétrie générale d'un projet, visualiser les relations entre différents espaces, comprendre le comportement de la lumière, ou mieux appréhender le système structurel, elle est utile à l'architecte autant dans le travail de conception, que dans la communication autour de projets auprès des clients, des curieux, voire du grand public. La maquette d'architecture tient ainsi une place importante dans l'histoire de la discipline, et continue aujourd'hui à être appréciée pour ses différentes qualités.

Mais malgré les intérêts qu'elle peut représenter, sa réalisation demande un investissement temporel et matériel conséquent, et pas toujours disponible. En effet, la conception architecturale est un processus complexe intégrant de nombreux paramètres internes dépendant de la nature du projet (exigences programmatiques, techniques constructives, aspects sociaux, environnementaux, ...), et de paramètres externes venant de son contexte et de ses différents acteurs (maître d'ouvrage, bureaux d'étude, réglementations, ...). Tous ces éléments ont une influence sur le déroulement du projet, et plus particulièrement sur le temps allouable à la conception. Entre les nouvelles normes à intégrer, les dernières requêtes du client ou les impératifs administratifs, le temps effectif de conception est souvent perçu comme très court, et conduit à laisser de côté la maquette d'étude en faveur d'autres méthodes de travail plus rapides et moins coûteuses. La maquette existe encore en tant qu'outil de communication, mais souvent réalisée a posteriori, ou encore sous-traitée à un maquettiste.

Pourtant, d'autres domaines avec une forte contrainte temporelle et de complexité comparable – comme le design, l'industrie ou l'ingénierie – font une utilisation intensive de maquettes et de prototypes dans les différentes étapes de recherche et de conception. Cette différence avec l'architecture

peut s'expliquer par l'utilisation des technologies de pointe dans les mondes du numérique et de la fabrication assistée par ordinateur, souvent adoptées par ces domaines très tôt dans leur développement.

À l'inverse, on a pu constater par le passé la difficulté qu'a l'architecture à investir dans ces nouveaux outils¹, menant à un retard d'appropriation technologique par rapport aux autres disciplines. Et bien que l'apparition des technologies de prototypage rapide ne soit pas récente, leur utilisation dans la conception architecturale est encore marginale et pose de nombreux problèmes.

Les raisons de ce retard d'appropriation des outils de prototypage rapide sont multiples et dépendent des pratiques individuelles de chacun. On peut entre autres mentionner le défi que représente le changement d'un processus de conception dans une structure existante pour intégrer de nouveaux outils², constituant un facteur psychologique qui complique la transition d'un système qui « fonctionne » à un système peut-être meilleur mais inconnu, et potentiellement risqué. De même, de manière plus concrète, la barrière des connaissances nécessaires à l'utilisation de ces outils peut induire ce retard, les agences n'ayant pas toujours la possibilité de s'investir dans l'acquisition de nouvelles compétences. Combinés avec le manque de temps perçu, la tendance à la sous-traitance, et la difficulté d'identifier a priori un gain direct, ces aspects constituent autant d'obstacles qui font des outils de prototypage rapide une technologie peu exploitée par les architectes ; quand bien même, elles suscitent de plus en plus leur intérêt en raison de leur accessibilité croissante, et de leur potentiel pour rendre plus rapides et moins coûteuses certaines étapes du processus de conception, plus particulièrement la réalisation de maquettes.

— • —

À partir de ce contexte complexe, nous pouvons déjà poser un certain nombre de questions pour cadrer la réflexion de ce mémoire. Ainsi, en premier

1. Comme c'est le cas par exemple avec la transition du dessin à la main vers les logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO), puis aujourd'hui vers le Building Information Model(ing) (BIM).

2. HOCHSCHEID, Élodie, « Développement des échanges de fichiers entre deux acteurs de la construction », mémoire de master en architecture spécialité A.M.E., sous la direction de Mohamed Anis GALLAS, Damien HANSER et Olivier MALCURAT, Nancy, École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy, 2015, 113p.

lieu, quels intérêts y a-t-il à pousser l'utilisation des technologies numériques dans la conception en architecture ? Au-delà de l'idéal d'être à jour sur les dernières avancées logicielles et techniques, il est légitime de se demander quels sont concrètement les outils à disposition, leurs bénéfices, leurs conséquences, et en quoi il constituent une innovation pour la discipline. La question pourrait également s'exprimer plus simplement : pourquoi investir dans de nouvelles manières de concevoir comme le prototypage rapide ?

De plus, bien que la maquette ait une grande importance dans le travail de conception, elle n'en est pas moins coûteuse et chronophage. S'il semble que le prototypage rapide permette de réaliser des maquettes dont les coûts ne sont plus un frein, la décision de s'orienter vers ces technologies pose alors un autre problème : comment rendre le prototypage rapide compatible avec le temps de la conception architecturale ? Qu'entend-on exactement par « rapide » ? Quelles sont les compétences, les démarches à mettre en œuvre, et combien de temps faut-il pour les maîtriser ?

Enfin, une dernière question subsiste. Les technologies dont nous parlons sont déjà largement utilisées dans d'autres domaines, chacun développant ses propres modèles de conception ; mais les besoins varient, et un modèle qui a été éprouvé pour l'industrie ne sera pas nécessairement adapté à l'architecture. Dans ce cas, quelle est la place et le (ou les) moment(s) du prototypage rapide dans le processus de conception architecturale ? Quand, et surtout dans quels cas l'utiliser ? Quelles sont les dérives et les mésusages de ces technologies, et comment les éviter ?

— • —

Afin de répondre à l'ensemble de ces questions, la réflexion menée dans ce mémoire s'appuiera sur l'expérience acquise tout au long du stage réalisé dans les murs du MAP-CRAI autour de l'impression 3D et autres méthodes de prototypage rapide. Nous nous intéresserons tout d'abord à préciser le contexte du stage, ses enjeux et ses objectifs, et de décrire la méthodologie de recherche et les hypothèses de travail. Dans un second temps nous développerons le déroulement du stage, les outils, les méthodes, les processus utilisés pour le mener à bien, et les apprentissages qui en découlent. Enfin nous nous attacherons à faire l'analyse et la synthèse des données de recherche afin de généraliser l'expérience acquise au cours du stage, et de proposer une réflexion plus profonde sur ce que peut être le prototypage rapide pour l'architecture.

PARTIE 1 : Enjeux et objectifs du stage

Le travail de recherche retranscrit dans ce mémoire prend racine dans la réalisation d'un stage au MAP-CRAI sur une durée de quatre mois. Ce dernier revêt différents aspects en raison des exigences à la fois de production (mener à bien un projet de fabrication), de méthode (organiser les étapes et les manières de faire) et de recherche (analyser et documenter le travail effectué).

Afin de comprendre au mieux le cadre de recherche, nous définirons dans cette partie les notions importantes manipulées dans ce mémoire ; puis nous aborderons la question des objectifs et des enjeux de ce stage afin d'en dégager une problématique.

1.1. Notions manipulées

1.1.1. Le processus de conception

Au sens strict, le processus (du latin *pro* et *cessus*, « aller vers l'avant ») est une suite continue d'opérations suivant un schéma pour arriver à un résultat (éléments de sortie) à partir de données initiales (éléments d'entrée). Contrairement à une procédure dont le déroulement est généralement imposé et indiscutable, le processus inclut une notion de flexibilité, d'adaptabilité aux différentes situations auxquelles il s'applique. Un processus de conception peut ainsi se définir comme un ensemble de méthodes qui permettra, à partir d'une problématique de base (programme, contraintes, normes), d'aboutir à un objet répondant à cette problématique et dont la nature dépendra du projet de départ (produit, service, équipement, technique, système).

Le processus de conception occupe une place centrale dans la Recherche et Développement (R&D) et définit un ensemble d'étapes-clés et de méthodes. Celles-ci serviront de cadre à la création et au développement d'un objet dans l'idée d'innovation. On peut distinguer deux modèles principaux de processus de conception³, chacun répondant à des exigences différentes par rapport au problème initial : la conception réglée et la conception innovante.

La conception réglée – ou conception systématique – correspond à des processus fixés et linéaires, dans le sens où chaque étape pose les fondements (cahier des charges) de l'étape suivante, avec peu (voire pas) de possibilité de retour en arrière. Le travail s'organise alors principalement en quatre étapes : la définition fonctionnelle (fonctionnalités recherchées), la définition conceptuelle (principes physiques et formels), la définition physico-morphologiques (besoins et principes de fabrication) et la définition détaillée (processus de fabrication bas niveau). Ce type de processus part du postulat que le besoin est clairement identifié et défini dès le début de la conception, l'objectif étant alors de préciser les différentes caractéristiques techniques et fonctionnelles de l'objet final pour répondre à ce besoin.

À l'inverse, la conception innovante intègre les notions de projet et d'incertitude, et rejette l'idée de linéarité de la conception. Les processus issus de ce modèle prennent en compte la quasi impossibilité de spécifier l'ensemble des

3. HATCHUEL, Armand et WEIL, Benoît, *Les nouveaux régimes de la conception : Langages, théories, métiers*, Ouvrage collectif, collection Entreprendre, éditions Vuibert, Paris, 2008, 272p. ISBN 9782711769315.

besoins fonctionnels de l'objet projeté, voire l'absence de demande inhérente aux domaines de l'innovation. Ce type de processus est ainsi régi non pas par un enchaînement linéaire, mais plus souvent par des boucles de rétroaction positive. La conception se déroule ainsi de manière empirique afin d'enrichir le projet en testant différentes hypothèses de conception (recherche de solutions, nouveaux besoins, nouvelles fonctionnalités), mais aussi d'améliorer le processus de conception lui-même pour l'adapter à chaque itération (amélioration continue du processus).

Il existe de nombreuses déclinaisons des principes de la conception innovante, souvent issues de besoins et de domaines spécifiques (ingénierie, conception automobile, logicielle, ...), puis théorisées et généralisées, comme c'est le cas notamment des différentes pratiques des méthodologies agile (Rapid Application Development (RAD), Scrum, Kanban, ...).

1.1.2. La maquette

La maquette est un moyen de représentation, complète ou partielle, d'un objet réel ou en projet. Elle fait intervenir la notion d'échelle, qui peut être réduite ou agrandie selon l'objet (ou la partie de l'objet) représenté(e), en adéquation avec les objectifs de la maquette. On parlera de maquette fonctionnelle lorsque celle-ci implémentera des aspects comportementaux de l'objet final (mécanismes et résistance par exemple). La maquette fait partie intégrante du processus de conception, dans lequel elle intervient de différentes manières du début à la fin.

La maquette peut être physique, et correspond alors à une représentation qui reprend certaines caractéristiques de l'objet final. Ces caractéristiques peuvent être purement visuelles (volumétrie, forme, couleur) ou fonctionnelles (encombrement, manipulation). L'échelle, les méthodes de fabrication et les matériaux utilisés dépendent moins de l'objet représenté, que des choix de représentation et de la destination de la maquette.

La maquette peut également être numérique, c'est-à-dire une modélisation informatique de l'objet, réalisée à l'aide de logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO). À l'inverse de la maquette physique, la maquette numérique permet de visualiser l'ensemble des aspects de l'objet final à moindre coût, en terme de budget, de matériaux ou de temps. La modélisation de ce type de maquette se fait généralement à échelle 1:1 dans le (ou les) logiciels. Selon les cas, la maquette numérique pourra servir aussi bien pour la visualisation

de l'objet final (matériaux, comportement à la lumière, mise en situation) que pour ses aspects plus techniques (mécanismes, résistance, simulations). Dans ce dernier cas, on pourra également parler de prototype virtuel.

Ces deux modes de représentation – la maquette physique et la maquette numérique – sont complémentaires et intrinsèquement liés. Dans l'utilisation de la maquette comme outil de travail, la maquette numérique est plus précise, plus simple et plus rapide à manipuler pour la conception ; et elle peut ensuite servir de support à la réalisation d'une maquette physique permettant de vérifier les hypothèses de la maquette numérique. Dans une utilisation comme outil de communication, la maquette physique permet de mieux cibler les aspects que l'on souhaite communiquer, tandis que la maquette numérique pourra donner une visualisation plus « réaliste » (image de synthèse, mise en situation, ...) et plus interactive de l'objet (modèles parcourables).

1.1.3. Le prototype

Le prototype peut se définir comme un modèle original, conçu pour implémenter toutes les qualités techniques et les caractéristiques de fonctionnement d'un objet⁴ ou d'une partie de l'objet. Il fait partie des étapes liées au domaine de la R&D. À l'inverse de la maquette, le prototype est un outil de validation à l'échelle des hypothèses de conception : il est fabriqué au plus proche de l'objet final en terme de dimensions, de matériaux et de comportement. Son objectif est de démontrer la faisabilité et le bon fonctionnement de l'ensemble du projet de manière réaliste, mais souvent non définitive. C'est cette volonté de réalisme qui différenciera le prototype de la maquette.

En plus d'être un outil de validation, le prototype est également un support d'échange et d'acquisition de connaissances. La fabrication de prototypes est ainsi un moyen de capitaliser de l'expérience sur un objet nouveau dont on définit les caractéristiques (conception) ou sur un objet existant dont on cherche à comprendre le fonctionnement (rétro-ingénierie). Il constitue également un outil utile à l'élaboration des éléments de documentation du projet (spécifications techniques, processus de fabrication, manuel d'utilisation, ...).

4. OECD (2015), *Frascati Manual 2015 : Guidelines for Collecting and Reporting Data on Research and Experimental Development*, The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities, OECD Publishing, Paris [en ligne]. DOI:10.1787/9789264239012-en. Disponible à l'adresse : <http://dx.doi.org/10.1787/9789264239012-en> [consulté le 24 août 2016].



fig.1: Maquette de la nouvelle Maison de la Musique, exposée au Musée finlandais d'architecture à Helsinki.



fig.2: Exemple de chaîne de prototypes menant à la réalisation d'un produit fini.

Par son coût élevé en matériaux, en outillage et en temps, le prototype marque une étape dans l'évolution du projet. Selon la complexité du projet, la réalisation d'un prototype peut être une étape unique et tardive dans le processus de conception, précédant le plus souvent la fabrication de l'objet final ou sa mise en production. Ou, à l'inverse, il peut revenir régulièrement. On parle alors de prototypes intermédiaires, jouant un rôle central dans la démarche d'amélioration continue du projet.

Le prototype désigne le plus souvent un objet physique qui permettra de valider (ou d'infirmier) les choix de conception : esthétique, matériaux, fonctionnement, ergonomie, mais aussi le processus de fabrication, les coûts, etc. Le prototype peut être complet pour valider le projet dans son ensemble, ou partiel en excluant certaines caractéristiques secondaires (matériaux différents par exemple) ou en ne considérant qu'une partie de l'objet à tester (le plus souvent un point critique, un assemblage, un mécanisme, ...), ceci dans le but de réduire les coûts de fabrication.

Cependant le prototype peut également être virtuel. Dépendamment du logiciel utilisé pour la modélisation et des attentes liées à ce prototype, il peut être confondu avec la maquette numérique lorsque celle-ci est suffisamment évoluée pour répondre aux besoins du prototype. À l'inverse il peut en être distinct si la phase de test du prototype nécessite des fonctions indisponibles dans le logiciel de modélisation de la maquette numérique (simulations par exemple). Selon les cas, ce prototype virtuel permettra de valider simplement l'aspect visuel (image de synthèse, mise en situation), les aspects fonctionnels (manipulation, encombrement, contraintes) ou les aspects techniques (résistance mécanique, points de rupture, calcul de forces).

1.1.4. Le prototypage rapide

Le prototypage rapide regroupe l'ensemble des techniques et technologies qui permettent dans des temps relativement courts (de l'ordre de quelques heures) la production de pièces avec précision à partir de modèles numériques, limitant ainsi les besoins en intervention humaine⁵. Le prototypage rapide repose sur trois aspects : la réduction du temps de fabrication et donc l'optimisation des temps de développement ; la réduction des coûts permettant de multiplier les tests et les variantes sans impacter l'économie du projet ; et la possibilité de fabriquer des pièces complexes parfois impossibles à obtenir avec un outillage classique.

La réalisation d'un prototype physique avec des méthodes traditionnelles étant souvent complexe et coûteuse, le prototypage rapide est de plus en plus utilisé pour son aspect économique. Il prend ainsi une place privilégiée dans les démarches d'amélioration continue du projet et du processus de conception, en rendant possible la fabrication systématique de prototypes intermédiaires.

Il existe de nombreuses techniques de prototypage rapide, ayant différentes destinations selon les exigences qui régissent la fabrication de l'objet. On distinguera notamment les outils de prototypage rapide produisant des pièces à deux dimensions (CNC deux axes pilotée par ordinateur, découpe laser, ...), des outils produisant des pièces en volume (CNC cinq axes, frittage laser, stéréolithographie, impression 3D, lamination, ...).

L'utilisation du prototypage rapide dans le développement d'un projet implique un certain nombre de paramètres qui doivent être pris en compte dans l'élaboration du processus de conception, et se fait conjointement avec un travail rigoureux sur la (ou les) maquette(s) numérique(s). En effet, chaque technologie nécessite des connaissances particulières qui influencent le développement du projet (logiciels et compétences), que ce soit sur les limitations de la technologie en elle-même (degré de complexité, matériaux, ...), ou sur les démarches permettant de passer de la maquette numérique à un modèle exploitable (format de fichier, protocoles de communication, ...).

5. PHAM, D. T. et GAULT, R. S., « A comparison of rapid prototyping technologies », *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 38, 1er octobre 1998, p. 1257-1287 [en ligne]. DOI 10.1016/S0890-6955(97)00137-5. Disponible à l'adresse : [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00137-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00137-5) [consulté le 23 août 2016].



fig.3: Maquettes d'étude réalisées avec des techniques mixtes de prototypage rapide et de maquettage traditionnel.

1.2. Définition du cadre de recherche

1.2.1. Un cas pratique : conception d'une unité de travail mobile

L'objectif premier de ce stage est un objectif de production visant à répondre à un besoin réel, lié à l'atelier de projet Studio Digital Collaboratif du master Design Global spécialité A.M.E. Cet atelier de projet, réalisé en collaboration avec l'Université de Liège, propose aux étudiants de travailler à distance en équipes mixtes France-Belgique sur un projet d'architecture.

Le besoin initial définit donc un meuble permettant de déployer à l'ENSAN un environnement de travail collaboratif, propre à l'organisation de réunions à distance entre les membres de chaque équipe.

Préambule : l'atelier Conception et Fabrication Digitale.

Il est important de noter que la question de la conception et de la fabrication de ce meuble avait déjà été abordée durant le premier semestre du master. En effet, dans le cadre de l'atelier Conception et Fabrication Digitale (CFD) dirigé par M. Damien Hanser, les 16 étudiants du master – dont je faisais partie – ont pu travailler sur l'élaboration de ce type de meuble, pour aboutir à quatre propositions différentes.

Ce travail préliminaire a permis non seulement d'alimenter en amont du stage la réflexion sur ce que devait être le meuble et quels problèmes pourraient surgir pendant sa conception, mais aussi de constituer un corpus de solutions techniques plus ou moins développées grâce à la restitution d'une documentation pour chaque proposition, à toutes les étapes de développement.

Définition du besoin.

La base de données réunie lors des différentes sessions de l'atelier CFD a servi de base à l'élaboration d'un premier cahier des charges précisant les contraintes de base et les fonctionnalités recherchées. En terme de programme, le meuble doit donc répondre à trois critères :

- **Simplicité d'utilisation** : un objet unitaire qui comporte tous les éléments et accessoires utiles aux réunions, en évitant les manœuvres contre-intuitives ou risquées que ce soit lors du déplacement, du déploiement ou du rangement ;
- **Rapidité de déploiement** : un objet qui limite au maximum le nombre de manipulations nécessaires pour mettre en place l'environnement

de travail, idéalement sans avoir à faire appel à plus d'une personne seule pour l'ensemble des étapes de l'utilisation du meuble ;

- **Adaptabilité de l'unité** : un objet conçu de telle sorte qu'il puisse être utilisé dans différentes conditions, assis ou debout, seul ou à plusieurs, en même temps que d'autres postes, dans une salle silencieuse, dans un hall avec un fort écho, etc.

En plus de ces trois critères, d'autres paramètres seront pris en compte, comme l'encombrement pour faciliter le stockage, la sécurisation du matériel de valeur, ou encore l'évolutivité pour d'éventuelles variantes.

Résolution technique et production.

Dans un exercice de conception pure, la question de la réalisation peut être posée mais n'est pas toujours approfondie (flou laissé sur certains points) ni contextualisée (non prise en compte des ressources disponibles). C'est un point qui a pu être remarqué lors de l'atelier CFD, où la recherche de solutions techniques pour une éventuelle fabrication était bien présente, mais leur implémentation dans le projet n'était pas développée et faisait souvent appel à des éléments sur-mesure ou un outillage indisponible. En effet, malgré le soin porté par chaque groupe au réalisme des propositions, le temps alloué à l'atelier ne permettait pas d'en assurer la faisabilité ; le meuble restant à ce stade un objet fictif.

À l'inverse, dès le début du stage, l'objectif était explicitement d'aboutir à un objet réel. Le travail est ainsi cadré par de nouvelles contraintes liées aux matériaux, aux outils, aux compétences disponibles. Ainsi la recherche et l'intégration des solutions techniques peut rapidement augmenter la complexité du projet ; la réalisation d'un mécanisme d'apparence simple peut potentiellement devenir complexe selon les moyens mis en œuvre.

— • —

L'ensemble de ces contraintes et exigences définissent donc un objet de taille modeste, réalisable à l'échelle du temps du stage, mais d'une complexité élevée due à la recherche de procédés de fabrication et d'assemblages compatibles avec les outils et les moyens à disposition. Ces données initiales constituent un environnement de travail qui nous permettra d'expérimenter dans des conditions réalistes sur le processus de conception que l'on développera par la suite.

1.2.2. Expérimentation sur le processus de conception

Le travail effectué arbore également un objectif d'analyse et de recherche sur le processus de conception mis en œuvre et sur l'utilisation du prototypage rapide dans ce processus. L'environnement de travail tel que nous l'avons défini plus haut sert alors comme un moyen de tester, de valider ou d'infirmer différentes hypothèses de recherche en se plaçant dans un cas d'application réel. L'intérêt ici est de prendre du recul sur le déroulement du stage – l'évolution des méthodes appliquées, le succès ou l'échec des techniques utilisées, ou encore la chronologie des différents développements – et de s'en servir comme données expérimentales pour proposer à terme une réflexion plus générale sur les processus de conception et le prototypage rapide.

La recherche va ainsi s'orienter sur un modèle de processus de conception avec un nombre limité d'acteurs, comprenant un client qui définit la demande, et un concepteur qui la réalise. Les étapes du développement (dates butoir, livrables, ...) sont alors décidées conjointement entre le client et le concepteur, mais le concepteur gère en autonomie les tâches à effectuer pour arriver au résultat escompté.

Dans le cas de ce stage, cette structure est biaisée en raison de l'implication de chaque acteur dans toutes les étapes du processus, en terme d'organisation comme de conception. Elle ne permettra donc pas d'étudier les interactions entre les acteurs de manière réaliste. Elle permettra en revanche de mettre en avant un certain nombre de points, dont :

- **Les problèmes rencontrés**, au niveau organisationnel ou conceptuel, et plus particulièrement ceux concernant l'intégration des outils de prototypage rapide dans le processus de conception ;
- **Les méthodes utilisées**, comment elles sont mises en place, et en quoi elles permettent – ou non – de faciliter le travail de conception à l'aide des outils de prototypage rapide ;
- **L'impact des méthodes et outils sur l'objet conçu**, les intérêts et les gains observés aux différentes étapes de développement du projet, ou à l'inverse les pertes induites par le processus appliqué.

Ces données seront récoltées et analysées régulièrement pendant le stage, ceci dans le but d'évaluer et d'améliorer en continu les composantes méthodologiques du projet.

1.2.3. Documentation et transmission des connaissances

La recherche est un outil visant à compléter des connaissances existantes ou à en créer de nouvelles, mais son intérêt est avant tout collectif et réside dans le partage et la transmission de ces connaissances. Dans le contexte de ce stage, le travail de documentation s'inscrit dans la continuité d'un effort de recherche et de synthèse sur l'apprentissage des méthodes et des technologies impliquées. Ainsi, les documents produits n'ont pas vocation à être figés ni exhaustifs, et seront amenés à être modifiés, complétés, mis à jour à mesure que l'état des connaissances avancera, et que les technologies qu'ils concernent évolueront.

Notices : documenter et transmettre un savoir-faire.

Le terme de notice désigne un document généralement succinct renseignant le fonctionnement d'un objet (machine, méthode, procédé, ...), ainsi que la ou les manières de l'utiliser ; c'est un outil sur lequel l'utilisateur pourra s'appuyer pour mieux appréhender et comprendre l'objet en question.

Les notices réalisées durant ce stage incluront essentiellement des informations de « bas niveau », c'est-à-dire des informations qui se rapprochent de la série d'instructions pas à pas pour la réalisation de tâches précises⁶ ou de la documentation de fonctionnalités une à une⁷. Ces deux approches de documentation permettent de transmettre un savoir-faire, des méthodes, des marches à suivre pour obtenir un résultat prédéfini. Ou, à l'inverse, de transmettre des connaissances brutes, des données qui pourront être utilisées, recombinaisonnées, réinterprétées pour acquérir une compréhension plus profonde des mécanismes abordés.

Dans notre cas, les notices constitueront un support privilégié pour consigner ce qui a été appris et développé sur la partie technique du stage, à savoir le déploiement, l'utilisation et l'entretien des outils de prototypage rapide, indépendamment du contexte de leur utilisation.

6. e.g. cf. Annexes, § Notices, *Préparation d'un modèle pour l'impression 3D*.

7. e.g. cf. Annexes, § Notices, *Slicing*.

Documentation et continuité de la connaissance.

Les technologies de prototypage rapide, situées au centre de la réflexion, sont un domaine qui intéresse un public de plus en plus large, et les ressources disponibles en ligne pour en apprendre plus sont nombreuses, mais éparses. La réalisation d'un corpus documentaire de recherche représente donc un travail conséquent, mais qui permet à terme de limiter le temps d'apprentissage et d'expérimentation avec ces technologies pour leurs futurs utilisateurs.

L'attention accordée à la documentation des aspects techniques du stage par le biais des notices, ainsi que par la rédaction de ce mémoire, s'inscrit dans une logique de synthèse du travail de recherche effectué, des hypothèses émises, des démarches et des conclusions qui le constituent ; elle permet ainsi de maintenir la continuité des connaissances en assurant leur transmission.

1.3. Méthodologie et hypothèses

1.3.1. Méthodologie adoptée

Le travail réalisé au cours de ce stage a nécessité deux approches de recherche complémentaires. La première est une approche d'expérimentation directe, autant au niveau de la conception que du processus, afin d'enrichir le projet du meuble en lui-même ; la seconde est une approche de recherche documentaire, visant à acquérir les nouvelles connaissances nécessaires à l'utilisation des outils du stage.

Recherche par l'expérimentation : stage pratique.

L'ensemble du travail réalisé pendant le stage se base sur une démarche empirique, particulièrement utilisée dans les secteurs de recherche exigeant un certain degré d'innovation. Celle-ci se retrouve au niveau de la conception en intégrant la production et l'analyse systématique de maquettes intermédiaires, et au niveau du processus en instaurant une dynamique de critique et d'adaptation de l'organisation. Étant donné la petite échelle du projet et le nombre limité d'acteurs, l'étude peut porter sur des cycles courts de production, de l'ordre d'une à deux semaines, rendant possible la multiplicité des tests et expériences menés. En terme de conception, cela permet d'opérer un découpage simple des tâches, étapes et objectifs à atteindre, tout en laissant la place à une meilleure réactivité que sur des temps longs et en donnant toute latitude à des adaptations « à la volée ».

Afin de faciliter l'étude développée dans ce mémoire, le déroulement du stage est rythmé par la rédaction de rapports d'activité hebdomadaires. Ces documents permettent chaque semaine de résumer les objectifs, ce qui a été fait et ce qui reste à faire. Pendant le stage, leur rôle est de clarifier les attentes et les avancements, mais aussi de relever les problèmes rencontrés et les adaptations réalisées. Dans le cadre de la rédaction de ce mémoire, ils constituent en un sens le « journal » du stage, des documents permettant de retracer les évolutions de fond dans l'approche et le raisonnement adoptés, ainsi que les différents moments-clés dans le processus de conception.

Concrètement, l'utilisation d'une démarche empirique va grandement influencer sur la méthode de conception du projet en lui-même. Au cours de ce stage, un travail par référence est favorisé pour la conception du meuble, en adoptant une logique de recherche de modèles existants (objets similaires ou aux fonctionnalités comparables, mécanismes, éléments, ...). L'analyse de ces références par intégration directe (modélisation, reproduction) ou en les transformant (adaptation d'une partie, réutilisation du concept) est alors un moyen d'accumuler de l'expérience, de confirmer des hypothèses de conception – ou à l'inverse à les écarter –, et d'élargir la vision qu'on a des possibilités de projet.

Recherches documentaires : ressources en ligne.

Le travail de conception effectué est assisté par un travail de recherche documentaire sur les domaines abordés au cours du stage, à savoir les techniques de prototypage rapide. L'intérêt est ici de se construire une image globale des techniques et outils mis en œuvre, d'une part dans une démarche d'apprentissage pour saisir leur fonctionnement et l'appliquer dans la conception du projet (tutoriels, documentations techniques, guides pratiques, ...) ; d'autre part dans le but d'acquérir une certaine compréhension non seulement de l'histoire de ces technologies, leurs évolutions passées ou à venir, mais aussi de se faire une idée de l'utilisation qui en est faite dans la pratique, par les architectes, les industriels, ou encore les particuliers (articles, actualités, forums, sites communautaires, ...).

L'ensemble de ces ressources constituent donc une base de données souvent informelle qui permet de s'auto-former à l'utilisation des technologies de prototypage rapide et d'en comprendre les usages et pratiques, mais aussi d'en envisager les futures avancées avec le grand nombre d'entreprises qui s'investissent dans l'innovation de ces outils, les rendant de plus en plus

efficaces, rapides et/ou plus riches en possibilités (impression de modèles 3D à grande échelle, matériaux avec des propriétés mécaniques spécifiques, ...).

1.3.2. Hypothèses et objectifs de l'étude

Le questionnement qui est à l'origine du sujet de recherche de ce mémoire part d'un double constat. Premièrement, un constat de fait : la pratique architecturale se doit d'intégrer un nombre de concepts croissants à mesure que les réglementations, les exigences diverses et les techniques constructives évoluent et se complexifient, conduisant à une situation où le temps perçu paraît très court. Il n'est ainsi pas rare que le travail de maquette soit écarté du processus de conception, pouvant apparaître comme une perte de temps face aux impératifs des dates-butoir.

Le second constat concerne la démocratisation depuis déjà plusieurs années de certaines technologies liées au prototypage rapide, qu'elles soient numériques (logiciels de modélisation, plate-formes de partage de modèles, communautés DIY « Do It Yourself », ...) ou physiques (techniques d'impression 3D, d'usinage non industriel, ...). L'utilisation par le grand public de ces outils, qui permettent de fabriquer dans des temps courts des objets autrement plus longs et complexes à fabriquer avec des méthodes traditionnelles, contribue à l'apparition de très nombreuses ressources en ligne permettant de se former à leur utilisation.

Ainsi, afin d'éclairer le sujet de recherche et les objectifs de l'étude, nous établirons trois hypothèses qui découlent de ces constats :

- 1- La maquette en architecture est un outil qui peut ouvrir de nombreuses possibilités à toutes les étapes de la conception, plus particulièrement dans les cas de projets complexes où les moyens de représentation classiques (dessin, géométraux, ...) et numériques (image de synthèse, modèle interactif, ...) ne permettent pas d'en appréhender les différents aspects caractéristiques (volumétrie, séquences, textures, ...) avec la sensibilité et/ou la précision nécessaire à leur compréhension ;

- 2- Les outils de prototypage rapide, avec l'utilisation des technologies numériques (maquettage numérique, simulation, ...) qui y sont associées, permettraient de rendre plus simple la production de maquettes à moindre coût dans des temps raisonnables, à destination des différentes étapes de la conception comme de la communication autour de projets architecturaux ;

- 3- Le processus de conception architectural est en mesure d'intégrer les démarches de conception propres aux techniques de prototypage rapide en complément des méthodes déjà en œuvre, afin d'augmenter significativement la capacité de développement de certains projets d'architecture en favorisant les démarches d'amélioration continue.

Sur base de l'ensemble des données disponibles, nous nous attacherons dans la suite de ce mémoire à confirmer ou infirmer ces hypothèses, en partie ou en totalité. Que ce soit l'expérimentation au cours du stage, l'expérience personnelle, les ressources en ligne, ou encore des ouvrages théoriques, en croisant ces différents degrés d'analyse, nous viserons à élaborer un modèle de processus de conception s'appuyant sur l'utilisation des technologies de prototypage rapide, et ainsi proposer une approche différente de la démarche de conception architecturale.

PARTIE 2 : Déroulement du stage

Au cours du stage, de nombreuses hypothèses ont été formulées et testées, que ce soit sur la conception même du projet de fabrication, ou sur les méthodes conceptuelles, pratiques, et organisationnelles. Cette méthodologie de recherche par l'expérimentation implique des changements fréquents, mais permet de développer des outils plus robustes que ce que permettrait un modèle purement théorique.

Dans cette partie, nous développerons le contexte du stage, ainsi que les méthodes et outils qui y ont été déployés, en s'attachant aux différentes évolutions qui ont conditionné et alimenté le travail de recherche.

2.1. Les outils utilisés

2.1.1. Organisation et gestion de projet

La gestion de projet est une démarche qui a pour objectif l'établissement des stratégies de développement et des méthodes de travail qui permettront de mener un projet à bien. Elle est définie en amont et permet d'assurer la cohérence organisationnelle tout au long du projet en établissant un planning (durée des étapes, dates butoir, ...), des objectifs (livrables, contrôle qualité, ...) et les rôles de chacun (attribution des tâches, interactions, ...).

L'organisation et la gestion de projet peuvent se faire à toutes les échelles, autant dans des structures importantes impliquant de multiples équipes travaillant sur des grands projets, que dans des structures plus restreintes, voire à titre individuel et/ou personnel. Cependant, le type et la taille de la structure, ainsi que le domaine traité et les exigences associées (architecture, industrie, design, logiciel, ...), vont influencer le choix d'une ou l'autre méthode, et ainsi conditionner les outils déployés pour la mettre en œuvre. Ces outils se présentent sous plusieurs natures complémentaires :

- **Outils physiques** : des méthodes traditionnelles (planning papier, tableau blanc, ...) ou plus innovantes (utilisation de Legos par Bit Planner par exemple), ces outils sont ancrés dans le réel et permettent de rendre visible par tous certaines des composantes du système organisationnel ;
- **Outils numériques** : souvent plus flexibles que des outils physiques, mais moins intuitifs, les outils numériques sont nombreux, que ce soit un simple tableur, une liste de diffusion, une application locale ou en ligne, ou encore un logiciel hyperspécialisé. En plus de fonctionnalités spécifiques, ils peuvent pour certains rendre possible l'accès partagé aux informations à distance et facilitent l'archivage et la traçabilité des actions ;
- **Outils sociaux** : les réunions, régulières ou exceptionnelles, les échanges de mail, de notes, et globalement tout ce qui concerne la communication entre les différents acteurs constituent les outils sociaux de la gestion de projet. Ils jouent un rôle important dans la cohésion de groupe et dans la transmission d'informations que les autres outils ne permettent pas nécessairement d'assurer.

Les critères recherchés.

Dans notre cas, nous avons besoin d'une méthode de gestion de projet qui corresponde à une activité de conception, avec un seul acteur travaillant en autonomie sur le projet, et une entité de contrôle et de décision constituée également d'une seule personne jouant le rôle du client. L'organisation choisie se devait ainsi d'être simple à utiliser afin de ne pas causer de surcharge de travail lors de son exploitation. De plus elle avait comme impératif de pouvoir s'adapter facilement aux imprévus, aux retards, ou aux nouvelles idées sans avoir à reprendre l'intégralité de l'organisation à chaque modification. Enfin elle devait permettre à tout moment de visualiser l'état du système, et de garder la trace de ce qui a été fait à des fins d'archivage des données de recherche.

Avec ces exigences explicitées, il a été décidé de s'orienter sur un système de « to-do list » prenant la forme de tickets de production (voir fig. 4) pour le découpage et l'organisation des tâches, chaque ticket correspondant alors à une tâche et regroupant les informations qui s'y relatent :

- **Le sujet**, décrivant en quelques mots en quoi la tâche consiste, et laissant suffisamment de place pour annoter d'autres informations (nature, pistes de recherche, questionnement, ...);
- **Le projet associé**, jouant le rôle ici de catégorie, comme par exemple une tâche de documentation, de recherche, de modélisation, dédiée à une partie spécifique du projet, ...;
- **Le statut**, renseigné par quatre cases de date, remplies ou non selon l'avancement : la date de planification, la date de début, la date de fin, et la date de validation par le client ;
- **La priorité (de 0 à 8)**, permettant d'indiquer l'importance relative d'une tâche, ou encore les dépendances entre tâches dans certains cas ;
- **La complexité (de 0 à 8)**, mesurant subjectivement les efforts (intellectuels ou matériels) à déployer pour la réalisation de la tâche ;
- **La durée estimée (de 0 à 8h)**, qui sert également de limiteur pour la complexité des tâches : une tâche de 8 heures ou plus peut généralement être redécoupée en sous-tâches plus courtes ;
- **La durée mesurée (de 0 à 8h)**, permettant de mettre l'accent sur les éventuelles erreurs d'estimation du temps que prend une tâche, et donc de corriger les estimations futures dans l'idée d'une amélioration continue.

En plus de permettre la visualisation claire et concise de chaque tâche à réaliser, l'utilisation de ce type de tickets a permis avec un effort minimum de classer et d'organiser les différentes actions effectuées pour le projet, mais aussi de les archiver pour pouvoir retracer précisément la chronologie de son développement.

Ce système a été utilisé de manière complémentaire avec des réunions en début de semaine, à l'issue desquelles les tickets existants étaient passés en revue, planifiés, modifiés, complétés, ou de nouveaux étaient ajoutés. Les tickets utilisés durant la semaine, quel que soit le statut de la tâche de chacun (planifiée, commencée ou terminée), permettaient alors de rédiger rapidement les rapports d'activités de fin de semaine.

S		Priorité			
		☆	☆	☆	☆
P		Complexité			
		☆	☆	☆	☆
		Durée Estimée			
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		Durée Mesurée			
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Planifié		Terminé			
Démarré		Validé			

fig.4: Exemple de ticket de production.

Appropriation du système : utilisation initiale.

Dans un premier temps, le nombre de tâches étant limité, les tickets étaient simplement organisés en quatre piles (fig. 5), correspondant aux différents statuts possible pour les tâches (non planifiée, planifiée, commencée et terminée). Les tickets passaient ainsi d'une pile à l'autre à mesure que leur statut changeait ; et une fois une tâche terminée, un nouveau ticket était simplement choisi dans la pile des tâches planifiées, ou à défaut des tâches non planifiées.

Cette première approche du système avait l'avantage d'être extrêmement tangible : la manipulation d'objets physiques à portée de main, sans déplacement depuis le poste de travail, permet de mieux se représenter son propre temps d'activité. Il comportait malgré des lacunes notables dès lors que le nombre de tickets augmentait, la hiérarchisation des tâches avec cette méthode étant peu lisible (l'information de priorité servant à cet effet étant

cachée), et menant à des incohérences dans les objectifs (trop de tâches à réaliser en trop peu de temps), une mauvaise utilisation du temps alloué, et l'accumulation de retards dans la réalisation de certaines tâches importantes.



fig.5: Utilisation initiale des tickets de production (simples piles).

Première adaptation : affichage et planification.

Afin de compenser les difficultés de gestion avec un système où la plupart des composantes (les tâches) sont cachées, un tableau blanc a été utilisé pour l'affichage et l'organisation des tickets au sein d'un planning hebdomadaire (fig. 6). Cette méthode permettait à tout instant de visualiser quelles tâches étaient terminées, commencées, ou encore à faire, ainsi que de les planifier à un moment précis de la semaine. Chaque jour, les tâches à faire pour la journée étaient détachées du tableau, puis leur statut était réévalué le soir : soit elles étaient terminées et archivées pour validation, soit elles étaient encore en cours ou non commencées et alors replanifiées dans la semaine, voire reportées à la semaine suivante.

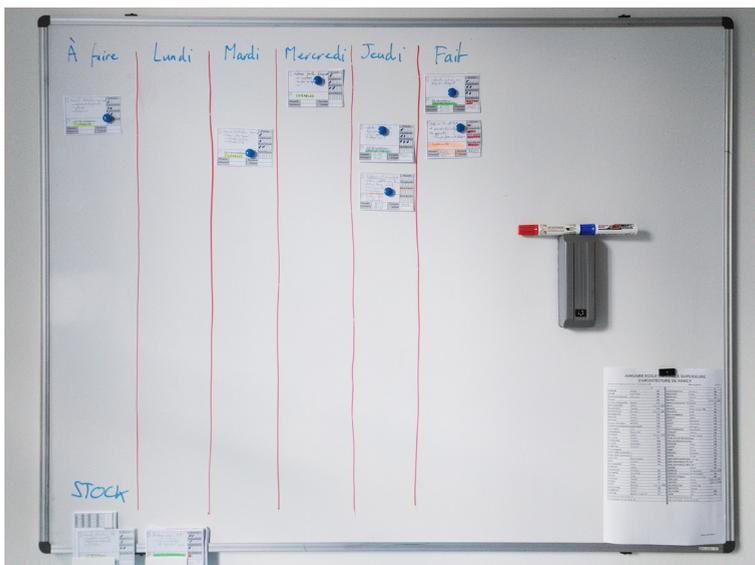


fig.6: Première adaptation du système de tickets (planification).

Malgré l'avantage de mieux visualiser la gestion du temps et des objectifs chaque semaine, ce système avait l'inconvénient d'être trop strict dans son utilisation, poussant à reporter indéfiniment certaines tâches afin de libérer du temps pour les précédentes. On observait ainsi les mêmes retards, en ajoutant en plus la difficulté de planifier des tâches plus longues ou des tâches de fond (recherche et documentation par exemple).

Seconde adaptation : simplification.

Le système a finalement retenu gardait le principe d'affichage sur un tableau blanc, mais en réduisant le nombre d'informations au strict minimum. La gestion jour après jour n'ayant pas eu l'effet escompté, nous sommes donc revenus à une organisation visuelle plus proche des pratiques des méthodes Kanban avec simplement une distinction entre les tâches à faire et les tâches en cours (fig. 7). Dès qu'une action est terminée, son ticket est classé pour ne pas encombrer la lecture du système. L'information de priorité est gérée par le positionnement du ticket sur le tableau (la plus haute priorité au-dessus), et la case de difficulté qui n'a pas eu d'usage réel dans l'organisation est ignoré.

On libère ainsi beaucoup d'espace en rendant l'affichage plus concis et plus simple à lire. La réduction de place disponible s'est avéré être un meilleur moyen d'éviter les retards, en poussant à se concentrer sur un nombre limité de tâches à la fois, tout en demandant moins de maintenance pour garder l'affichage à jour que les versions précédentes.

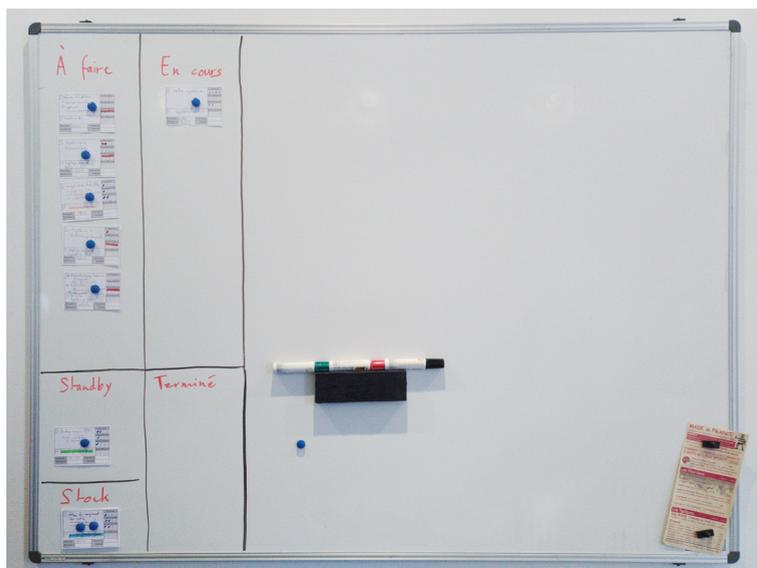


fig.7: Seconde adaptation du système de tickets (simplification).

2.1.2. Collecte et traitement des informations

Dans les domaines de la recherche comme de la conception, la collecte et le traitement des informations constituent une part importante du processus de création. Les informations en question sont de natures diverses (données expérimentales, travaux précédents, références, connaissances personnelles, ...), mais leur rôle est fondamental dans l'innovation, dans le sens où elles forment un socle à l'élaboration d'un concept, d'un produit, ou d'un objet nouveau.

Ce travail de recherche, effectué tout au long du processus de conception, revêt plusieurs rôles. Dans un premier temps, il permet de compléter l'expérience et les connaissances préexistantes sur le sujet étudié et d'apprendre de ce qui a été fait par d'autres personnes sur des sujets ou avec des enjeux similaires, ceci afin d'éviter d'effectuer un travail qui a déjà été fait et éprouvé, que ce soit un projet similaire, ou une solution apportée à un problème. Dans un second temps, la recherche permet d'enrichir la réflexion sur le projet en intégrant de nouvelles pistes (références, objets similaires, associations d'idées, ...), et en approfondissant les connaissances collectives.

Dans notre cas, la collecte et le traitement des informations sert à constituer du début à la fin du projet une base de références, de connaissances et de techniques qui pourraient être applicables dans le meuble que nous souhaitons réaliser. Elle se fait ainsi en plusieurs étapes :

- **La collecte d'informations brutes**, c'est-à-dire la recherche d'informations sur un problème donné (un mécanisme particulier du meuble par exemple), sans tri initial afin de constituer un catalogue de solutions sous différentes formes ;
- **L'analyse**, qui consiste à trier les informations brutes afin d'écartier ce qui paraît superflu, incomplet ou non applicable, et de les approfondir par des recherches complémentaires, ou dans des applications pratiques dans le projet ;
- **La synthèse**, pour hiérarchiser les informations analysées, les mettre en relation (documents explicatifs, manuels, cas d'application, ...) et les retranscrire pour les consolider en nouvelles connaissances intelligibles par autrui.

Pinterest : collecter et partager les idées.

Le site web Pinterest⁸ propose un service qu'il définit lui-même comme un « catalogue d'idées ». C'est d'une certaine manière un moteur de recherche alternatif et participatif, dans le sens où il est animé par une communauté qui référence du contenu d'autres sites webs (essentiellement des images) sous forme d'épingles, ensuite automatiquement associées à des thèmes.

Le choix d'utiliser ce service comme un outil de collecte de l'information initiale a été motivé par le principe même de fonctionnement du site. En effet, l'absence de hiérarchie dans le contenu affiché, ou encore la suggestion automatique d'images sur des thèmes proches ou associés, incitent fortement à explorer des pistes auxquelles on ne penserait pas de prime abord, ce qui est souhaitable dans la démarche de recherche d'idées où le résultat voulu n'est pas nécessairement connu.

En plus de la possibilité d'enregistrer ses propres épingles (et ainsi d'enrichir la base de données du service), Pinterest permet de sauvegarder celles d'autres personnes pour les consulter à nouveau plus tard. De plus, chaque utilisateur peut créer et gérer des tableaux (fig. 8), c'est-à-dire des regroupements d'épingles, ce qui permet de les classer selon des critères personnels, par nature par exemple (« Photographie », « Peinture », ...), par thème (« Architecture », « Design », « Textures » ...), ou encore par projet (« Atelier CFD », « Projet SDC », ...), ou toute autre classification jugée pertinente. Cette fonction permet ainsi de trier les informations collectées et de les retrouver simplement.

Enfin, une autre fonctionnalité importante de Pinterest est son aspect communautaire. Il est en effet possible de consulter les tableaux d'autres utilisateurs librement et de s'y abonner pour être notifié des dernières épingles ajoutées, mais aussi de partager un tableau avec un ou plusieurs utilisateurs spécifiques. Cette fonction permet donc à plusieurs personnes de créer un catalogue d'idées et de références communes.

Pinterest a ainsi été largement utilisé au cours du stage afin de trouver et d'organiser des références de systèmes pour la conception et la fabrication du meuble d'une part (mécanismes de levage, charnières en bois, assemblages, ...) ; et aussi d'avoir un aperçu de pratiques intéressantes dans le domaine de la fabrication (meubles, objets, accessoires et outils DIY par exemple) et de l'utilisation qui était faite de certains outils de prototypage rapide (disponibles ou non dans le cadre du stage).

8. Disponible à l'adresse <https://www.pinterest.com>.

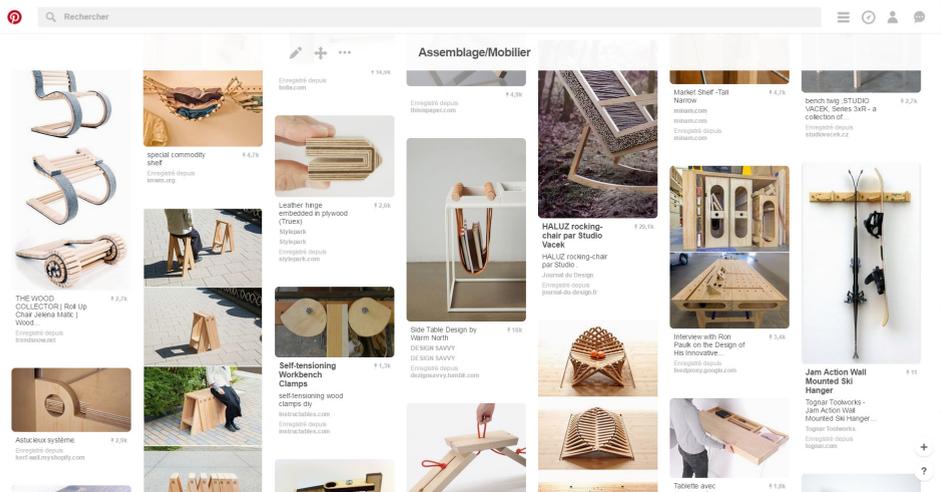


fig.8: Capture d'écran d'un tableau sur Pinterest.

Google Drive : stocker, organiser et partager l'information.

Au début du stage, la question du stockage des fichiers relatifs à son déroulement s'est rapidement posée. Même si l'essentiel du travail était effectué directement sur l'ordinateur mis à disposition au MAP-CRAI, une partie était réalisée sur un ordinateur personnel, soit par nécessité (impossibilité d'accès au local de travail), ou par commodité (travail à domicile ou sur une configuration logicielle particulière). Le besoin de pouvoir accéder aux fichiers du projet depuis plusieurs machines, en plus de l'exigence de transparence par rapport à l'avancement du projet, a mené à l'utilisation de Google Drive, un service de stockage et de partage de fichiers en ligne. On y retrouve les mêmes fonctions que n'importe quel gestionnaire de fichiers (organisation des documents en dossiers, opérations sur les fichiers, ...), avec en plus la possibilité de partager tout ou partie des fichiers avec un ou plusieurs collaborateurs rapidement.

Nous avons utilisé cet outil comme un espace de travail dématérialisé, dans le sens où l'ensemble des données du stage n'étaient pas stocké sur l'un ou l'autre des postes informatiques utilisés, mais sur un cloud avec lequel se synchronisaient lesdits postes pour garder en permanence la dernière version de chaque fichier. Il était ainsi possible de travailler sur les mêmes documents d'un ordinateur à l'autre de manière complètement transparente, sans avoir à réaliser de transferts manuellement, permettant par là même de gagner en confort de travail en minimisant le temps actif nécessaire à la gestion et au partage des fichiers.

En plus du stockage et du partage de documents, une des fonctions proposées dans Google Drive qui nous intéresse est l'intégration d'applications de bureautique courantes (traitement de texte, tableur, et présentations) accessibles via l'interface web, et permettant de créer et de modifier directement en ligne ces formats de fichier. À la différence des équivalents logiciels que l'on peut installer directement sur l'ordinateur de travail, ces applications en ligne permettent de travailler à plusieurs sur un même fichier simultanément.

Dans notre cas, ces applications auront été utiles notamment pour la rédaction et l'annotation de documents textuels au cours du stage, de la simple prise de note (cahier des charges, scénarios d'utilisation du meuble, ...) à la production d'éléments de documentation (rédaction des notices et des rapports d'activités) ; le tout en conservant l'ensemble des données du stage en un seul endroit, limitant ainsi les risques de perte des fichiers par dissémination des informations.

2.1.3. Technologies de prototypage rapide

Comme nous l'avons défini en première partie, les technologies de prototypage rapide permettent de fabriquer des pièces ou des objets parfois trop complexes pour être fabriqués avec des méthodes traditionnelles, de manière à la fois plus précise et plus rapide. Ce qu'on entend par « plus précise » et « plus rapide » va dépendre essentiellement des technologies utilisées et des caractéristiques de ce qui est fabriqué (pièces planes ou en volume, petites ou grandes dimensions, propriétés mécaniques recherchées, ...). Les procédés sont nombreux et évoluent rapidement, que ce soit dans la spécialisation (impression 3D pour le médical), l'innovation (impression de structures ou de pièces précises) ou la démocratisation (imprimantes 3D pour l'utilisateur lambda).

Parmi ces procédés, deux d'entre eux étaient présents directement sur le lieu du stage, et ont ainsi servi tout au long de la conception du meuble commandé. Nous avons ainsi à disposition une machine de découpe laser pour la fabrication de pièces et éléments à deux dimensions, ainsi que plusieurs imprimantes 3D permettant de fabriquer des éléments en volume plus complexes.

MLLASER ML-W1290 : découpe laser.

Le modèle de découpeuse laser disponible dans les locaux de l'ENSAN, produit par la société MLLASER, fonctionne avec un laser au dioxyde de carbone, permettant la gravure et la découpe de la plupart des matériaux non métalliques et non chlorés, dans la limite d'une certaine épaisseur dépendante de leur dureté. La zone de travail de de la machine permet la découpe dans des plaques allant jusqu'à 1 200 × 900mm, avec une précision de l'ordre du 10^e au 20^e de millimètre.

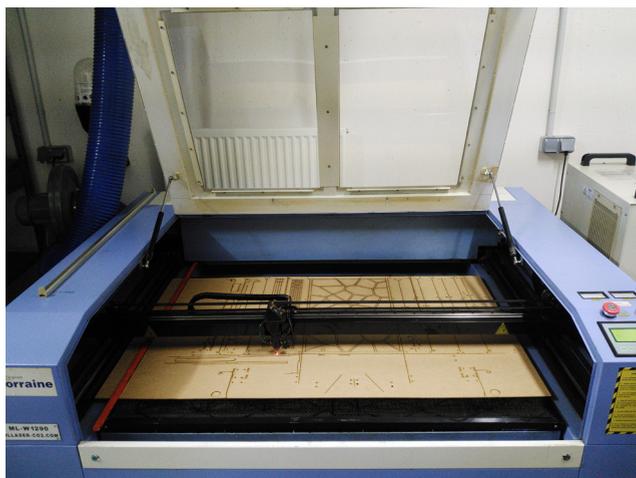


fig.9: Machine de découpe laser MLLASER ML-W1290.

Pour une utilisation non industrielle orientée pour la fabrication de maquettes, cette machine permet donc de découper la plupart des matériaux utiles, tels que le carton, le bois brut ou transformé (MDF, OSB, ...), le verre ou encore le PMMA, le tout dans des dimensions adaptées aux échelles des maquettes d'architecture. Pour chaque travail de découpe, le logiciel de pilotage va générer une série d'instructions (trajet, vitesse et puissance du laser) à partir d'un plan de découpe fourni par l'utilisateur, lesquelles seront ensuite exécutées par la machine.

Dans le cas de la conception d'un meuble dont l'ensemble des pièces sont planes, la découpe laser s'est imposée comme un outil privilégié pour la fabrication de maquettes fonctionnelles à échelle réduite. Tout d'abord, nous avons exploité la possibilité qu'avait la machine d'usiner des matériaux habituellement difficiles à travailler pour réaliser des maquettes en MDF, en limitant par là même le travail manuel au simple assemblage des pièces découpées.

Le meuble final devant être en bois, le MDF permettait également, dans une certaine mesure, de se conformer aux propriétés mécaniques du matériau final (frottements, rigidité des assemblages, résistance à la déformation et à l'écrasement), contrairement à une maquette qui aurait été réalisée en carton. De plus, la relative rapidité du processus a rendu possible la fabrication de maquettes de grande taille, d'abord au 1:5^e (maquettes de 36cm de haut) puis plus tard au 3:10^e (54cm de haut), échelle adaptée pour tester des dispositifs et des mécanismes particuliers, ainsi que le fonctionnement de l'ensemble du meuble.

L'utilisation de la découpe laser a ainsi été d'une aide majeure dans le processus de conception, dans la mesure où elle a permis de mettre à l'épreuve des hypothèses qui, autrement, n'auraient peut-être pas pu être testées avant la fabrication d'un prototype à échelle 1:1, et ce dans un temps plutôt court. En effet, chaque découpe a duré entre 20 et 40 minutes pour la plus longue (sans compter cependant le temps nécessaire à la préparation du fichier et aux différentes manipulations de la machine).

Open Edge : impression 3D.

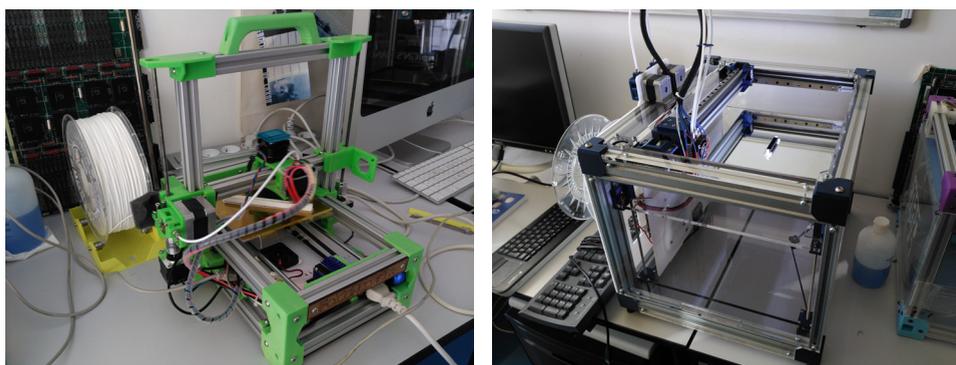
Open Edge est une société spécialisée dans la conception et la fabrication d'imprimantes 3D avec deux particularités principales. La première est que ce sont des imprimantes de type RepRap (pour *Replicating Rapid Prototyper*), c'est-à-dire en partie auto-répliquables, certaines des pièces étant elles-mêmes imprimées en 3D. Et la seconde est le caractère libre et open source des machines, du firmware aux modèles 3D imprimables des différentes pièces, ainsi que les plans de montage. Il est donc possible de fabriquer et d'assembler ces imprimantes 3D à moindre coût, rendant la technologie d'autant plus accessible, évolutive et durable. Les machines proposées utilisent une technique de fabrication additive, par dépôt de filament en fusion (FDM, pour *Fused Deposition Modeling*). Le filament, du plastique de type PLA dans notre cas, est ainsi chauffé et déposé en couches successives en suivant des instructions calculées à partir d'un modèle 3D analysé et découpé, fourni par l'utilisateur.

La bobine de filament étant peu onéreuse et permettant généralement de fabriquer un nombre plus ou moins grand d'objets en fonction de leur taille, cette technique d'impression 3D est intéressante pour son économie, tout en permettant d'imprimer des pièces parfois complexes, voire irréalisables à la main, avec une bonne précision (jusqu'au 10^e de millimètre) pour un temps

d'impression raisonnable (de quelques minutes pour de petites pièces à quelques heures pour des pièces de taille moyenne).

Au cours du stage nous avons eu à disposition plusieurs modèles d'imprimantes, ayant leurs propres caractéristiques, de la plus petite à la plus grande :

- **La FoldaRap**, un modèle d'imprimante 3D pliable et transportable, avec un volume d'impression de $140 \times 140 \times 140$ mm. C'est le premier modèle proposé par Open Edge comportant quelques défauts (décalages aléatoires en cours d'impression par exemple), mais permettant d'imprimer la plupart des pièces voulues malgré sa petite taille ;
- **La Mondrian**, un modèle plus récent permettant d'imprimer des pièces jusqu'à $200 \times 200 \times 200$ mm. Elle a été peu utilisée au cours du stage en raison de problèmes techniques et de pièces défectueuses ;
- **La Mondrian HD**, plus grande que le modèle précédent avec un volume de $300 \times 200 \times 200$ mm. Elle bénéficie de deux extrudeurs, permettant d'imprimer avec deux couleurs de filament, ainsi que d'une plus grande stabilité d'impression (axes solidaires évitant les erreurs et limitant les accrochages) ;
- **L'Alto 666**, une imprimante conçue pour la fabrication de grandes pièces, jusqu'à $600 \times 600 \times 600$ mm. Bien qu'elle était présente dans les locaux et prête à l'emploi, elle n'a pas été utilisée au cours du stage, les objets qui ont été imprimés en 3D ne dépassant jamais la quinzaine de centimètres de côté.



*fig.10: Imprimantes 3D utilisées durant le stage.
(à gauche : FoldaRap, à droite : Mondrian HD)*

Nous avons ainsi utilisé en majorité la FoldaRap et la Mondrian HD pour la réalisation de certains éléments pour les maquettes, comme les accessoires à des fins de représentation (ordinateur et tablette graphique) ; mais également pour tester certains mécanismes en faisant des extraits de maquette à plus grande échelle (1:2 et plus).

De plus, ces imprimantes ont également été utilisées en dehors du cadre de la conception de notre meuble, que ce soit pour des projets annexes ou à des fins de test. Les essais – et les erreurs – qui ont été réalisés ont ainsi servi à l'apprentissage des méthodes et bonnes pratiques pour parvenir à imprimer correctement des modèles 3D, puis dans un second temps à la rédaction des notices d'utilisation (répertoriées en annexes).

2.1.4. Logiciels

Le bon déroulement du stage a nécessité l'utilisation de logiciels spécifiques, aux différentes étapes du processus de conception et de l'utilisation des outils de prototypage rapide. On peut les distinguer en trois catégories :

- **Les logiciels de conception**, utilisés pour dessiner, modéliser, ou représenter le projet en lui-même, résultant en une maquette numérique ;
- **Les logiciels de pilotage**, qui permettent de contrôler un des outils de prototypage rapide à des fins de production de maquettes et/ou prototypes ;
- **Les logiciels intermédiaires**, jouant le rôle de passerelle entre les logiciels de conception et les logiciels de pilotage, le plus souvent en traduisant les données abstraites des objets (géométrie et tracés) en commandes bas niveau.

Autodesk AutoCAD : conception des plans de découpe.

AutoCAD est un logiciel de dessin assisté par ordinateur (DAO), déjà largement utilisé dans de nombreux domaines ayant recours au dessin techniques comme l'architecture, mais aussi l'urbanisme, l'ingénierie, l'électronique, le design, etc.

Il propose de nombreux outils d'édition avancés, parfois spécifiques à certaines disciplines (dessin tridimensionnel, modules IFC, ...), mais nous n'avons utilisé dans notre cas que les fonctionnalités de base du logiciel. En

effet, seuls les outils utiles à la réalisation de plans de découpe pour la découpeuse laser ont servi au cours du stage, à savoir :

- Les fonctions de tracé des primitives de dessin (lignes, polylignes, arcs de cercles, ...);
- Les fonctions d'édition (ajustement, fusion de tracés contigus, suppression des doublons, ...);
- Et la gestion de calques pour séparer les différents tracés en groupes distincts (utile pour l'organisation et l'optimisation du temps de découpe).

Les plans de découpe obtenus étaient ensuite exportés directement dans un format de fichier lisible par le logiciel de pilotage de la découpeuse laser, le DXF (pour *Drawing eXchange Format*) qui contiendra entre autres l'ensemble des tracés constituant le plan de découpe et leurs couleurs respectives (calques). Il est à noter qu'il existe de nombreuses alternatives gratuites permettant d'effectuer le même travail (par exemple nanoCAD, LibreCAD ou FreeCAD), mais elles n'ont pas été retenues, AutoCAD étant un logiciel déjà connu et ne nécessitant donc pas un apprentissage préalable pour son utilisation.

MLLasercut : pilotage de la découpeuse laser.

Le logiciel MLLasercut est un logiciel livré par le fabricant avec la découpeuse laser à laquelle il est associé. C'est un logiciel de pilotage dans la mesure où il joue le rôle d'interface entre l'utilisateur et l'outil, en assurant la conversion d'un plan de découpe en une série d'instructions compréhensibles par la machine. Il permet en outre d'effectuer un pilotage manuel de la découpeuse laser, en permettant entre autres de régler la position du laser selon les trois axes de translation, ainsi que d'amorcer, de mettre en pause, ou d'annuler un travail de découpe. L'interface graphique fournit également des outils d'édition basiques, incluant les primitives de dessin (lignes, polylignes, cercles, textes, ...), le déplacement et la modification des tracés, et des options pour la fusion des lignes contiguës en polylignes. Ces outils donnent la possibilité de corriger les erreurs mineures dans les plans de découpe sans avoir à réexporter le plan entier.

L'organisation des plans de découpe en calques dans le logiciel source (AutoCAD dans notre cas) permet à MLLasercut de séparer les tracés dans différents groupes qui pourront ensuite être configurés et ordonnés différemment. Cette disposition permet de gérer les paramètres du laser (vitesse et

puissance) et le type de traitement (découpe ou gravure surfacique) de chaque groupe, ainsi que l'ordre dans lequel ils seront exécutés, soit pour optimiser le temps de découpe (pour « forcer » la découpe de zones spécifiques en priorité), soit pour limiter le risque d'erreur dû au déplacement d'une pièce pendant le travail (par exemple, un mur qui se décalerait avant que les baies ne soient découpées).

Blender : modélisation 3D et maquette numérique.

La réalisation d'une maquette numérique du projet fait partie des exigences qui avaient été posées dès le début du stage. Pour y parvenir, nous avons utilisé Blender, un logiciel de modélisation, d'animation et de synthèse d'images 3D à la fois libre et open source. Le choix de ce logiciel plutôt que d'un autre (comme 3D Studio Max, Rhinoceros, ou encore Sketchup) a été motivé non seulement par sa gratuité, mais aussi par la maîtrise personnelle de ce logiciel, évitant ainsi d'ajouter au travail de conception et de modélisation un effort d'apprentissage d'un nouveau logiciel qui ne fait pas partie de l'étude. Ainsi, Blender est un logiciel de modélisation géométrique non enrichie : les objets sont modélisés à l'aide de maillages (points, arêtes et facettes) sans y ajouter d'information sémantique (par opposition par exemple aux pratiques du BIM), peu utile dans la conception à l'échelle d'un meuble.

Le travail de conception peut ainsi être réalisé avec l'existence d'outils de modélisation avancée, permettant d'économiser beaucoup de temps et d'énergie sur certains aspects (copies dynamiques, modélisation en miroir, optimisation du maillage, ...). Ces mêmes outils permettent également d'extraire rapidement une projection de l'ensemble des pièces composant le meuble, qui servira alors de base pour la réalisation d'un plan de découpe avec AutoCAD.

Blender intègre également, en plus des outils de modélisation, la gestion de contraintes d'objets, c'est-à-dire des opérateurs qui vont permettre d'imiter certains comportements mécaniques comme des assemblages, des articulations, ou encore des appuis – sans pour autant les simuler physiquement. Utilisés conjointement avec les outils d'animation, elles sont utilisées dans le travail de conception pour modéliser les mouvements des parties mobiles du meuble et ainsi contrôler les interactions des pièces durant ces mouvements.

Enfin, dans la continuité du processus de conception par le prototypage rapide, Blender intègre en plus des outils classiques des fonctions dédiées à l'impression 3D. Cela inclut la vérification de l'intégrité des modèles 3D destinés à être imprimés, leur réparation lorsque cela est possible, et leur export

vers un format de fichier adapté à l'impression 3D, le STL (STéréoLithographie), mémorisant uniquement les données géométriques du modèle.

Le choix de Blender pour la modélisation d'une maquette numérique fonctionnelle permet ainsi de couvrir l'ensemble des étapes de conception du meuble, de la visualisation à la préparation des maquettes. Cette utilisation vise à limiter le plus possible les ruptures dans le processus de conception, en réunissant dans un seul modèle toutes les problématiques liées à la demande initiale.

Slic3r : conversion des modèles 3D en fichiers pour l'impression.

Le slicing (de l'anglais *slice*, découper en tranches fines) est assuré par le logiciel libre Slic3r. Cette étape consiste à découper un modèle 3D numérique en une succession de sections horizontales, qui seront ensuite traduites en instructions compréhensibles par les imprimantes 3D utilisant les méthodes de fabrication additives, dans notre cas par dépôt de filament en fusion. Slic3r permet ainsi de convertir les données géométriques d'un modèle 3D (maillage tridimensionnel) en commandes bas niveau (G-Code), qui permettront de reproduire l'objet couche après couche. Ces instructions incluent notamment des séquences de déplacement de la tête d'impression, l'extrusion ou la rétraction de fil, les variations de température de la tête et du plateau, ou encore l'activation des ventilateurs et les changements d'extrudeur.

Le logiciel permet dans un premier temps d'importer un ou plusieurs modèles dans différents formats, dont le format STL, et de les organiser sur une représentation virtuelle du plateau de l'imprimante 3D. Il est possible d'effectuer des transformations simples sur les objets importés directement dans le logiciel, comme la rotation, la mise à l'échelle, ou encore la section et la réparation des modèles (quand cela est possible).

Slic3r met ensuite à disposition de nombreux paramètres pour gérer à la fois le profil de l'imprimante (nombre d'extrudeurs, diamètre d'extrusion, dimensions du plateau, ...), les propriétés du fil (diamètre du filament, températures de fusion, refroidissement, ...), mais aussi et surtout les paramètres d'impression du modèle. Ces derniers permettent de gérer l'ensemble des options qui vont influencer sur la qualité du modèle (épaisseur de couche, densité de remplissage, vitesse d'impression), voire conditionner le succès ou l'échec de l'impression (supports pour les porte-à-faux, structure pour améliorer l'adhérence de la pièce au plateau, ...).

AstroPrint/OctoPrint : pilotage à distance des imprimantes 3D.

AstroPrint et OctoPrint sont tous deux des serveurs d'impression 3D en réseau libres et open source, permettant ainsi de piloter une imprimante 3D via une interface web, soit sur un réseau local, soit sur un réseau ouvert. Chacun de ces programmes est capable de fonctionner sur une Raspberry Pi⁹ en installant un système Linux sur lequel il est préinstallé (respectivement AstroPi et OctoPi). La Raspberry Pi ainsi configurée est directement branchée à l'imprimante 3D, et assurera la communication et l'envoi des commandes pour le pilotage de la machine sous forme d'un flux de données.

AstroPrint étant développé à partir du code source d'OctoPrint, leur fonctionnement est similaire, mais s'adresse à des publics différents¹⁰. Ils proposent tous les deux le stockage de fichiers G-Code, contenant les instructions d'impression, et leur exécution par l'imprimante. Ils mettent également à disposition des outils de pilotage manuel simples (déplacements, extrusion, gestion des températures et des ventilateurs) ou avancés (console G-Code), essentiellement pour réaliser des tests ou de la maintenance. Ces contrôles, accessibles depuis une interface web, permet de gérer de manière simple l'imprimante 3D depuis n'importe quel poste connecté au réseau, que ce soit un ordinateur, une tablette ou un smartphone.

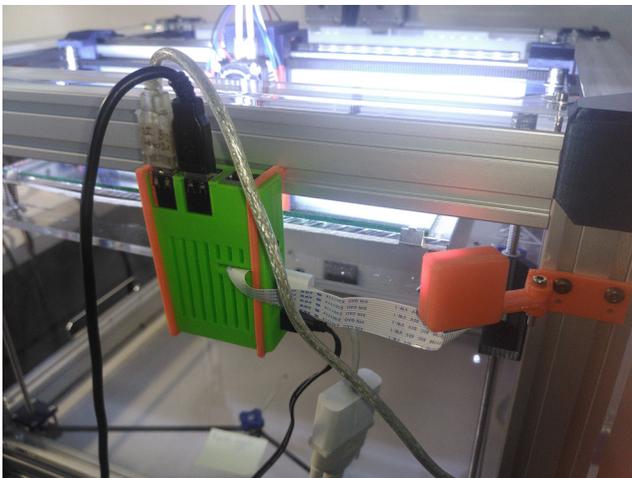


fig.11: Installation d'une Raspberry Pi (boîtier vert) avec caméra embarquée (boîtier orange).

9. La Raspberry Pi est un modèle de nano-ordinateur monocarte, réunissant les composants strictement nécessaires à l'exécution des systèmes d'exploitation libres GNU/Linux, sur les dimensions d'une taille de crédit.

10. cf. Annexes, 5 Notices, *Installation et déploiement d'AstroPrint/Octoprint.*

Le dispositif installé consiste ainsi en un nano-ordinateur (Raspberry Pi) embarquant un serveur d'impression (AstroPrint ou OctoPrint), directement branché à l'imprimante 3D qu'il pilote. Cette installation permet de limiter le risque de rupture du flux de données des commandes, lequel pourrait causer l'échec de l'impression, voire des dommages matériels (surchauffe du plastique, encrassement de la tête d'impression, ...). Cependant, ce système ne remplace pas la surveillance humaine, dans la mesure où ni l'imprimante 3D ni le serveur d'impression ne sont en mesure de contrôler la qualité du modèle imprimé ou de détecter des problèmes pendant la fabrication (pièce qui se détache, décalage du plateau, filament épuisé, ...), et continueront le processus d'impression jusqu'à fin des commandes ou intervention de l'opérateur.

2.2. Processus de conception détaillé

2.2.1. Organiser le travail : les méthodes agiles

Le processus de conception adopté se base sur les principes des méthodes agiles, en cherchant à les mettre en application dans une certaine mesure à l'échelle réduite du stage. En particulier, nous nous sommes inspirés des méthodologies Scrum, en adoptant trois principes-clé :

- **L'itérativité de la conception**, pour assurer une meilleure réactivité face aux imprévus, aux changements d'exigences et aux nouvelles idées. Le projet se développe sous forme d'itérations successives, c'est-à-dire des versions intermédiaires et fonctionnelles du projet que l'on conservera, et qui marqueront les différentes étapes d'avancement du projet ;
- **L'amélioration continue**, qui consiste à remettre périodiquement en question le projet d'une part, mais aussi le processus de conception en lui-même. Des réunions et des rétrospectives régulières s'intègrent ainsi dans le déroulement du stage afin de proposer de nouvelles manières de faire et de favoriser le changement lorsque celui-ci est nécessaire ;
- **La lucidité dans la production**, c'est-à-dire ne pas promettre plus que ce que l'on peut effectivement produire. Une approche lucide du travail à réaliser impliquera un découpage en tâches simples et une organisation du temps en cycles de développement courts d'une à

deux semaines dans notre cas, appréhendables à l'échelle d'un acteur du projet.

2.2.2. Déroulement de la semaine-type

Les jours de travail du stage s'étalant sur 4 jours par semaine, du lundi au jeudi, avec pour objectif d'aboutir en fin de semaine à la production systématique d'une maquette physique rendant compte de l'avancement du projet. Le processus se déroule ainsi en cinq grandes étapes : la réunion hebdomadaire, l'application des correctifs, la conception sur maquette numérique, la fabrication de la maquette intermédiaire, et la rédaction du rapport d'activité.

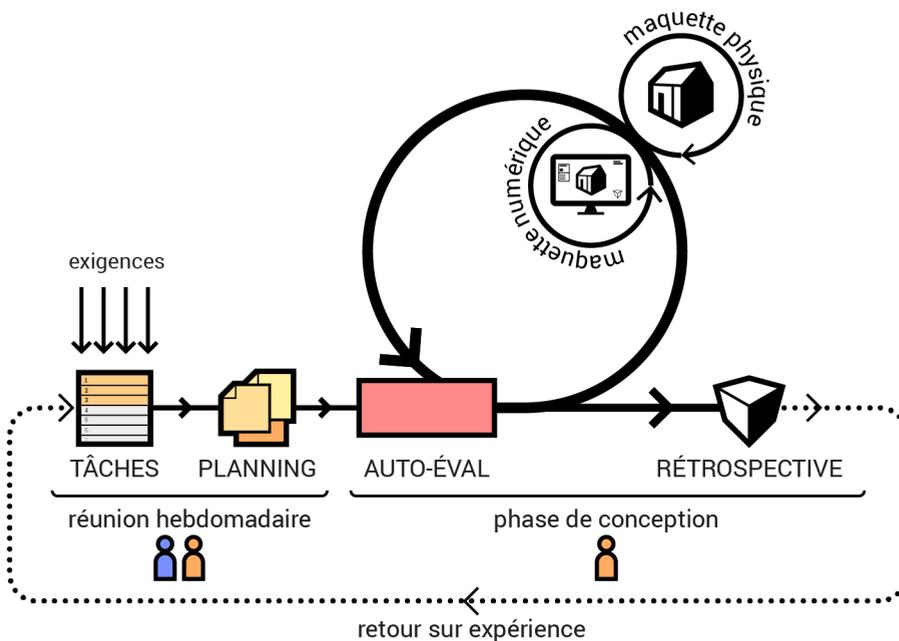


fig.12: Déroulement de la semaine-type.

Réunion hebdomadaire (½ journée).

La réunion hebdomadaire est généralement programmée le lundi matin, et marque le début du cycle de développement par une revue de projet. Elle consiste en une discussion informelle entre les acteurs du projet (client et concepteur), dont le rôle est d'assurer le suivi de la conception, éventuellement de proposer de nouvelles évolutions ou de nouvelles méthodes de travail, ainsi que de définir les tâches de la semaine. Elle s'organise naturellement au fil de la discussion en plusieurs actions.

En premier lieu, la réunion s'appuie généralement sur la maquette intermédiaire produite à l'issue de la semaine précédente. Celle-ci sert ainsi de support pour repérer et identifier sous forme d'annotations les problèmes d'ordre technique (frottements, mécanisme non fonctionnel, erreurs dans la modélisation, ...), mais aussi les problèmes d'ordres ergonomique et/ou esthétique (manipulations, poids, aspect visuel, ...). En plus de l'aspect pratique de cette méthode d'annotation, les idées sont mieux contextualisées que sur des notes indépendantes et seront ainsi plus facilement exploitables par la suite.

En plus d'un retour sur la maquette et l'avancement du projet, la réunion est l'occasion de mettre en perspective de nouvelles pistes d'évolution du projet (nouvelles fonctionnalités, systèmes alternatifs, optimisation, ...). Ce travail préparatoire de la phase de conception consiste généralement en une réflexion sur des points particuliers. Celle-ci se concentre sur la résolution de problèmes, nouveaux ou constatés, par une activité de veille technique (recherche de références ou de solutions similaires à l'aide d'outils comme Pinterest) et par le dessin.

Ainsi, à l'issue de chaque réunion, l'ensemble des problèmes et questionnements liés à la conception ont été adressés, et ont abouti soit à une solution, soit à une piste de solution. Les objectifs à atteindre d'ici la fin de la semaine sont également définis à ce moment, et retranscrits en tâches simples grâce au système de tickets de production décrit plus tôt.

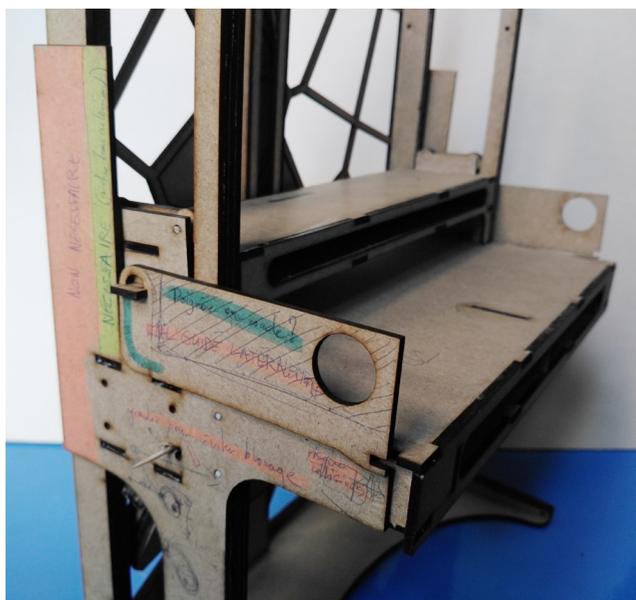


fig.13: Phase d'annotation de la maquette du meuble.

Application des correctifs (½ journée).

L'application des correctifs se fait après la réunion hebdomadaire, idéalement le jour même. Les annotations faites sur la maquette permettent de distinguer les tâches concernant soit des problèmes nécessitant un travail de conception (dessin de nouvelles pièces, variante d'un mécanisme, ...), soit à l'inverse des problèmes immédiatement résolubles (comme un assemblage mal calibré) ou avec une solution déjà trouvée (ajout d'une pièce de guidage par exemple). Ces derniers sont souvent simples et rapides à corriger avec un minimum de réflexion, mais peuvent généralement lourdement impacter la fonctionnalité de la maquette, et par extension du projet final : un jeu trop faible entre deux pièces pourra générer des forces de frottement indésirables, empêchant de vérifier le fonctionnement d'un mécanisme ; ou encore un percement manquant ou une pièce trop grande empêcheront complètement l'assemblage de la maquette.

C'est pourquoi ces problèmes sont traités le plus tôt possible après la réunion hebdomadaire bien qu'ils ne soient pas prioritaires pour l'avancement du projet. Ceci permet d'éviter que ces points ne soient oubliés ou négligés, et qu'ils resurgissent plus tard lors de la fabrication de la maquette. Ainsi, une fois l'ensemble des correctifs effectués, il est possible de concentrer le travail de conception sur les points qui demandent de l'attention, en partant d'une base fonctionnelle.

Modélisation sur maquette numérique (1 journée).

La phase de modélisation du projet correspond au travail de conception à proprement parler, et se voit consacrer au minimum une journée complète chaque semaine. L'objectif est de faire progresser l'état courant du modèle (matérialisé par la maquette physique de la semaine précédente) vers une nouvelle itération du projet, celle-ci ayant pour principale contrainte d'être fonctionnelle en fin de cycle. Le travail de conception qui permet d'arriver au niveau de finition voulu s'organise différemment selon ce qui a pu être dit en début de semaine, mais se fait globalement en deux étapes.

La première étape consiste à analyser et à croiser les données réunies lors de la réunion hebdomadaire, dans le but d'assimiler leur fonctionnement (mécanismes, assemblages, ...), leurs implications, et leurs éventuelles applications dans le projet. Il s'agit ici de faire le tri entre les différentes propositions, parfois inadéquates ou incomplètes, afin de pouvoir soit les éliminer, soit les intégrer au projet. Cette étape de recherche et de réflexion est suivie

par l'intégration concrète des solutions trouvées dans la maquette numérique, impliquant à la fois des modifications des pièces existantes et l'ajout de nouveaux éléments. L'ensemble du travail à ce stade est réalisé par la modélisation en 3D directement dans le logiciel Blender. L'utilisation de la maquette numérique permet de visualiser immédiatement les modifications et leurs impacts sur la fonctionnalité du meuble – notamment par rapport aux mouvements possibles des pièces, et les éventuelles collisions.

Au terme de cette étape de conception, la maquette numérique représente un état idéalement fonctionnel, mais surtout réalisable en vue de la production d'une maquette intermédiaire qui servira à tester la validité des hypothèses de conception apportées.

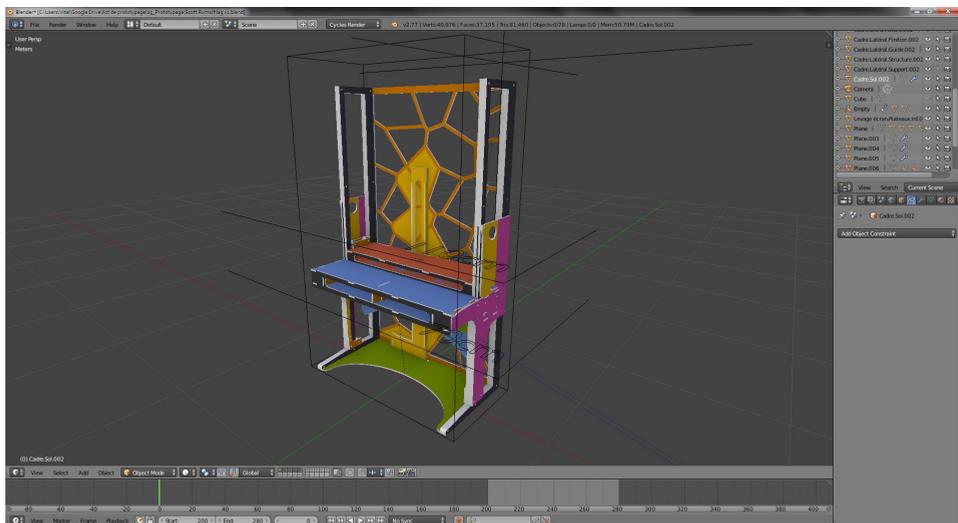


fig.14: Maquette numérique du meuble, réalisée dans le logiciel Blender.

Fabrication de la maquette intermédiaire (1 journée).

La fabrication de la maquette intermédiaire se déroule sur une journée, et est assistée par l'utilisation des méthodes de prototypage rapide à disposition, à savoir la découpe laser et l'impression 3D. Elle se passe en trois temps : la préparation des fichiers de découpe et/ou d'impression, la réalisation des pièces, et leur assemblage. Étant donnée les dimensions des maquettes réalisées (au 3:10 pour l'objet complet, au 1:2 pour des extraits de système), la préparation des fichiers et la fabrication des pièces prend généralement la première moitié de la journée, tandis que l'assemblage de la maquette physique en occupe la seconde moitié.

La maquette est annotée au cours de son assemblage si nécessaire pour indiquer les difficultés et/ou erreurs rencontrées (ordre de montage particulier par exemple). Une fois entièrement assemblée, une première revue de la maquette est réalisée en autonomie par le concepteur seul, et de nouvelles annotations sont ajoutées si nécessaire pour commenter « à chaud » les différents aspects du produit (fonctionnel, ergonomique et esthétique).

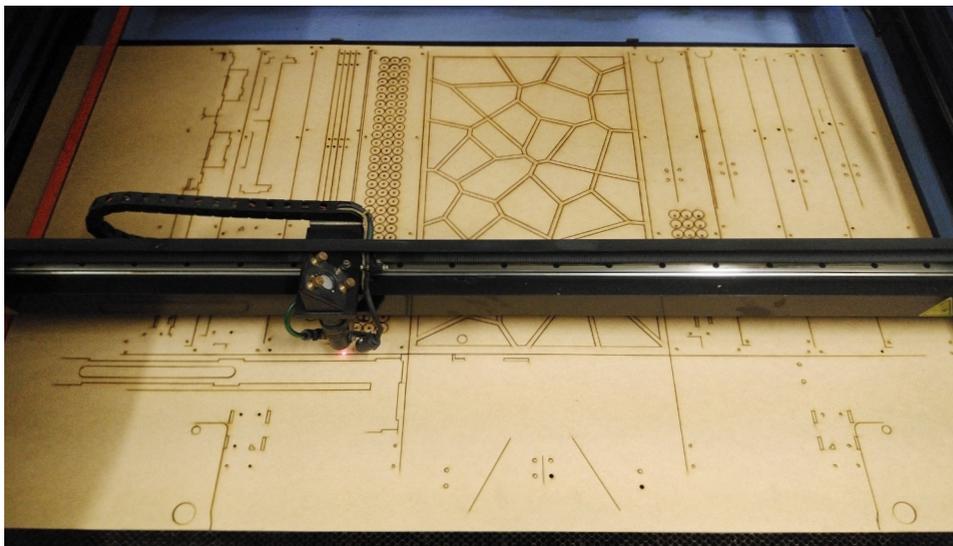


fig.15: Découpe des plans de la maquette numérique.

Rédaction du rapport d'activité (quelques minutes).

À la fin du cycle de développement, un rapport d'activité hebdomadaire est rédigé afin de faire le bilan de la semaine de manière la plus concise possible. Il est l'occasion de faire une rétrospective du travail effectué, rappelant tout d'abord les objectifs qui devaient être atteints et les tâches qui devaient être réalisées ; puis précisant ce qui a effectivement été fait au cours de la semaine ; et enfin énonçant ce qui reste à faire, ou ce qui devra être fait lors du cycle suivant.

En plus d'être un moyen de prendre du recul sur le travail et son processus de conception, le rapport d'activité permet de préparer la réunion suivante, dans le sens où il synthétise dans un format court (environ une page) l'ensemble des informations concernant l'évolution du projet depuis la fin du cycle précédent.

2.2.3. Techniques de modélisation pour la maquette numérique

La maquette numérique occupe un rôle central dans le processus de conception que nous venons de décrire. Elle synthétise l'ensemble des réflexions du projet dans un seul modèle 3D, et sert de base à chaque nouvelle itération. L'intégrité et la cohérence de la maquette numérique permettent d'assurer le bon déroulement du travail de conception, et implique ainsi la mise en place d'un certain nombre de principes et techniques de modélisation.

Modélisation objet : faciliter l'édition des pièces.

Le meuble destiné à être réalisé est constitué de plusieurs parties fonctionnelles, chacune constituée de pièces distinctes, indépendantes ou liées. Dans le but de simplifier le plus le possible le travail de conception, la maquette numérique va mettre à profit les principes de la modélisation objet et les fonctions d'organisation de l'environnement de travail, à savoir le logiciel de modélisation Blender.

Dans notre utilisation du logiciel, chaque pièce est tout d'abord modélisée séparément dans un objet unique, ayant ainsi ses propriétés propres (maillage, position, transformations, ...). Cette disposition permet de modifier indépendamment chaque pièce, d'en ajouter, d'en supprimer, ou encore de les isoler sans interférer avec d'autres éléments déjà modélisés, rendant ainsi le travail de conception plus confortable.

En second lieu, chaque pièce modélisée est placée sur un des calques différent, permettant ainsi de les regrouper selon le module fonctionnel auquel elles appartiennent – à savoir, cadre structurel, système de levage du plateau, système de levage de l'écran, guidage vertical, et tiroir de la tablette (fig. 16). Ainsi, en gérant quels calques sont affichés, on peut facilement limiter l'affichage à une seule partie du meuble pour concentrer le travail sur un point précis, ou au contraire afficher deux ou plus parties pour en voir les interactions, voire l'ensemble du projet pour visualiser l'intégralité des systèmes.

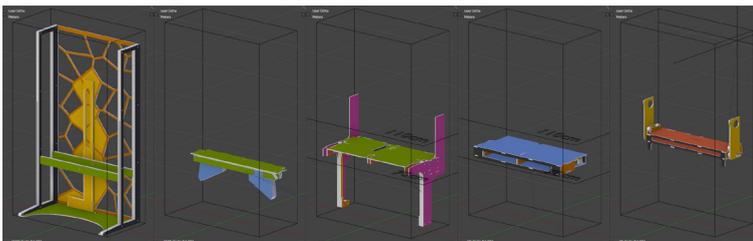


fig.16: Gestion des calques et modules fonctionnels de la maquette numérique.

Modifieurs et copies liées : optimiser l'efficacité du travail.

La conception du meuble amène la création d'un grand nombre de pièces avec des données invariantes, comme par exemple l'épaisseur des pièces qui seront découpées, le caractère symétrique de certaines pièces, ou encore certains éléments qui apparaîtront en plusieurs exemplaires. Si la modélisation en premier lieu de ces éléments ne pose généralement pas de problème, leur modification peut constituer une charge de travail supplémentaire et induit un risque d'erreur ou d'oubli en démultipliant les actions nécessaires. Pour éviter cela, nous utiliserons deux fonctionnalités particulières de Blender : les copies liées et les modifieurs.

Une copie simple d'un objet crée une copie identique mais indépendante de l'objet d'origine et de ses propriétés. À l'inverse, une copie liée se comporte comme une instance de l'objet original, c'est-à-dire qu'il partage avec lui certaines de ses propriétés, et notamment son maillage. Cela signifie que les modifications effectuées sur l'un de ces deux objets se répercutent automatiquement sur l'autre. Ceci permet d'avoir plusieurs exemplaires d'une même pièce dans le projet (les roues ou les contrepoids par exemple) sans avoir à toutes les modifier manuellement au moindre changement.

Les modifieurs sont des opérations qui affectent un objet de manière dynamique et non destructive, sans en modifier le maillage source. Ils peuvent être combinés afin de construire des objets complexes à partir de maillages plus simples. Dans notre cas, nous utiliserons deux modifieurs en particulier :

- **Le modifieur Solidify**, qui génère un volume d'une épaisseur donnée au maillage d'un objet. Son utilisation permet de ne modéliser qu'une simple surface pour chaque pièce, plus simple à éditer que le volume correspondant ;
- **Le modifieur Mirror**, qui effectue une copie symétrique du maillage le long d'un axe et par rapport à un point virtuel, généralement l'origine de l'objet. Ce modifieur évite d'avoir à effectuer une copie miroir à la main à chaque modification de la pièce lorsque celle-ci est symétrique.

Ces outils permettent ainsi d'économiser un temps conséquent pendant le travail de conception en automatisant des tâches simples mais répétitives, et réduit également significativement les risques d'erreurs et d'oubli lors de la modification de ces éléments.

Contraintes et animation : représenter le comportement réel.

Conformément au programme initial, le projet inclut plusieurs parties mobiles, qui doivent être prises en compte dans la conception. Afin de comprendre les implications de cette mobilité, il est nécessaire de reproduire cet aspect du projet en animant les parties concernées. Cependant, à l'inverse d'une maquette réelle, la maquette numérique ne respecte pas les lois physiques (gravité, frottements, collisions, ...), et bien qu'il soit possible à l'aide d'autres logiciels d'en faire une simulation réaliste, le temps de calcul nécessaire serait démesuré comparé à l'échelle et aux enjeux du projet. Aussi utiliserons-nous conjointement deux outils disponibles dans Blender pour modéliser les mouvements du projet, à savoir le système de contraintes et les outils d'animation.

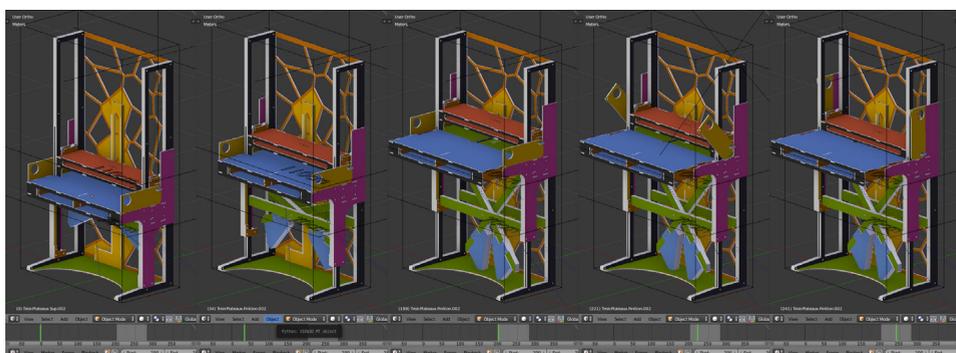


fig.17: Les différentes étapes de l'animation du meuble.

Dans Blender, les contraintes sont des propriétés définissant des relations particulières entre objets et les interactions qu'ils peuvent ou non avoir. Ce sont des outils qui vont nous permettre ici de reproduire certains comportements physiques sans avoir recours à des algorithmes complexes :

- **La contrainte Shrinkwrap**, qui permet de « poser » un objet à la surface d'un autre selon entre autres un axe donné. Cette fonction est utilisée dans notre cas pour imiter le comportement de la gravité en faisant en sorte qu'une pièce soit toujours en appui sur quelque chose ;
- **La contrainte Pivot**, utilisée pour fixer l'origine d'un objet comme centre de rotation d'un autre objet. L'intérêt ici est de pouvoir faire pivoter une pièce non pas par rapport à sa propre origine, mais par rapport à une autre pièce (les bras de levage d'écran par exemple) ;

- **La contrainte Child Of**, qui permet de définir un objet parent dont les transformations (déplacements, rotations et mises à l'échelle) seront automatiquement répercutés sur l'objet cible. Cette contrainte permet de solidariser deux pièces dont les déplacements seront liés, comme c'est le cas par exemple pour deux pièces assemblées.

La mise en place de ces contraintes peut demander beaucoup de temps afin de représenter au mieux le comportement physique (points d'appuis, de fixation, de rotation, ...) des différents éléments constitutifs du meuble. En revanche, cela simplifie significativement le travail d'animation, dans la mesure où des transformations simples sur les objets contraints (rotation ou translation) vont générer des mouvements complexes (levage des différents plateaux) en accord avec le comportement de l'objet final.

2.2.4. De la maquette numérique à la découpe laser

Le processus de conception que nous avons défini au cours du stage prévoit la réalisation d'une maquette fonctionnelle chaque semaine, en l'espace d'une journée. Avec cet objectif de production, l'utilisation de la découpe laser pour fabriquer les éléments nécessaires apparaît comme un gain de temps. Cependant, bien que le procédé soit en soi plus rapide qu'une découpe à la main, son utilisation demande un travail préalable et non négligeable pour être efficace, le but étant de passer d'une maquette numérique à des données exploitables par la découpeuse laser. Deux étapes interviennent alors dans le processus de fabrication : la planification de la maquette et l'optimisation du plan de découpe.

Planification de la maquette.

La planification de la maquette en amont de la découpe vise à éviter les oublis et les erreurs parfois difficiles à rattraper (matériau difficile à retravailler comme le MDF, chutes insuffisantes pour fabriquer un élément oublié, ...). À l'inverse d'une maquette réalisée à la main, où chaque pièce peut être découpée l'une après l'autre en fonction des matériaux disponibles, il est ici indispensable de faire l'inventaire exhaustif des pièces qui seront fabriquées, de les dessiner, puis de les organiser sur une plaque de découpe. Dans la plupart des cas, cette étape nécessite la réalisation d'un modèle numérique de la maquette physique telle qu'elle sera fabriquée à échelle réduite, et non aux dimensions de l'objet final.

Dans notre cas cependant, la simplicité du projet et le fait que chaque pièce soit modélisée séparément permettent d'extraire directement les plans de découpe pour chaque pièce depuis la maquette numérique, sans passer par une étape de remodelisation. De plus, la première opération consistant à faire un inventaire des pièces à découper est automatisée grâce à l'utilisation de copies liées (fig. 18) : chaque pièce du modèle possède une copie dynamique, remise à plat et sans épaisseur située dans un autre calque. Ces copies seront mises à jour en temps réel et sans intervention de l'utilisateur – exception faite pour l'ajout de nouvelles pièces ou la suppression de pièces existantes –, réduisant ainsi le temps nécessaire à l'élaboration du plan de découpe.

À cette étape, nous profitons encore des fonctions d'édition de Blender afin d'agencer les pièces en un plan de découpe compact. Celui-ci est ensuite exporté au format DXF pour la suite du processus.

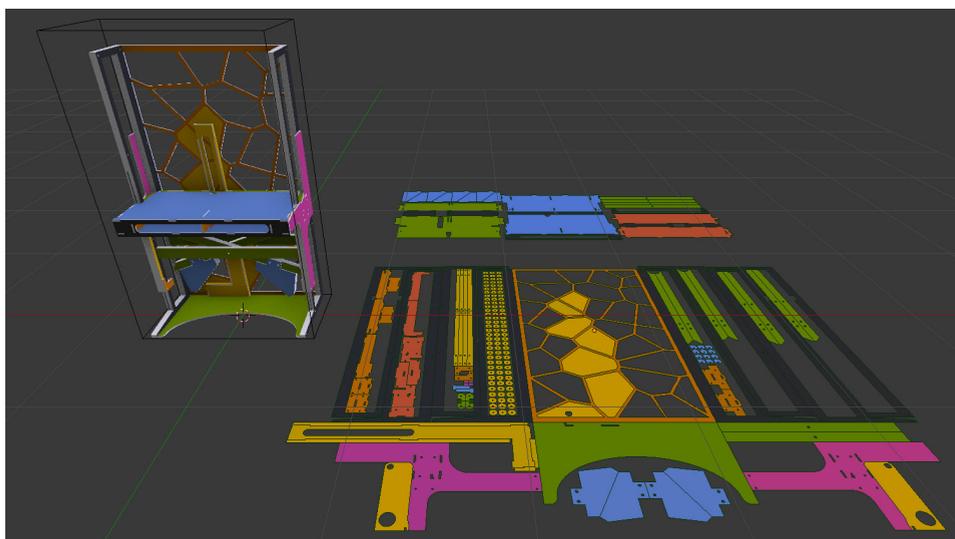


fig.18: Mise à plat automatique de l'ensemble des pièces constitutives du meuble grâce aux copies liées, pour la génération d'un plan de découpe depuis Blender.

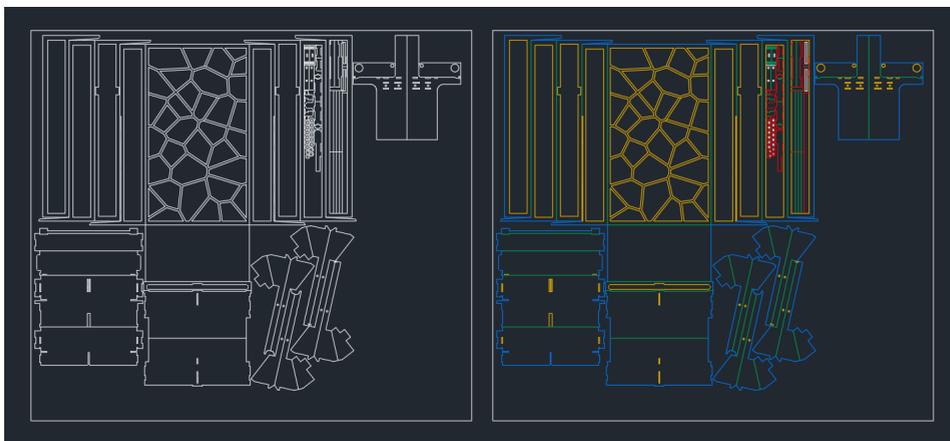
Optimisation du plan de découpe.

Même si la découpe laser est un procédé de prototypage rapide, son efficacité dépend surtout des fichiers de découpe qui lui sont soumis. L'optimisation du plan de découpe est donc une étape importante du processus, et consiste à limiter au maximum les déplacements à vide (où le laser est éteint, de la fin d'un tracé au début du suivant) et d'éviter les tracés superflus (superpositions). Ce travail d'optimisation permet de minimiser les chutes et donc

d'économiser de la matière ; mais aussi de réduire le temps de découpe qui, même s'il est plus rapide et plus précis qu'avec des techniques traditionnelles, reste significatif quand la complexité de la découpe augmente (fig. 19).

Dans cette optique, bien que le fichier DXF exporté depuis Blender soit exploitable en l'état par la découpeuse laser, l'ensemble des tracés qu'il comporte sont des lignes discontinues (nombreux déplacements à vide), et dont la plupart se superposent (passages multiples aux mêmes endroits). Ce plan est donc importé dans un logiciel de dessin technique (AutoCAD dans notre cas) pour le retravailler, de sorte à l'optimiser avant de le soumettre à la découpeuse laser.

Chaque tracé apparaissant dans le fichier correspondant à un trait de découpe, la première opération consiste à supprimer les lignes superposées. Ceci évite que le laser passe plusieurs fois au même endroit, ce qui, en plus d'augmenter inutilement le temps de découpe, tend à brûler le matériau au niveau du trait. Dans un second temps, il s'agit de réunir les lignes (une ligne étant définie par deux points reliés par un trait) en tracés continus : les polygones (une succession de points reliés entre eux dans un ordre donné), limitant ainsi les déplacements à vide. Les polygones ainsi obtenus sont alors organisés en plusieurs calques selon l'ordre de découpe souhaité.



*fig.19: Gestion des calques pour l'optimisation du plan de découpe laser.
à gauche : plan d'origine, temps de découpe estimé à plus de 2 heures.
à droite : plan optimisé, temps de découpe estimé à 24 minutes.*

— • —

À l'issue de ce processus de préparation, nous obtenons un fichier de découpe propre à partir de la maquette numérique, lequel permettra de fabriquer

l'ensemble des pièces de la maquette avec la découpeuse laser. Le temps investi dans cette étape – généralement une à deux heures – reste négligeable comparé au gain en temps et en précision sur la fabrication de l'objet final, même en incluant l'ensemble des manipulations nécessaires au bon fonctionnement de la machine (mise en route, test des paramètres, placement du matériau, entretien, ...) et le travail d'assemblage de la maquette.

Cependant, cette économie de temps est possible uniquement grâce à un processus réfléchi de passage de la maquette numérique à la découpe laser, dont la mise en place a été tardive dans le stage. Avant son utilisation, il n'était pas rare que les fichiers de découpe soient systématiquement incomplets ou erronés, conduisant à une perte conséquente de temps (allers-retours entre AutoCAD et découpeuse laser, multiplication des manipulations sur la machine, reprises manuelles de certaines pièces, ...) et de matériel (production importantes de chutes inexploitable, redécoupage de pièces, ...).

2.2.5. De la maquette numérique au modèle imprimé

Parallèlement à la production de maquettes fonctionnelles du meuble entier, nous avons eu recours à plusieurs moments du stage à la réalisation de petits objets (comme des accessoires de maquette), ainsi qu'à la fabrication de maquettes partielles à plus grande échelle pour aider à la conception de mécanismes particuliers (système de blocage vertical notamment). Ce type de maquette requiert généralement l'utilisation des procédés d'impression 3D pour réaliser des pièces aux volumes plus importants et plus complexes qu'avec d'autres méthodes de prototypage rapide. Cependant, à l'instar de la découpe laser, il est rarement possible d'utiliser la maquette numérique telle quelle pour l'impression 3D, et un certain nombre d'actions seront nécessaires pour la rendre exploitable, que nous classerons en deux étapes : la préparation du modèle et le paramétrage de l'impression.

Préparation de la maquette.

La préparation de la maquette consiste à passer d'un modèle complexe, issu d'un travail de conception avec la maquette numérique, à un modèle plus simple, propre à être imprimé. En effet, après le passage à la maquette, même à grande échelle, il est souvent inutile de représenter un niveau de détail identique à la taille réelle ; au contraire, on tendra à éliminer tout ce qui pourrait gêner la lisibilité ou, dans notre cas, la fonctionnalité de la maquette.

Ainsi, la préparation de la maquette passe tout d'abord par la simplification du modèle imprimé, l'objectif étant d'une part de supprimer ce qui est inutile à la maquette (les parties non visibles par exemple), les détails non significatifs (trop petits pour être lisibles), ainsi que ce qui n'est simplement pas imprimable (éléments trop petits, trop fins, ou trop fragiles). Ces simplifications permettront d'optimiser le temps d'impression et d'améliorer la qualité du modèle, en évitant les défauts dus à un trop haut niveau de détail.

Dans un second temps, il est possible que le modèle simplifié comporte des parties en porte-à-faux dont l'impression nécessitera soit la réorientation de la pièce, soit la génération de supports – selon les cas, cela correspond à des sous-faces formant un angle inférieur à 45°. L'impression de supports étant consommatrice en temps et en matière, lorsque cela est possible, la pièce sera de préférence réorientée de sorte à éviter cette configuration, ou découpée en plusieurs éléments qui seront assemblés par la suite.

Enfin, une fois le modèle simplifié et découpé, il est nécessaire de procéder à sa vérification. En effet, pour que l'impression puisse se faire, chaque pièce doit être constituée d'un maillage représentant un volume fermé, c'est-à-dire dont toutes les arêtes sont reliées à exactement deux faces (interdisant ainsi les « trous », mais aussi les faces intérieures). Ceci permettra au logiciel de slicing de distinguer sans équivoque ce qui est à l'intérieur de la géométrie donnée (les parties pleines) et ce qui est à l'extérieur.

Paramétrage de l'impression.

À ce stade, le modèle est théoriquement propre à être imprimé, mais n'est pas exploitable par le logiciel de pilotage de l'imprimante 3D. En effet, comme nous l'avons vu plus tôt, il est nécessaire de convertir les données géométriques du maillage en instructions compréhensibles par l'imprimante à l'aide d'un logiciel de slicing. Le paramétrage de cette opération permet en premier lieu d'assurer la bonne exécution de l'impression (bonne adhérence au plateau, génération de supports si nécessaire, ...), mais aussi d'en gérer la qualité et – dans une certaine mesure – la vitesse d'impression. Ainsi, en fonction des exigences liées à la maquette, il peut être intéressant d'imprimer un modèle plus grossier (couches plus épaisses, volume creux et peu résistant) pour gagner du temps sur la fabrication, ou à l'inverse de troquer la rapidité contre un objet de meilleure qualité (bonne finition, pièce plus solide).

Dans la pratique, les maquettes produites en impression 3D avaient deux exigences principales : les volumes devaient être fidèles afin de correspondre

aux systèmes testés, et les pièces devaient avoir une résistance mécanique suffisante afin de supporter les efforts exercés pendant les tests. Nous avons ainsi opté la plupart du temps pour une qualité intermédiaire, c'est-à-dire un compromis entre précision et vitesse d'impression, préférable pour la fabrication de maquettes destinées à la conception, et non à la communication.



*fig.20: Différences de qualités d'impression d'un même modèle en faisant varier l'épaisseur des couches imprimées.
(de gauche à droite : 0,1mm ; 0,25mm ; 0,38mm)
(Source : <http://www.sd3d.com/pla-settings>)*

— • —

Comme nous avons déjà pu l'énoncer plus tôt, l'impression 3D permet la fabrication de modèles complexes relativement rapidement, pouvant prendre, à qualité équivalente, moins d'une heure pour de petites pièces, de 3 à 5 heures pour des éléments de taille moyenne, voire bien plus pour des objets de grande taille ou de grande complexité. Cependant, à ce temps d'impression brut s'ajoutent d'une part les opérations préalables que nous avons énoncées, mais aussi la consommation de temps et de matière par les différents tests nécessaires à l'obtention de l'objet voulu. En effet, il peut arriver que l'impression soit mal paramétrée (à cause d'un oubli ou d'un réglage mal évalué) et n'aboutisse pas à la qualité escomptée (aspect ou résistance mécanique) ; voire qu'elle échoue complètement, à cause d'un objet qui se détache du plateau en cours d'impression, d'un mauvais réglage des températures ou de supports, d'une extrusion insuffisante ou excessive du filament, ou encore d'une interruption du flux de données entre le logiciel de pilotage et l'imprimante.

De plus, il est à noter que l'utilisation que nous faisons des imprimantes 3D disponibles et la nature même du procédé – dépôt de filament en

fusion – n’ont pas pour objectif de fabriquer des objets finis : même avec une haute qualité d’impression, il sera souvent nécessaire de retravailler manuellement le modèle si une finition lisse est réellement recherchée, notamment pour éliminer les éléments superflus (supports par exemple) ou pour lisser l’aspect extérieur (couches apparentes).

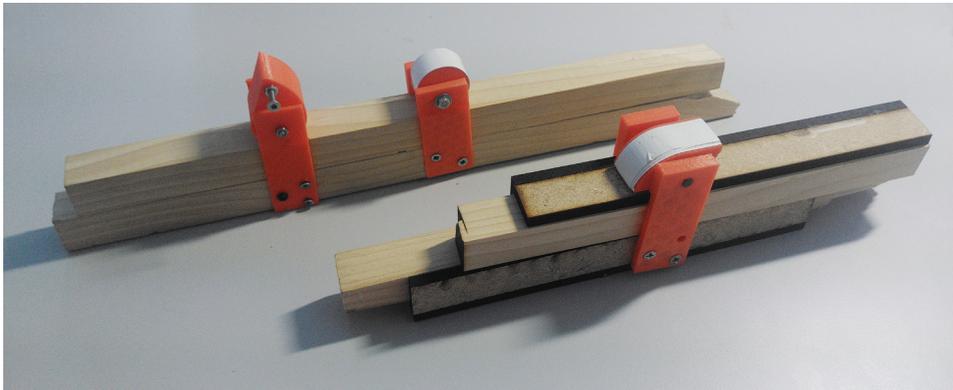


fig.21: Prototypes de systèmes de verrouillage réalisés en impression 3D.

2.2.6. Rétrospective sur le processus de conception

Les méthodes qui ont été mises à en œuvre sont issues d’une expérimentation continue, et non d’une planification en amont du projet. Le processus qui en découle est ainsi loin d’être parfait, et comporte encore un certain nombre de problèmes, en particulier pendant le passage d’un support à l’autre (du modèle numérique vers le modèle physique).

Si nous isolons la partie du processus qui concerne l’impression 3D, il a été systématiquement nécessaire de remodeler la partie du modèle testée. Cette démarche permettait de travailler sur des mécanismes en simplifiant au maximum les contraintes pour en extraire la partie fonctionnelle. En revanche, elle incitait également à une sur-simplification qui rendait le prototype peu représentatif de la réalité, et difficile à réintégrer sur la maquette numérique.

Dans le cadre de la découpe laser, de nombreuses erreurs (pièces manquantes ou impossibles à monter) sont survenues tout au long du stage avant la mise en place du système de copies liées pour la génération automatique du plan de découpe. Malgré cela, le temps nécessaire au traitement de ce plan est long et coûteux en énergie, même s’il est rapide à extraire. En effet,

il fallait à chaque nouvelle découpe optimiser manuellement l'agencement des pièces à découper par rapport aux dimensions variables des plaques de MDF disponibles. De plus, l'export au format DXF depuis Blender ne permet que d'exporter de simples lignes, ce qui demande un travail conséquent de tri, de redessin et de fusion de ces lignes en polylignes, engendrant des pertes de temps importantes et de fréquents retard sur le planning hebdomadaire.

Au niveau de la maquette numérique également, les nombreuses fonctions et possibilités de modélisation (contraintes et modificateurs notamment) permettent d'automatiser la plupart des opérations de conception et d'éviter certaines erreurs et autres oublis. Cependant, la plus grande source d'erreurs que nous rencontrons régulièrement pendant l'assemblage de la maquette, sont les intersections et les collisions des différentes pièces du modèle. Bien qu'il existe des outils de simulation qui permettent de les vérifier automatiquement, ceux-ci sont complexes à mettre en place sur un grand nombre de pièces, et extrêmement lents à calculer. La vérification visuelle quant à elle était plus rapide à réaliser, mais également moins fiable, avec un plus grand risque d'erreur et/ou d'oubli.

Ces failles dans le processus sont minimales – voire négligeables – dans notre cas d'application, en raison de la simplicité relative du meuble, et de l'absence d'enjeux de communication avec des acteurs externes. Dans la plupart des cas, ces failles étaient dues à l'apparition de discontinuités dans la vie de la maquette numérique. Il s'agit de moments où l'information (géométrie du modèle) devient redondante et partielle ; bien que nous ayons pu limiter leur impact en réduisant le plus possible les manipulations de redessin et de remodelisation quand c'était possible.

Les problèmes que ces discontinuités ont soulevés, même s'ils ont souvent retardé le travail de production, n'ont jamais eu de conséquences réellement significatives à l'échelle du projet dans son ensemble. Cependant, transposés à l'architecture, ces points correspondent à des ruptures dans le continuum numérique du projet, qu'on constatera par exemple lors des échanges entre les différents acteurs de la construction. L'évitement de ces moments de rupture sont d'ailleurs au centre des méthodes de collaboration autour du modèle BIM.

Ainsi, dans le développement de la méthode que nous proposerons dans ce mémoire, nous nous efforcerons de tenir compte de ces points de rupture, afin le plus possible de les éviter.

2.3. Documentation : comment transmettre l'expérience ?

Au-delà des aspects techniques du stage, que ce soit en terme de conception ou de production, le travail de documentation constitue une part importante dans son déroulement. Celui-ci consiste à développer les ressources nécessaires pour mettre à la disposition d'autres étudiants et/ou chercheurs les outils utilisés, et en particulier les imprimantes 3D. Il s'agissait ainsi dans un premier temps d'apprendre soi-même à utiliser ces techniques et à en maîtriser les procédés, puis de les synthétiser sous forme de notices. Cet apprentissage initial est un processus qui peut être parfois long compte tenu de la disparité des sources d'information et de formation sur le sujet.

2.3.1. Apprentissage initial : répondre à un besoin pratique

L'apprentissage initial des techniques d'impression 3D s'est fait tout d'abord par tâtonnement, d'après les conseils donnés par d'autres utilisateurs. Cette approche, répondant à un besoin pratique dans un premier temps, a permis d'obtenir des résultats concrets avec les machines. Elle est cependant particulièrement lacunaire, ne permettant pas de comprendre le fonctionnement du matériel. Les modèles 3D conçus n'étaient ainsi pas au départ toujours adaptés à l'impression, comprenant souvent trop de détails (résolution trop importante du maillage ou éléments trop petits). À ce stade également, les paramètres d'impression étaient utilisés comme des formules pré-faites, fonctionnelles, mais non maîtrisées, et leur modification conduisait à des résultats souvent inattendus (baisse de qualité ou échec de l'impression) ou trop longs à produire (qualité trop élevée, surconsommation de matière, ...).

2.3.2. Formation approfondie : comprendre les méthodes

La seconde phase de l'apprentissage s'est faite par la lecture de ressources traitant du sujet étudié, afin de construire une connaissance plus fondamentale du domaine de l'impression 3D, d'une part sur les aspects théoriques, et d'autre part sur les aspects pratiques. Cette étape s'est ainsi déroulée par la recherche de documentation sur les différents aspects de l'impression 3D, comme le fonctionnement de l'imprimante en elle-même (maîtrise de l'extrusion, communication logiciel/machine, nature des instructions, ...), la préparation des modèles (pratiques et méthodes de modélisation, limitations de la machine, ...), et le diagnostic des problèmes d'impression (repérage et compréhension des défauts, erreurs de communication, ...). Parallèlement à cette documentation théorique, il a été particulièrement utile de consulter et

d'analyser les modèles produits par d'autres utilisateurs¹¹, pour tenter d'assimiler les « bonnes pratiques » de modélisation pour l'impression 3D.

2.3.3. Expérimentation directe : maîtriser les outils

À partir de ces nouvelles connaissances, il a été possible d'expérimenter directement avec de base une meilleure compréhension de l'outil et des méthodes. Ainsi, nous avons pu partir d'une configuration connue et fonctionnelle servant de témoin – un modèle et un profil d'impression –, et ainsi opérer des modifications point par point (soit sur le profil d'impression, soit sur le modèle) pour en tester les impacts sur le modèle imprimé.

— • —

Cette démarche d'apprentissage a permis en quelques jours d'obtenir des résultats suffisants en impression 3D pour pouvoir poursuivre le travail du stage, sans forcément être à l'aise avec son utilisation. Il aura ainsi fallu plusieurs semaines afin de comprendre les aspects principaux de l'outil, et environ deux mois (la moitié de la durée du stage) pour en assimiler les fonctions et les méthodes, et donc en faire une utilisation mieux maîtrisée. La durée de cet apprentissage aurait cependant pu être optimisée dans un cadre différent, le temps effectif investi dans les différentes recherches et expérimentations ayant été limité par le travail de conception du meuble, qui restait prioritaire.



fig.22: Les étapes de l'apprentissage par l'expérimentation.

11. Depuis la plateforme de partage libre *Thingiverse* (<http://www.thingiverse.com>), qui héberge de nombreux modèles conçus par une communauté ouverte.

PARTIE 3 : Le prototypage rapide, un outil pour l'architecture ?

Les différentes expérimentations réalisées au cours du stage, en terme de processus ou de techniques, ont permis de mettre l'emphase sur l'intérêt du prototypage rapide pour la conception. L'utilisation qui en a été faite était contenue dans le cadre précis de la réalisation d'un élément de mobilier ; cependant, les procédés mis en œuvre ne sont pas destinés à se limiter à ce cas d'application. Ils ont un potentiel plus large et pourraient s'étendre comme des outils innovants pour l'architecture.

Nous ferons ici dans un premier temps un rapide tour d'horizon des pratiques du prototypage dans différents domaines, avant de se recentrer sur une implémentation du prototypage rapide dans le processus de conception architecturale.

3.1. Les pratiques de la maquette et du prototype

3.1.1. La maquette en architecture

Nous avons vu en première partie que la maquette pouvait se définir comme un moyen de représentation physique ou numérique d'une partie d'un objet ou de sa totalité. Bien qu'elle soit plus largement utilisée dans d'autres domaines comme l'industrie et le design, la maquette reste un outil important dans les différentes étapes du projet d'architecture, de la première maquette intuitive à l'objet représentant le bâtiment fini, servant de support à un modèle de conception empirique. La maquette d'architecture peut prendre diverses formes, lesquelles vont dépendre en particulier de quatre paramètres :

- **L'avancement du projet**, c'est-à-dire l'étape à laquelle la conception est rendue (stade d'esquisse, avant-projet, exécution, ...), qui va jouer sur ce qui peut être représenté et sur la fiabilité de ce que montre la maquette (dimensions, matériaux, ...);
- **Les objectifs de la maquette**, qui vont cadrer sa réalisation, et conditionnent entre autres son échelle, ses dimensions, les procédés de fabrication utilisés, les matériaux, ou encore le niveau de détail qui sera représenté ;
- **Le public de destination**, que ce soit le concepteur lui-même, un client, un jury, un expert, ou un public plus large, qui va déterminer le niveau d'exigence en terme de qualité de la maquette et de langage de représentation utilisé ;
- **Les ressources disponibles**, qu'elles soient financières (coûts de la fabrication), matérielles (matériaux et outils) ou temporelles (dates butoir), qui limitent les options envisageables pour la réalisation de la maquette.

La combinaison de ces paramètres et des choix qui en découlent génèrent une grande variété dans les pratiques architecturales de la maquette, ce qui en fait un outil extrêmement polyvalent. Celle-ci peut ainsi endosser de nombreux rôles à travers le processus de conception, mais aussi au-delà comme un moyen de communiquer autour de l'architecture et des projets. Ainsi, bien qu'il soit difficile d'établir une classification précise des modes de représentation, nous distinguerons trois grandes familles de maquettes qui

interviennent dans la vie d'un projet architectural : la maquette d'étude, la maquette-prototype, et la maquette-objet.

La maquette d'étude : un outil de conception et de décision.

Le recours à la maquette comme support au développement du projet peut se faire très tôt dans le processus de conception (représentation d'une intuition de projet par exemple), et se prolonger tout au long du travail de l'architecte (recherches conceptuelles, formelles, techniques, ...). On parlera alors de maquette d'étude.

La maquette d'étude – physique ou numérique – remplit tout d'abord un rôle d'aide à la conception. En effet, comparée au dessin et autres modes de représentation bidimensionnelle, elle permet une visualisation plus complète du projet et de ses enjeux à différentes échelles, d'un contexte large (maquette de situation) jusqu'aux aménagements intérieurs. Elle constitue donc un outil de travail propre à l'architecte, s'adressant généralement à un nombre restreint de personnes (souvent internes à la maîtrise d'œuvre).

Aussi, la maquette d'étude n'est pas un objet figé, elle n'est jamais finale ; mais au contraire elle évolue continuellement au cours du projet. C'est une maquette de travail et de réflexion, ouverte aux modifications et au test de nouvelles hypothèses de conception. On y retrouve ici l'idée d'itérations successives et/ou parallèles de la maquette, propre aux démarches de conception empiriques. Cette utilisation de la maquette d'étude favorise ainsi la multiplicité des propositions architecturales et de leurs variantes, et vise à faciliter également leur comparaison grâce à cette perméabilité au changement. En ce sens elle constitue également un outil d'aide à la décision.

Il existe de nombreux modes de représentation qui correspondent à la définition de la maquette d'étude, adaptés aux différentes étapes et aux différentes échelles du projet. Dans cette étude, nous distinguerons essentiellement trois types de maquettes d'étude :

- **La maquette sensible**, correspondant à une expression libre et intuitive d'une idée, d'un concept ou d'une perception prise sur le vif. Elle est généralement réalisée très tôt dans le travail de conception, et agit comme un rappel de l'intention initiale au long du projet. Ce type de maquette d'étude sert à matérialiser une intuition de projet, comme une première ébauche tridimensionnelle. Elle ne fait généralement pas intervenir de notion d'échelle, de dimension, ni de volume, mais

plutôt des idées d'aspect, de matérialité, de masse, etc. Elle donne ainsi plus d'importance aux matériaux et aux outils utilisés, en recherchant le plus possible l'instantanéité dans sa fabrication ;

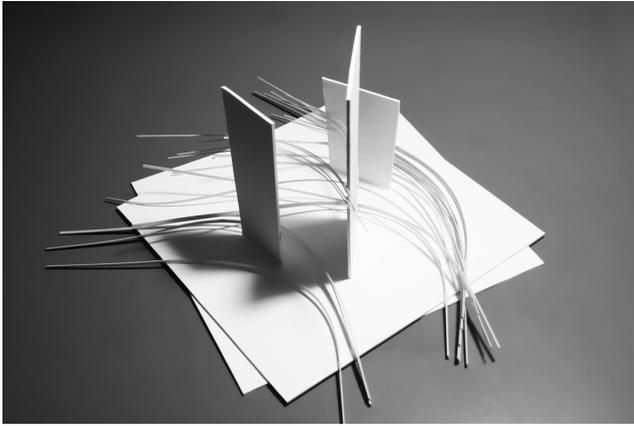


fig.23: Maquette sensible.

- **La maquette volumétrique**, qui constitue une représentation formelle de la volumétrie générale du projet, sans rentrer dans le détail. Elle retranscrit le plus souvent une intention architecturale à une large échelle, et inclut ainsi dans sa réalisation une partie significative de son contexte (terrain et bâti alentours). Mais elle peut également être isolée pour l'étude seule du projet. Ce type de maquette d'étude permet ainsi d'expérimenter de multiples configurations de la volumétrie et de la disposition des éléments du projet ;

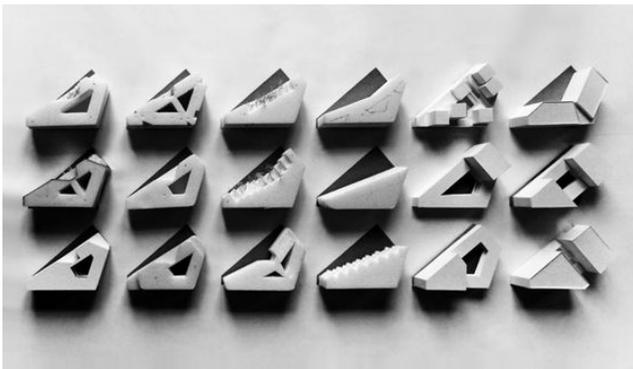


fig.24: Études volumétriques d'un îlot urbain.

- **La maquette schème**, illustrant de manière plus précise les intentions projectuelles du concepteur au niveau de l'objet architectural même. Son utilisation est continue dans le processus de conception, et tend à être de plus en plus précise à mesure que le projet se définit. À l'inverse de la maquette sensible qui met en évidence une idée, la maquette schème développe les intentions initiales en les intégrant aux problématiques internes du projet. Elle prend ainsi en compte l'échelle de la représentation, les dimensions de l'objet et tout autre aspect pertinent (couleurs, textures, ...), permettant ainsi de traduire un concept en une proposition architecturale.

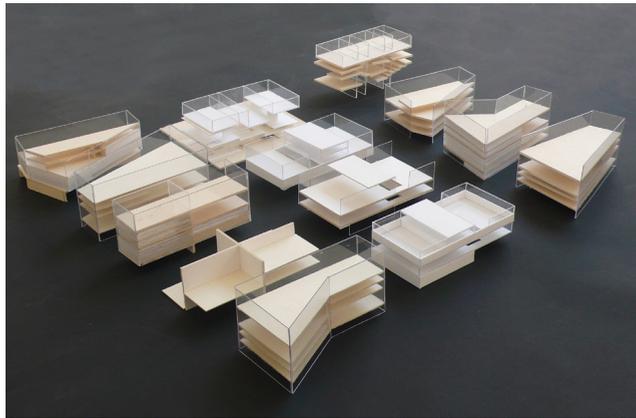


fig.25: Succession de maquettes schème réalisée par Studio Muoto.

La maquette-prototype : un outil de validation.

Alors que la maquette d'étude est utilisée à des fins de recherche du début à la fin du projet, d'autres maquettes se concentrent plutôt sur la représentation fidèle d'un ou plusieurs aspects du projet de manière réaliste, empruntant de ce fait aux techniques du prototype. Nous utiliserons ainsi le terme de maquette-prototype pour désigner ces objets, qui arrivent plus tardivement dans le processus de conception.

La maquette-prototype correspond à la production d'un modèle réduit reprenant une partie des caractéristiques du projet final dans l'optique de vérifier le bien-fondé de certaines hypothèses de conception par une expérimentation concrète (par opposition à une intuition ou une représentation), que ce soit par le biais d'un objet physique (maquette de statique par exemple) ou d'une modélisation numérique (simulations). C'est en quoi elle constitue un

outil de validation. Son élaboration étant souvent plus complexe et exigeante que la maquette d'étude pour être pertinente, elle est souvent plus difficile à retravailler ou modifier, et aura plutôt tendance à arriver tardivement dans les différentes étapes de la conception du projet, dépendamment de la nature de ce dernier et de ses enjeux spécifiques.

Bien qu'elle soit généralement adressée au concepteur lui-même ou à ses collaborateurs directs, certaines formes de maquettes-prototype peuvent servir de support à la communication d'aspects précis du projet avec d'autres acteurs, experts ou néophytes. Nous identifierons notamment trois types de maquettes-prototype :

- **La maquette fonctionnelle**, qui exploite les propriétés des outils mis en œuvre pour sa fabrication (matériaux et procédés pour une maquette physique, logiciels et techniques de modélisation pour une maquette numérique) pour tester un ou plusieurs aspects du projet de manière réaliste, ce en quoi elle se rapproche du prototype fonctionnel. Ce mode de représentation, évitant le plus possible les raccourcis et les imprécisions, permet d'obtenir des objets fiables pour tester un comportement réel (structure, statique, lumière, matérialités, ...) et de valider ou à l'inverse de remettre en question les éléments de projet concernés. La maquette fonctionnelle peut ainsi être un outil utile pour se rendre compte et communiquer sur le fonctionnement du projet et l'impact des solutions apportées, avec une échelle adaptée au degré de précision requis ;

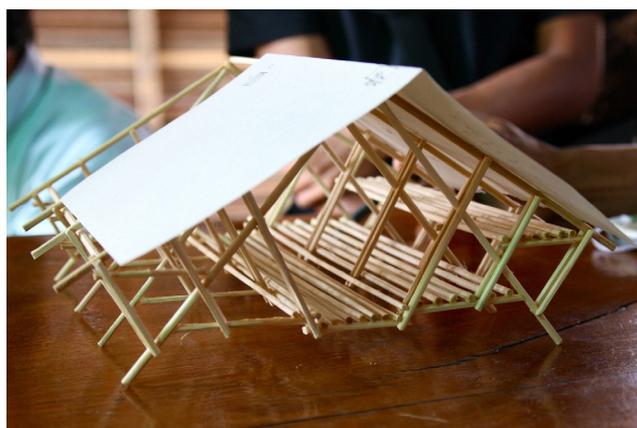


fig.26: Maquette fonctionnelle pour l'étude d'une structure en bambous réalisée par a.gor.a architects.

- **La maquette-détail**, pouvant se définir comme un cas particulier de la maquette fonctionnelle qui se concentre sur un élément précis du projet. Aussi se présente-t-elle le plus souvent comme une maquette coupe avec une échelle permettant de modéliser des détails techniques en trois dimensions, comme le montage d'une baie ou encore d'un élément de mobilier particulier, un détail d'assemblage structurel, de jonctions entre différents objets architecturaux, etc. À cette échelle de représentation, et selon les méthodes utilisées (matériaux et/ou logiciels), la maquette-détail peut servir à démontrer les qualités (spatiales, techniques, mécaniques, ...) et la faisabilité (montage, intersections, ...) d'un point critique du projet, là où des documents 2D permettraient difficilement d'en appréhender la complexité ;



fig.27: Maquette-détail de la façade extérieure et du poteau pour le Centre Pompidou Paris.

- **La maquette BIM**, qui est quant à elle exclusivement numérique, peut remplir de nombreux rôles en fonction de son niveau de maturité¹². N'étant pas exclusive à l'architecture mais concernant l'ensemble des disciplines intervenant dans le bâtiment (architectes, bureaux d'étude, ...), celle-ci constitue, dans son utilisation la plus complète,

12. CART, Léopold, « Les conventions BIM : l'enseignement, clé de la pratique du BIM », mémoire de master en architecture spécialité A.M.E., sous la direction d'Olivier MALCURAT, Nancy, École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy, 2016, 120p.

un support de collaboration entre les différents acteurs réunissant l'intégralité des données du projet, et notamment celles relatives à sa construction (modélisation 3D enrichie, nature des matériaux, géo-localisation, ...). Idéalement, la maquette BIM possède un grand potentiel en tant qu'outil de validation en recouvrant tous les aspects du projet (simulation du comportement thermique, des fluides, des équipements, de l'apport de lumière, ...), et peut dans certains cas être assimilée à un prototype virtuel complet du bâtiment.

La maquette-objet : un outil de communication.

La troisième famille de maquette à laquelle nous nous intéresserons n'appartient pas directement au processus de conception architecturale, mais apparaît plutôt en fin de développement, ou une fois le projet fini, voire construit. Ces maquettes-objet sont destinées à donner une représentation plastique et plus ou moins fidèle du projet, dépendamment de ce qu'elle est censé véhiculer.

La maquette-objet regroupe un grand nombre de pratiques, allant du modèle miniature et exact de l'architecture à une représentation abstraite qui évoque le projet en se rapprochant d'une œuvre d'art. Ces maquettes sont fortement ancrées dans la culture architecturale grand public comparé aux autres familles de maquettes que nous avons vues, en raison de leur plus grande visibilité (expositions dans des musées, publications, promotion immobilière, ...). L'intérêt de la maquette-objet réside dans ses choix esthétiques et sa simplicité de compréhension, la rendant accessible à un plus large public que les maquettes d'étude ou les maquettes-prototype (qui peuvent paraître obscures, peu parlantes aux yeux d'un néophyte). Ceci en fait un des outils de communication privilégiés pour la médiation et la vulgarisation autour du projet d'architecture.

Cet aspect de la maquette-objet rend difficile sa fabrication sans un travail préalable, assimilable à un nouveau processus de conception orienté sur la sélection des informations que l'on veut transmettre par la maquette. C'est le plus souvent un travail réalisé a posteriori, une fois l'ensemble ou tout du moins l'essentiel du projet fixé. Le temps nécessaire à sa fabrication étant généralement long, il n'est pas rare que sa fabrication soit sous-traitée en dehors de l'agence (artiste, maquettiste ...).

Malgré la diversité des maquettes-objet, de leurs caractéristiques et de leurs rôles dans le domaine de l'architecture, nous pouvons les regrouper sous trois types généraux :

Le prototypage rapide, un outil pour l'architecture?

- **La maquette concept**, comparable à la maquette sensible fabriquée en début de processus de conception dans sa réalisation, et pouvant parfois y être confondue. Lorsqu'elle est indépendante de la maquette sensible, elle est généralement fabriquée une fois la phase de conception terminée, voire une fois le bâtiment construit dans certains cas. Le degré d'abstraction de ce type de maquette est variable, mais ne respecte généralement ni l'échelle ni les dimensions du projet. Elle permet ainsi de proposer au public une représentation abstraite évocatrice du geste architectural, c'est-à-dire les grands principes conceptuels qui ont guidé sa conception, et ainsi de mieux en comprendre les intentions générales ;



*fig.28: Maquette concept du Musée Cantonal des Beaux-Arts
par Allied Works Architecture.*

- **La maquette de concours**, produite à l'issue du processus de conception à des fins de présentation du projet auprès d'un jury, ou d'une entité de décision assimilée. L'échelle, le niveau de détail et les outils mis en œuvre pour sa réalisation varient selon les cas (impact local ou urbain, contexte de présentation, public ciblé, ...). Elle correspond à une représentation sélective de la construction projetée, et va ainsi simplifier ou omettre un certain nombre d'informations qui pourraient parasiter la compréhension générale du projet et de ses points forts. La maquette de concours ne se destine ainsi pas à montrer de manière précise et exhaustive la constructibilité du projet, mais cherche à en démontrer la vraisemblance et à faire adhérer l'interlocuteur à une proposition architecturale forte ;



fig.29: Maquette de concours du commissariat de police à Provins par Dacbert-Cochet-Chapellier Architectes.

- **La maquette de présentation**, que l'on rapprochera de la maquette de concours dans le sens où elle opère également une sélection dans ce qui est représenté. Elle s'en différencie par le public plus large auquel elle est destinée, et représente des enjeux moindres que ceux d'un concours. Elle revêt l'idée de « belle maquette », ne respectant pas nécessairement les codes de la maquette d'architecture, se conformant plutôt aux attentes du public de destination (miniature, couleurs, ...), que ce soit pour convaincre (client particulier), pour informer sur un bâtiment existant (visiteur dans un bâtiment public) ou encore pour vendre un projet construit ou en construction (promotion immobilière). La maquette de présentation englobe aussi bien les maquettes physiques plus ou moins grand public, que le modèle virtuel parcourable¹³ par exemple.



fig.30: Maquette de promotion immobilière.

13. BOLSHAKOVA, Veronika, « Synchronous collaboration and 3D interactions, AEC industry implementation », mémoire de master en architecture spécialité A.M.E., sous la direction de Gilles HALLIN et Pascal HUMBERT, Nancy, École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy, 2016, 90p.

3.1.2. Le prototype dans l'industrie et le design

Les domaines du design et de l'industrie (secteurs de l'ingénierie ou de l'automobile, production de matériels, machines, mobiliers, équipements, ...) font une utilisation abondante de la maquette dans leurs premières phases de recherche, mais se reposent davantage sur la production de prototypes à la fois physiques et numériques, complets ou partiels. Cette importance donnée au prototype dans ces disciplines a plusieurs origines : le besoin de réalisme dans la conception des produits, et la nature innovante de ces derniers.

Tout d'abord, le haut niveau de performance exigé, que ce soit sur l'utilisation d'un nouveau produit ou d'une nouvelle technologie, implique l'utilisation du prototypage dans les différentes étapes de recherche et de conception afin d'expérimenter en vraie grandeur et dans des conditions réalistes, au plus proche de l'objet final. Le prototype peut ainsi servir à l'élaboration des projets, en tant qu'outils de conception, de décision et de validation, au même titre que les différents types de maquettes utilisées en architecture ; ce qui est en partie possible grâce à la taille réduite des projets généralement traités. De plus, l'industrie et le design sont deux domaines fortement liés au secteur de l'innovation, et tendent à utiliser la multiplication des prototypes sous leurs différentes formes et variantes comme une application de la démarche empirique. Cette méthode de conception s'apparente souvent à la R&D, dans le sens où elle s'oriente sur la construction de nouvelles connaissances et de nouvelles techniques, théoriques (recherche fondamentale) ou pratiques (recherche appliquée). L'expérimentation directe par le prototypage est ainsi un moyen d'acquérir et de formaliser ces avancées.

Le prototypage, de l'idée à la production.

Le prototype remplit plusieurs rôles selon le moment et le contexte où il est utilisé. Lors de la conception d'un nouvel objet, de quelque nature que ce soit (produit, matériel, technique ou technologie), il va apparaître à toutes les étapes du processus comme un outil d'acquisition et d'échange des connaissances en permettant d'accumuler de l'expérience sur l'objet développé et de la transmettre aux éventuels collaborateurs ; mais aussi comme un outil de validation, voire de démonstration (fonctionnelle, économique, ...) durant les phases précoces comme tardives de la conception. Il pourra également servir dans de nombreux cas annexes à la conception de l'objet, comme la préparation des éléments de documentation (spécifications techniques, méthodes,

formations, ...), l'analyse de son comportement en situation réelle, ou encore la préparation de sa mise en production.

L'état et la nature du prototype, complet ou partiel, sont définis en fonction du projet en lui-même (amélioration de l'existant ou innovation directe, rétro-ingénierie, technique ou produit, ...), de l'étape à laquelle il est rendu (de la preuve de concept à la production finale) et des ressources disponibles (technologiques, matérielles ou financières) à l'étape en question. Ainsi, on peut identifier différents moments de la conception dans l'industrie et le design qui vont influencer les choix en matière de prototypage :

- **La recherche initiale**, où les contraintes générales de l'objet sont connues, mais non encore fixées et incomplètes. Le prototype joue à ce moment un rôle de catalyseur de la recherche à des fins d'enrichir le projet, et permet d'accumuler de l'expérience dans un domaine nouveau. Il devient ainsi un vecteur d'innovation en lui-même en se faisant porteur d'idées et de concepts absents du projet de départ ;
- **Le développement**, qui définit au fur et à mesure de l'avancement les aspects précis du projet par rapport aux grandes lignes posées auparavant. C'est une étape non linéaire – on parle plutôt de boucles de développement – où le prototypage est abondamment utilisé pour concrétiser point par point et de plus en plus précisément les différents aspects du projet, sans exclure des évolutions qui n'étaient pas envisagées auparavant (nouvelles fonctionnalités, nouveaux usages, changement de direction, ...);
- **La préproduction**, étape où l'ensemble des caractéristiques de l'objet final sont identifiées et les solutions techniques connues et maîtrisées. L'utilisation du prototype prend sens à ce moment comme moyen de valider le projet dans son ensemble et dans toutes ses applications ; il a pour objectif de démontrer l'intérêt et la viabilité autant des aspects propres à l'objet (fonctionnels, techniques, ergonomiques, ...) que de tous ses autres aspects associés (économie, processus, mise en production, ...).

Les pratiques du prototypage.

La fabrication d'un prototype physique est souvent précédée d'une étape de modélisation sous forme de maquette numérique. Celle-ci peut alors avoir valeur de prototype virtuel, lorsque les outils logiciels mis en œuvre

permettent la simulation de son comportement réel. Dans le cas de projets de faible complexité – ou pour des parties d'un projet plus complexe remplissant ce critère –, le prototypage virtuel peut être en grande partie suffisant à la vérification et la validation des différents concepts impliqués. Ce travail n'exclue pas la fabrication de prototypes physiques, mais au contraire permet souvent de préparer cette étape en solutionnant en amont les problèmes immédiatement identifiables. C'est ainsi un moyen de limiter les coûts liés au développement d'un projet de petite ou de grande ampleur, en économisant les ressources humaines et matérielles qui seraient utilisées à la multiplication de prototypes physiques non nécessaires. Le prototypage virtuel et le prototypage physiques sont ainsi complémentaires, et non antithétiques.

Les formes que prend le prototype – physique comme virtuel – peuvent être comprises comme un spectre continu allant de la preuve de concept d'un composant-clé du projet à la mise en production de l'objet final. Nous reconnaitrons cependant différentes gradations du prototype, différents degrés d'exigence et de représentation, dont l'utilisation dépend de la complexité du projet et des capacités de production de la structure qui le développe :

- **Le prototype-concept**, qui se positionne au début du processus de conception et ayant pour but de poser les concepts de l'objet qui seront par la suite développés. Il s'agit d'une ébauche du projet, mais dont les fonctions principales sont présentes ou représentées. Cette première forme de prototypage peut intégrer tout ou seulement un aspect de l'objet final en fonction de la complexité et des attentes liées au produit (fonction, aspect, ergonomie, ...). Il n'est pas nécessairement unique, et peut nécessiter plusieurs itérations (essais successifs) ou occurrences (décomposition du projet en sous-problèmes) pour identifier et valider le ou les points critiques. Dans certains cas, le prototype-concept pourra participer à l'élaboration d'un cahier des charges, ou servir de démonstration de faisabilité d'un projet avant son amorce ;
- **Le prototype intermédiaire**, apparaissant à intervalles réguliers pendant le processus de conception comme une succession de tests qui permettent de confirmer ou d'infirmer certaines hypothèses. La succession des prototypes intermédiaires permet ainsi de tracer l'évolution du projet, en rendant possible le travail de rétrospective et d'auto-référence. Il peut être complet et représenter le projet dans son

ensemble en vraie grandeur ; ou, à des fins pratiques et économiques, être partiel pour ne se concentrer que sur une partie spécifique de l'objet. Il peut également faire abstraction d'un certain nombre de caractéristiques jugées secondaires à l'étape de développement concernée (utilisation de matériaux moins onéreux ou plus faciles à travailler, aspect visuel ignoré, ...), permettant ainsi de ne valider qu'un ou plusieurs aspects particuliers ;

- **Le prototype de préproduction**, marquant idéalement la fin de la phase de développement, servant de démonstrateur à la fois du projet et des méthodes mises en œuvre pour sa réalisation. À l'inverse des formes de prototypage précédemment annoncées, le prototype de préproduction est identique au produit final en terme de fonctionnalités et de qualité. Le processus de fabrication est également testé à travers ce prototype, afin de vérifier l'aptitude des différents outils et procédés appliqués à produire le résultat escompté (usinage, assemblage, finition, ...). À ce stade, le prototype de préproduction est encore un modèle unique et cher à produire, dans la mesure où les étapes de sa fabrication ne sont ni optimisées, ni automatisées ;
- **Les prototypes de présérie**, qui servent à éprouver le fonctionnement d'un processus de fabrication à destination de la production à grande échelle. La présérie consiste ainsi en la fabrication de plusieurs exemplaires de l'objet fini. Elle sera plus ou moins grande en fonction du produit en question, de sa nature, et de sa destination (grand public, grande distribution, ou un public ciblé). Les prototypes de présérie sont un moyen de démontrer la fiabilité d'un processus de fabrication (qualité satisfaisante et constante d'un exemplaire à l'autre), ainsi que son intérêt économique. Ils matérialisent ainsi en ce sens la dernière étape avant la mise en production du produit.

3.1.3. La conception dans l'architecture, l'industrie et le design

L'architecture, l'industrie et le design ont en commun la notion de projet, dans le sens d'un processus de conception et de création, dont l'objectif est d'aboutir à un produit fini et nouveau – comme un bâtiment, ou une machine, ou un meuble. Par le biais de la maquette en architecture, et du prototype dans l'industrie et le design, ces trois domaines appliquent une méthode de conception empirique du projet, où à partir d'une problématique initiale et

inédite (un programme, un besoin, une idée), des expérimentations successives vont permettre de construire une solution elle aussi inédite.

Cependant, malgré une approche similaire du projet, des outils de conception analogues (documents, logiciels, maquettes/prototypes) et des contraintes comparables (temps limité, degré d'exigence, ...), on constate dans la pratique que les processus appliqués sont fondamentalement différents. En effet, dès les premières phases du projet, l'industrie et le design font une utilisation large et diversifiée de l'ensemble du spectre de la maquette et du prototype. La systématisation du prototypage dans ces domaines est faite en complément des outils plus traditionnels de la conception, et force ainsi le passage d'une représentation abstraite d'une idée (un dessin par exemple) à un objet, réel ou virtuel, qui pourra être manipulé de manière réaliste pour faire avancer le projet.

À l'inverse, les pratiques architecturales semblent essentiellement favoriser d'autres modes de conception, mieux ancrés dans les coutumes. Ainsi, bien que la maquette numérique ait été adoptée par la majorité des architectes depuis des années, sous ses formes enrichie (BIM) ou simplement géométrique (modèle SketchUp, ou AutoCAD 3D par exemple), elles sont rarement utilisées comme des outils de conception tridimensionnelle, mais plutôt comme des outils de dessin 2D (plans, coupes, façades, ...) à partir desquelles une représentation 3D sera calculée a posteriori. La maquette physique est peu utilisée, en raison du temps nécessaire à sa réalisation, poussant bon nombre d'architecte à limiter le travail de maquette au minimum (maquettes sensibles ou de petites tailles, rapides à réaliser), à la sous-traiter en dehors du domaine architectural (maquettes-objet réalisées par des artistes ou des maquetistes), voire à l'éliminer complètement du processus de conception.

Prototypage et technologies.

L'industrie et le design sont des domaines appliquant les principes de la recherche appliquée, amenant ainsi la nécessité de fabriquer les outils qui permettront d'appréhender des projets innovants, les prototypes. Leur utilisation étant largement répandue, ils servent pendant le développement des projets mais aussi au-delà de la seule conception (conférences, démonstrations, publicités, ...). Mais bien que l'efficacité de ces derniers pour assister le processus de conception soit réelle, leur fabrication est parfois complexe et coûteuse, autant en terme de ressources matérielles (budget, matériaux et procédés) qu'humaines (temps, énergie, compétences, ...), et peuvent constituer un frein

à leur utilisation sur le long terme. Il existe ainsi un besoin technologique constant dans les secteurs de l'innovation afin d'optimiser de plus en plus les outils et les procédés de fabrication, et ainsi les rendre plus efficaces, plus précis, et moins coûteux.

Ce besoin est en lui-même un moteur de l'innovation dans les procédés de fabrication, qui a donné naissance aux premières techniques de prototypage rapide, comme la découpe avec gaz d'assistance et buse de focalisation en 1967¹⁴ ou le procédé d'impression 3D par stéréolithographie industrialisé à partir de 1986¹⁵. Ces procédés de prototypage rapide sont à leurs débuts réservés à la recherche en raison de leur coût, mais ont rapidement été adoptés et adaptés par l'industrie pour ses propres besoins, pour finalement être généralisés à plus grande échelle dans d'autres domaines de la conception. Certains tendent d'ailleurs à percer le marché auprès du grand public grâce à la démocratisation de ces technologies et leur accessibilité grandissante (prix abordables, CAO, logiciel libre, ressources en ligne, communautés, ...).

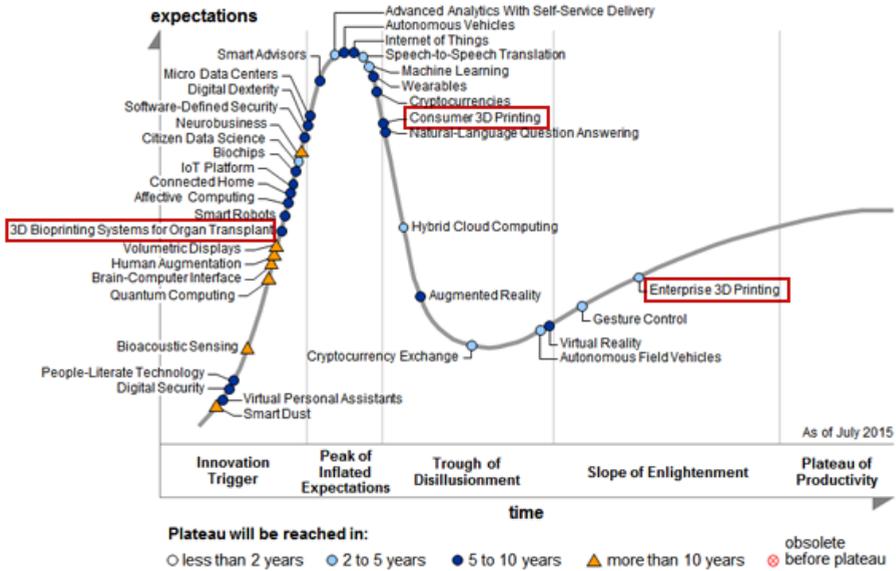


fig.31: Les applications de l'impression 3D à plusieurs niveaux de maturité sur la courbe des tendances.
(Source : cabinet d'étude Gartner)

14. HILTON, Paul A., *The early days of laser cutting*, 11th Nordic Conference in Laser Processing of Materials, Lappeenranta, Finlande, 20-22 août, 2007.

15. Procédé inventé en 1980 par Jean-Claude André, Olivier de Witte et Alain le Méhauté, à l'École Nationale Supérieure des Industries Chimiques de Nancy, puis industrialisé et commercialisé par 3D Systems aux États-Unis à partir de 1986.

Le prototypage rapide, un outil pour l'architecture?

Le retard d'appropriation technologique de l'architecture.

Cette appropriation des technologies par l'industrie, le design, et les secteurs de l'innovation en général est un phénomène courant, qui permet à ces domaines de se maintenir à la pointe des avancées en matière d'outillage. Leur perméabilité à ces procédés innovants permet par ailleurs régulièrement à de nouveaux outils d'émerger et de se perfectionner, avant d'être distribués pour certains à plus large échelle. C'est actuellement le cas des technologies de prototypage rapide, avec non seulement la commercialisation de nombreux modèles d'imprimantes 3D, autant pour le grand public que pour les professionnels y compris spécialisés ; mais aussi avec l'ouverture depuis une dizaine d'années de nombreux fab labs (pour *fabrication laboratory*, 109 recensés en France à la date du 26 août 2016¹⁶). Ce concept, créé à la fin des années 90, consiste en des lieux ouverts au public et mettant à disposition dans un certain aspect communautaire tout un ensemble d'outils de fabrication, et notamment des outils de prototypage rapide¹⁷.

Mais malgré leur démocratisation, nous avons pu constater un écart conséquent entre leur utilisation dans l'architecture et dans d'autres secteurs. Et bien qu'on puisse trouver des initiatives individuelles dans le monde professionnel¹⁸ et constater une sensibilisation grandissante à ces outils dans l'enseignement de l'architecture en France, les pratiques actuelles présentent un retard dans l'appropriation des technologies de prototypage rapide comparé aux autres domaines de la conception.

Différence d'échelle, différence de moyens.

Cet écart entre les pratiques de l'architecture par rapport à celles de l'industrie et du design par exemple peut s'expliquer en partie par la différence d'échelle entre les structures pour le développement des projets, ainsi que par la nature même des projets produits.

16. Fablabo.net, *Cartographie des fablabs français* [en ligne]. Disponible à l'adresse : http://fablabo.net/wiki/Cartographie_des_fablabs_français [consulté le 26 août 2016].

17. Faclab.org, *Les Fab Labs : un concept né au Mit* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://www.faclab.org/decouvrir/les-fablabs/les-fablabs-un-concept-ne-au-mit/> [consulté le 17 juillet 2016].

18. Stratasys.com, *Le prototypage rapide et l'architecture – du virtuel au concret* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://blog.stratasys.com/fr/2012/06/27/le-prototypage-rapide-et-larchitecture-du-virtuel-au-concret/> [consulté le 19 août 2016].

En effet, à l'exception de quelques rares grandes entreprises, le milieu professionnel de l'architecture est essentiellement composé de petites structures : sur un total d'environ 39 000 architectes en France en 2010, plus de la moitié travaillent seuls, et un tiers emploient de 1 à 3 salariés, ce qui représente près de 90% de la pratique¹⁹.

Malgré une légère tendance à la hausse du nombre d'associés par agence, le métier d'architecte reste encore majoritairement solitaire, réduisant grandement les capacités de développement des procédés et des méthodes de travail que ces microstructures peuvent déployer, par manque de temps, de moyens, et d'intérêt. En effet, les processus de conception actuellement en application étant dans l'absolu viables, l'implémentation de nouveaux procédés (machines, outils, méthodes, ...) n'est souvent pas une nécessité en soi, mais un complément aux méthodes déjà en œuvre. L'investissement de départ (financier et intellectuel) nécessaire à l'utilisation de nouveaux outils pourrait ainsi demander un effort démesuré comparé à son intérêt immédiat, et n'est pas toujours abordable pour ces petites échelles de la conception.

19. Archigraphie, *Chiffres et cartes de la profession d'architecte*, pp.46-48 [en ligne]. Source des données avancées : Pôle Emploi. Disponible à l'adresse : http://www.architectes.org/sites/default/files/atoms/files/archigraphie-light_1.pdf [consulté le 3 août 2016].

3.2. Le prototypage rapide pour l'architecture

3.2.1. Un nouvel outil de conception

Historiquement, la maquette d'architecture sous ses différentes formes constitue un outil de conception tridimensionnel complémentaire aux outils de représentation à deux dimensions, comme le dessin libre ou le dessin technique. Aujourd'hui, avec l'utilisation de plus en plus poussée du numérique (DAO, CAO, modélisation 3D, synthèse d'image, ...), la maquette tend à n'être plus qu'exclusivement numérique, moins coûteuse et plus rapide à concevoir que ses analogues physiques.

Maquette numérique et prototypage rapide.

La maquette numérique a de nombreux avantages, allant de la modélisation libre en volume avec des logiciels comme SketchUp, Blender ou 3D Studio Max ; à la modélisation paramétrique avec des outils comme Rhino et Grasshopper ; ou encore au modèle enrichi pour la conception, la gestion, la planification et la maintenance de projets grâce à la modélisation de maquettes BIM. Seulement, dans la pratique concrète qu'on observe dans les agences, ces avantages sont souvent peu exploités et mal compris. Les outils numériques sont utilisés comme une actualisation des méthodes traditionnelles, et non comme un potentiel pour développer de nouvelles manières de concevoir. La maquette numérique est fréquemment adoptée pour son immédiateté et son économie en remplacement de la maquette physique, sans pour autant en posséder les attributs. Cette utilisation des outils numériques, plutôt que d'ouvrir de nouvelles possibilités pour l'architecte, au contraire appauvrit le processus de conception en rendant plus difficile et moins intuitif le contrôle de certains aspects du projet, comme sa volumétrie ou sa spatialité, ce que permettait pourtant la maquette physique : la maquette numérique, à elle seule, n'est pas un outil suffisant pour englober l'ensemble du travail de conception.

Cependant, s'il est effectivement complexe d'intégrer les méthodes traditionnelles du maquettage au sein du processus de conception architecturale (faute de temps et de moyens), leur intérêt est toujours d'actualité, et difficile à remplacer par les outils numériques dans l'état actuel de leur utilisation. À ce moment-là, les technologies de prototypage rapide pourraient fournir une alternative viable en combinant les avantages à la fois des maquettes numérique (faible coût, rapidité de développement, liberté de création)

et physique (manipulation des volumes, rétrospectives, ...). En effet, celles-ci peuvent jouer un rôle de passerelle entre modèle virtuel et modèle réel, valorisant ainsi une utilisation plus complète des outils numériques par la production rapide de maquettes d'architecture à moindre coût.

Le prototypage rapide, intérêts et applications.

L'objectif du prototypage rapide serait alors de s'inspirer des processus de conception industriels afin de faire bénéficier l'architecture des mêmes avantages qu'offre le prototype – en terme d'expérimentation et de retour sur le travail effectué –, en les adaptant à la production de maquettes. Cette utilisation de ces technologies constituerait un moyen de libérer du temps pour la conception aux différents moments du projet, en déléguant aux machines la fabrication de certaines parties de la maquette (pièces complexes, répétitives, ...), et en limitant les interventions humaines nécessaires à l'obtention d'un modèle exploitable.

En terme de projet, l'intérêt immédiat du prototypage rapide est de compléter les méthodes de travail existantes en s'appuyant sur le principe itératif déjà intégré par les processus de conception en place. En libérant le temps nécessaire à la réalisation de maquettes d'étude pour la conception, celles-ci peuvent devenir l'occasion d'expérimenter de nouvelles solutions à toutes les phases du projet, et d'en multiplier les variantes pour de la recherche formelle ou volumétrique, de l'aménagement d'espace ou de territoire, des essais de textures, de matériaux, de couleurs, etc. Cette démarche expérimentale ouvre également la porte à d'autres formes d'architecture comme l'architecture organique, paramétrique et autres courants parfois difficiles à représenter en maquette, et favorise le mécanisme d'aller-retour entre modèle physique et modèle numérique. En effet à l'inverse de ce dernier qui peut être contraint par les limitations du logiciel utilisé, il est souvent plus simple d'intervenir directement sur un modèle physique pour effectuer certaines opérations, comme couper, ajouter, modifier, creuser, déplacer des parties, ou encore combiner les maquettes ou d'autres objets, afin d'enrichir la réflexion autour du projet avec des pistes alternatives de conception.

Aux phases plus avancées de la conception, la précision qui peut être obtenue avec les technologies de prototypage rapide fait paraître la possibilité de réaliser des maquettes à des échelles plus resserrées, de l'ordre de la maquette-détail. Ceci ouvre la possibilité de tester et de vérifier par exemple des systèmes structurels, des procédures ou des assemblages innovants, sur

mesure, et d'anticiper très en amont les problèmes de fabrication et de montage, difficiles à visualiser sans un modèle manipulable, et complexes à représenter avec des méthodes traditionnelles.

Sur l'ensemble du processus de conception, l'utilisation plus fréquente et plus rapide de la maquette comme outil de conception permet de retracer les évolutions successives du projet, et donne les moyens de faire un travail de rétrospective sur les avancées, en comparant les différentes solutions et corrections apportées au fil du temps. Ces maquettes, de toutes natures, sont également autant de supports de communication à tous les niveaux, que ce soit pour montrer et expliquer la démarche de projet (maquettes d'études), pour communiquer des procédés et techniques constructives (maquettes-prototype), ou encore présenter le projet à un jury, un client ou le grand public (maquettes-objet).

Implications et perspectives.

L'intégration des technologies de prototypage rapide dans le processus de conception architecturale n'a pas pour vocation de proposer un remplacement aux méthodes de conception actuelles. Il s'agit à l'inverse de venir les compléter, et d'introduire de nouvelles manières de travailler le projet, adaptées aux processus existants et en adéquation avec les outils disponibles.

Aussi cette évolution des méthodes de travail ne peut-elle pas se faire seule, et doit plutôt faire partie d'une volonté plus globale d'appropriation des technologies contemporaines et des outils numériques. Cette démarche passe nécessairement par une remise en cause de l'utilisation de ces outils et une période d'apprentissage (ou de réapprentissage), demandant à la fois une certaine curiosité vis-à-vis de leurs possibilités, et une certaine rigueur pour pouvoir les exploiter. Cette dynamique permettrait en outre de rattraper une partie du retard d'appropriation des techniques et technologies qu'on peut parfois observer dans les différentes pratiques de la conception architecturale.

De plus, si les technologies de prototypage rapide agissent à court terme sur les capacités de production, ce sont également des outils qui pourraient avoir de grandes répercussions sur le moyen, voire long terme. En effet, ces procédés actuels évoluent conjointement avec d'autres technologies qui commencent à être investies, et qui pourraient dans un futur plus ou moins proche créer de nouvelles possibilités pour l'architecture. On pourra énoncer

par exemple les nombreuses techniques de scanner tridimensionnel²⁰, qui permettent d'obtenir une représentation 3D plus ou moins fidèles d'objets réels de tailles variées, et qui pourraient faciliter la transition du réel au virtuel (intégration de bâtiments existants dans la maquette numérique). De même, les procédés d'impression 3D sont en plein essor, trouvant de plus en plus d'application notamment dans le domaine de la construction (impressions de ponts en acier²¹ (fig. 32), de bâtiments en béton (fig. 33 et 34), ...).

3.2.2. Les obstacles à la mise en place en architecture

Malgré les potentiels et les éventuelles perspectives d'évolution liées aux outils de prototypage rapide, nous avons vu que leur utilisation en architecture était encore marginale, difficile à mettre en place dans les petites structures. À l'instar d'autres technologies numériques qui ont eu et ont encore du mal à percer, il existe de nombreux freins à cette intégration dans le milieu architectural, liées à la fois aux moyens et aux contraintes de la profession, mais aussi à un manque d'information et de sensibilisation aux enjeux et au fonctionnement de ces technologies.

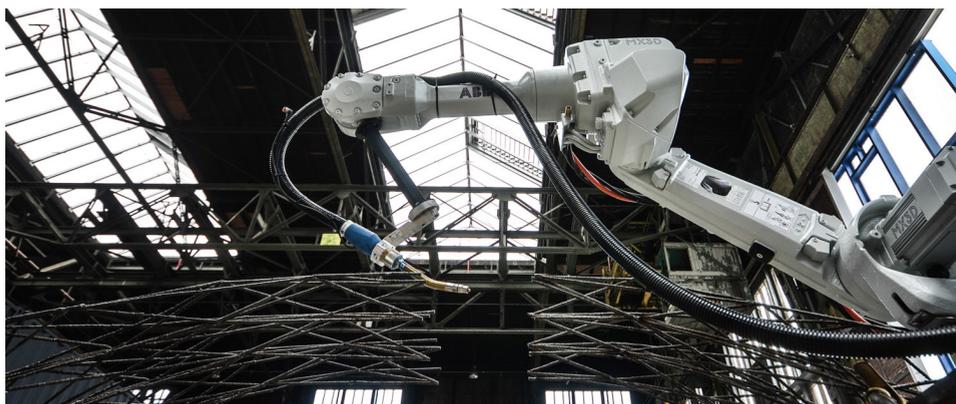
Il existe différentes sources de blocages, comme l'expliquent certaines théories de la psychologie sociale, comme le suggère la *Lazy Person Theory*²². Ce modèle psychologique part de la conjecture de base que l'utilisateur est paresseux, et s'orientera de préférence vers les outils et les méthodes qui demanderont le moins d'effort, à moins que sa survie ne soit en cause. Le critère de sélection n'est pas issu d'un raisonnement rationnel, et favorisera la manière la plus directe d'effectuer une tâche, qui n'est pas nécessairement la

20. MINÉ, Adrien, « Méthodologie d'acquisition 3D par scanner et traitement de nuage de points », mémoire de master en architecture spécialité A.M.E., sous la direction d'Olivier MALCURAT, Nancy, École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy, 2016, 91p.

21. ASME.org, *3D Printing Bridges*, décembre 2015 [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://asme.org/engineering-topics/articles/manufacturing-design/3d-printing-bridges> [consulté le 8 mars 2016].

Technologie conçue par MX3D, société de recherche et développement sur l'impression 3D. Page du projet disponible à l'adresse : <http://mx3d.com/projects/bridge/>.

22. TÉTARD, Franck et COLLAN, Mikael. Lazy user theory: A dynamic model to understand user selection of products and services. Dans : *HICSS'09. 42nd Hawaii International Conference on System Sciences* [en ligne]. IEEE, 2009, p.1–9. Disponible à l'adresse : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4755755 [consulté le 28 août 2016].



*fig.32: Technologie d'impression 3D en acier pour la construction de passerelles.
(Source : MX3D)*



fig.33: Procédé d'impression 3D en béton par addition de couches.



fig.34: Suite hôtelière indépendante intégralement imprimée en 3D aux Philippines, réalisée par Andrey Rudenko.

meilleure ou la plus efficace. Ce modèle définit ainsi trois aspects de l'effort, dont l'évaluation va influencer sur le processus de décision :

- **L'effort financier**, qui concerne les investissements monétaires, et peut inclure toute autre ressource matérielle ayant une valeur ;
- **L'effort en temps**, qui se rapporte à la durée estimée des tâches, et pousse l'utilisateur à choisir l'option qui lui paraît la plus rapide ;
- **L'effort physique ou intellectuel**, qui touche à l'investissement personnel de la personne, laquelle visera à fournir le moins d'énergie possible pour réaliser la tâche au plus simple et au plus direct.

Ce modèle du comportement permet de comprendre l'appréhension qu'il existe des nouvelles technologies. En effet, celles-ci demandent à fournir un effort plus important que des technologies déjà maîtrisées. Il en découle une grande difficulté à accepter le changement, notamment pour l'intégration de nouvelles méthodes et de nouveaux procédés.

Ainsi, dans le cadre de cette étude, la première source de blocage est d'ordre financier ; les technologies de prototypage rapide s'accompagnent d'un coût que peu sont prêts à investir pour avoir accès à des méthodes et procédés non maîtrisés. Dans un second temps, le prototypage rapide est souvent perçu comme un accessoire non nécessaire, et non comme un outil de conception à part entière, ce qui décourage la mobilisation du temps et de l'énergie nécessaires à l'apprentissage des méthodes associées. En raison de cette vision incomplète de leurs enjeux et potentiels, ces outils peinent ainsi à susciter un intérêt suffisant pour remettre en question des processus actuellement en place, et ainsi éventuellement engager une démarche d'amélioration.

Coûts initiaux et coûts de fonctionnement.

Le principal frein à l'utilisation du prototypage rapide correspond donc à l'investissement financier nécessaire à sa mise en place, indépendamment des éventuels apports que ces technologies sont en mesure de fournir. Cet investissement est le point de départ essentiel pour amorcer une dynamique d'expérimentation avec ces outils, pouvant mener à leur intégration si leurs intérêts semblent justifier la poursuite de leur utilisation.

Les coûts peuvent tout d'abord concerner les dépenses directement liées à l'acquisition du matériel en lui-même. Selon la ou les technologies concernées et les capacités de celles-ci (dimension des pièces fabriquées, matériaux, ...),

le montant que représente cet investissement peut s'échelonner de quelques centaines à plusieurs milliers d'euros, avec une très forte disparité de prix pour chaque procédé, et non toujours en corrélation avec la qualité de l'équipement en question – en particulier pour des usages non industriels. Le choix du matériel requiert ainsi une certaine éducation par rapport aux outils disponibles et des fabricants, laquelle n'est pas forcément simple à acquérir (informations éparses et parfois difficiles à trouver).

En plus de l'acquisition du matériel, on peut également comptabiliser les coûts de fonctionnement et d'entretien, plus ou moins importants selon les procédés (contrats de maintenance pour des machines industrielles, matériaux et ressources, réparations, ...). Les dépenses liées à l'utilisation des technologies de prototypage rapide sont délicates à estimer, incitant ainsi davantage à faire appel de manière ponctuelle à un professionnel extérieur lorsqu'elles sont nécessaires, plutôt que d'investir dans ces outils et d'expérimenter directement avec.

Temps de formation et investissement personnel.

Outre les dépenses financières, l'utilisation des technologies nécessite un investissement personnel pour l'apprentissage des outils et des logiciels qui leurs sont associés, mais aussi des pratiques de dessin et/ou de modélisation impliquées pour leur bon fonctionnement. Cet apprentissage inclut autant l'idée de formation concrète, par le biais de stages, d'interventions de professionnels, ou en autodidacte, que la sensibilisation et l'expérimentation avec ces outils. La formation initiale consiste ainsi à apprendre l'utilisation théorique des outils et les principes du ou des procédés, mais aussi à en comprendre les applications et les limitations. Cette étape demande un effort de recherche et une volonté d'expérimenter sur le matériel à disposition, afin d'acquérir les connaissances nécessaires à son utilisation.

Cette formation, qu'elle soit faite en autonomie ou assistée par un professionnel, demande un temps conséquent. Elle peut prendre de quelques jours à quelques semaines, voire plusieurs mois en fonction des affinités individuelles et de l'investissement personnel pour l'adoption de nouveaux outils. À l'instar des considérations budgétaires que nous avons vues plus tôt, le temps que peut demander ce type de formation n'est pas toujours disponible. Ou tout du moins il peut être considéré comme mieux investi autrement (sur un projet en cours ou dans d'autres formations par exemple).

Résistance au changement.

La source de blocage la plus importante reste cependant d'ordre psychologique : une agence installée et ayant déjà eu le temps d'élaborer son propre processus de conception ne sera pas prompte à en changer. Comme l'a conceptualisé Kurt Lewin, spécialiste en psychologie sociale et comportementale, à travers ses travaux, la notion de changement implique trois étapes²³ : une période de déblocage (*unfreeze*), une période de changement (*change*) et une période de consolidation du changement (*freeze*).

De manière générale, le changement intervient habituellement suite au constat d'un problème, d'une faille dans le processus (perte d'efficacité, incapacité à tenir les objectifs, stagnation, ...). À l'inverse, l'intégration de nouvelles méthodes ou de nouveaux outils implique une remise en question active du processus, indépendamment de son efficacité, ce qui demande une démarche critique et une volonté d'innovation. Ainsi, quel que soit le domaine concerné, les changements dans un processus sont compliqués à mettre en œuvre, et ils seront d'autant plus difficiles à accepter que les évolutions proposées sont méconnues ou incertaines.

Dans le cas des outils de prototypage rapide, leur intégration demande dans un premier temps que le besoin soit reconnu et identifié (période de déblocage). Cette étape doit mobiliser des connaissances solides sur les outils – qui, comme nous l'avons vu, peuvent être compliquées à acquérir – afin d'engager une décision sur l'utilisation ou non de ces outils.

Dans un second temps, l'application des changements demande un temps d'apprentissage et d'appropriation des méthodes, avant de pouvoir les consolider dans un processus final (*change* et *freeze*). Même si l'évolution est souhaitée, le temps d'adaptation nécessaire correspond parfois à une période de baisse de productivité et/ou d'efficacité, ce qui peut poser problèmes dans les structures avec peu de personnel, rendant d'autant plus difficile l'intégration de ces outils.

23. BURNES, Bernard. *Kurt Lewin and the Planned Approach to Change: A Re-appraisal*. septembre 2004. ISBN 0022-2380.

3.2.3. Une méthode d'intégration du prototypage rapide pour la conception architecturale

Les technologies de prototypage rapide ont un fort potentiel pour le développement de projets architecturaux, en rendant la pratique de la maquette accessible dans les temps courts de la conception. Mais même si ces procédés ne sont pas récents, leur utilisation dans le monde de l'architecture reste rare malgré les avantages qu'ils représentent. L'objectif ici serait alors de proposer une méthode pour inciter et assister l'appropriation de ces outils par les architectes, pour ainsi favoriser l'évolution des démarches contemporaines de l'architecture.

Dans les faits cependant, la diversité des pratiques architecturales et des organisations de la conception n'a jamais permis d'établir un processus détaillé et universel pour développer un projet. Au contraire, chaque agence d'architecture est soumise à un contexte différent, avec son personnel et ses connaissances, ses objectifs et ses exigences, ses méthodes et sa créativité propre. Le respect des spécificités de chaque pratique est un point important pour induire leur évolution.

Généralités et objectifs de la méthode.

Avant toute chose, il est important de préciser que la méthode proposée doit être issue d'une démarche volontaire et interne à l'agence qui la met en place, car elle seule est en mesure d'identifier réellement ses besoins. Sa mise en place doit être motivée par une certaine curiosité pour les technologies numériques et leurs applications, et une volonté de faire progresser sa pratique architecturale propre, en particulier par la (ré)intégration de la maquette au sein des usages de l'agence. C'est avec ces prérequis que la méthode que nous développons pourra mener à une remise en cause constructive et à l'évolution des processus de conception en œuvre.

Dans cette optique, l'approche que nous développons s'appuie sur les apprentissages que l'on peut tirer des autres domaines de la conception, comme l'industrie et le design, et se rapproche des méthodes agiles de la conception. Le point central de la démarche est alors de reprendre les principes de la recherche appliquée et de l'amélioration continue. L'intérêt est d'encourager le développement d'idées nouvelles à l'aide d'outils innovants pour la conception en architecture ; plus particulièrement pour les technologies de prototypage rapide et les outils numériques qui leur sont associés.

La méthode se base sur une analyse critique du processus de conception préexistant. Celle-ci servira par la suite de point de départ pour le faire évoluer en y intégrant une utilisation des procédés du prototypage rapide. Nous tiendrons compte à la fois des spécificités de chaque situation, des capacités de développement de la structure de conception et des méthodes qu'elle maîtrise. L'objectif est alors de s'adapter aux besoins, aux attentes et à l'échelle de l'agence, plutôt que d'imposer une évolution forcée vers des méthodes et des technologies qui seront inadaptées, mal utilisées et mal comprises sous la contrainte.

Nous chercherons dans cette démarche à adapter l'utilisation des outils de prototypage comme complément des outils numériques déjà en place. La réutilisation et l'approfondissement des connaissances existantes seront ainsi favorisés afin d'éviter les phénomènes de rupture (changement de logiciel de conception par exemple), et faciliter l'intégration de nouvelles méthodes.

Analyse du contexte et du processus de conception.

La première étape de la méthode consiste en une analyse critique et objective du processus de conception à l'œuvre. Son objectif est de fournir les éléments nécessaires à la compréhension du fonctionnement de l'agence, afin d'être en mesure de proposer des pistes d'évolution adaptées à ses pratiques et besoins spécifiques.

Il s'agira ainsi d'identifier le profil de l'agence ainsi que le contexte dans lequel elle évolue. Ces données sont importantes à prendre en compte, car elles vont influencer directement sur ses attentes et ses besoins d'une part, mais aussi sur ses capacités d'évolution et sur les outils qui pourront être mis en œuvre. Cette analyse doit ainsi se concentrer sur trois points :

- **L'activité de l'agence**, qui conditionnera les méthodes, les exigences et les problématiques manipulées par l'architecte. Elle peut être caractérisée par :
 - › La nature du travail de conception : architecture privée ou publique, urbanisme, paysagisme, design d'espace, de mobilier, ... ;
 - › Les types de missions : réhabilitation ou construction neuve, valorisation de patrimoine, expositions, événementiel, ... ;
 - › Les objets architecturaux manipulés : habitat individuel ou collectif, locaux commerciaux, bureaux, équipements publics, ... ;

- **Les capacités internes de l'agence**, dont vont dépendre l'ensemble du processus et des démarches de conception, ainsi que les possibilités (et les difficultés) d'évolution. On notera en particulier :
 - › Les effectifs de l'agence : nombre et qualifications des salariés et ou des associés, de passage ou permanents ;
 - › Le matériel disponible : outils classiques de maquettage et outils numériques de fabrication, partenariats, fab lab, ... ;
 - › Les logiciels de conception utilisés : dessin 2D ou 3D, logiciels de modélisation géométrique, paramétrique, sémantique, BIM, gestionnaire de projet, ... ;
 - › Les compétences internes : niveau d'utilisation des outils disponibles, degré d'implication individuelle, ... ;

- **Le déroulement du processus de conception**, qui se définit comme l'enchaînement des différentes actions pour le développement du projet. On s'attachera ici à identifier :
 - › Les étapes du processus : nature, durée et chronologie des avancements, niveau de détail du projet, outils impliqués, ... ;
 - › Les produits du processus : maquettes, documents, éléments techniques, graphiques ou textuels produits pour la conception et/ou pour la communication avec les autres acteurs du projet.

L'ensemble de ces données permet de dresser une image plus précise des pratiques de l'agence. Cette compréhension du contexte est un prérequis pour démarrer une analyse plus précise du processus de conception, ainsi que pour le remettre en question sur des aspects précis (méthodes, étapes, ...). On vise ainsi à mettre en exergue les points critiques du processus, et d'en comprendre les implications afin de pouvoir définir des pistes d'amélioration.

Le principal point d'intérêt de l'analyse est la détection des ruptures dans le continuum numérique. Ces dernières correspondent à des moments dans le processus de conception où il y a discontinuité dans l'utilisation de la maquette virtuelle. Dans le cas d'une utilisation des procédés de prototypage rapide, elles sont ainsi sources de redondance dans le travail effectué – par

exemple, remodelisation du projet pour l'impression 3D alors qu'une maquette numérique existe —, et donc de perte de temps et d'énergie.

Toujours dans une démarche critique, l'analyse se concentrera également sur le questionnement de l'efficacité des outils utilisés aux différents moments du processus, sans non plus remettre en cause leur utilisation même. L'intérêt ici est d'une part de repérer les méthodes (de dessin, de modélisation, d'organisation, ...) qui posent des problèmes récurrents (comme une surconsommation de temps ou de ressources) ; et d'autre part d'identifier les besoins non satisfaits et les outils manquants pour améliorer la maîtrise de l'ensemble des aspects du projet. Ce travail d'analyse permet ainsi de mettre en évidence des pistes d'amélioration pour le processus de conception et les pratiques qu'il met en œuvre.

Identification des besoins en maquetage.

Avec ces informations sur le processus de conception, il est possible d'émettre des hypothèses sur ses possibles évolutions. Plus particulièrement, il s'agit de porter une réflexion sur l'intégration (ou la réintégration) du maquetage à une ou plusieurs de ses étapes, dans le but d'enrichir le projet par la fabrication de maquettes. Il convient alors d'identifier les besoins qui correspondent à cette démarche, et l'apport concret que les maquettes physiques pourraient apporter au travail de conception.

La définition de ce besoin est essentielle, dans la mesure où celui-ci aura une grande influence sur le choix des procédés de prototypage d'une part, et sur les méthodes qui conditionneront leur mise en œuvre d'autre part. Il conviendra alors de délimiter précisément les attentes et les exigences liées à la maquette. On considérera notamment :

- **Les échelles de maquettes et leurs dimensions**, qui n'utilisent pas les mêmes modes de représentation selon qu'elles concernent l'urbanisme, le paysage, l'architecture, l'aménagement, ou encore le design. Elles auront une influence directe sur les outils qui pourront être mis en œuvre, ainsi que sur les capacités du matériel (dimensions maximales, matériaux travaillés, ...) :
- › La maquette urbaine ou paysagère : centrée sur un terrain ou un territoire plus ou moins étendu (grande échelle). Elle a généralement de grandes dimensions, mais un niveau de représentation

bas (figuratif, peu voire pas de détail), et nécessite une précision moindre ;



*fig.35: Maquette d'urbanisme, bâtiments réalisés en impression 3D.
(Source : 3D Leman)*

- › La maquette d'architecture ou d'aménagement : centrée sur le bâtiment et/ou l'espace (échelle petite à moyenne). Les formes sont variées et peuvent demander une granularité de la représentation faible (modèle schématique) à élevée (modèle détaillé).



*fig.36: Maquette de concours, réalisée en impression 3D.
(Source : Agence Cub)*

- **Les types de maquettes et leurs destinations**, déterminant entre autres le niveau d'exigence de la représentation et les temporalités de la fabrication. Ceci caractérisera notamment les attentes en matière d'efficacité et/ou d'efficience, ainsi que le degré de précision des outils, voire le niveau de finition des matériaux travaillés. Par exemple :

- › La maquette d'étude : destinée à la recherche, l'expérimentation ou la conception. On cherchera l'efficacité dans sa réalisation, c'est-à-dire une fabrication demandant un minimum de temps, avec un maximum d'effet pour visualiser, manipuler et comparer rapidement les éléments du projet ;



*fig.37: Maquette d'étude, pièces réalisées par découpe laser.
(Source : Cargo Collective, réalisation : Margaux Lejeune)*

- › La maquette-prototype : destinée à la conception détaillée, la validation d'hypothèses de conception ou la simulation. Elle nécessite un haut niveau de précision (justesse des tests et simulations) et peut exiger des propriétés physiques particulières (résistance pour un test de structure par exemple) ;



*fig.38: 3. Maquette-prototype de la fondation Louis Vuitton,
réalisée par frittage de poudre pour étude en soufflerie.
(Source : ZOME)*

- › La maquette-objet : destinée à la présentation ou à la démonstration du projet. Sa réalisation donne une forte importance à l'aspect visuel de la maquette (matériaux et finitions) afin d'en communiquer les aspects à différentes échelles et/ou de convaincre (client, jury, public, ...).



*fig.39: Maquette de concours en samba réalisée par découpe laser (projet) et maquettage traditionnel (socle et bâti existant).
(Source : Tangram Maquettes)*

Cette démarche permet d'identifier les besoins et les attentes en matière de maquettage, en prenant en compte le niveau de représentation nécessaire à chaque étape, ainsi que les caractéristiques physiques des maquettes (dimensions, précision et finition). Nous pouvons ainsi déterminer précisément quelles formes les maquettes réalisées prendront (types et échelles) et à quels moments du projet elles sont produites (recherche initiale, conception, validation, communication, ...). Il devient alors possible d'extraire de ces informations un ensemble de critères et d'exigences concernant le choix des procédés correspondants (impression 3D, découpe laser, techniques traditionnelles, ...), et dans quelles mesures ils interviennent (proportion d'intervention humaine dans le processus de fabrication).

De plus, cette étape est essentielle pour estimer les coûts du changement par rapport aux ressources disponibles (locaux et budget) et aux compétences requises pour l'intégration des procédés de prototypage rapide (acquises ou à acquérir). Il conviendra alors d'évaluer l'intérêt de la démarche en comparant ces coûts (financier, temps d'apprentissage et d'adaptation) aux impacts potentiels de ces nouveaux outils sur le processus de conception (nouvelles possibilités de projet, gain en productivité, ...).

Définition des méthodes et des outils.

L'identification des besoins de maquettage permet de mettre en perspective les méthodes et les outils nécessaires à la réalisation de modèles dans le temps de la conception. Il est alors possible tout d'abord de définir quels procédés de prototypage rapide pourront être intégrés dans la démarche de projet, en fonction de ce qui est accessible à l'échelle de l'agence (acquisition, emprunt de matériel, fab labs ou partenariats) ; puis il s'agira de définir les modalités de leur mise en œuvre en terme de processus.

À ce stade, il est important de rappeler les principaux intérêts du prototypage rapide, qui sont la production de maquettes en un minimum de temps et avec un minimum d'interventions ; et la réalisation de modèles complexes qu'il serait difficile de réaliser à la main. Ces deux aspects offrent ainsi une plus grande force de proposition et de recherche dans la conception des projets architecturaux, en permettant d'expérimenter de nombreuses variantes d'un même projet, tout en étant moins limité par les capacités de production (temps limité ou formes complexes).

De plus, nous avons vu pendant le déroulement du stage l'importance des enjeux du numérique dans le cadre des procédés de prototypage rapide. En particulier nous avons pu constater les problèmes qui pouvaient surgir lors de la rupture du continuum numérique de la maquette, notamment la redondance de l'information et du travail de modélisation. À l'échelle d'un projet architectural, ces enjeux sont d'autant plus importants. Ceci mène depuis quelques années à la généralisation de l'utilisation de la maquette BIM, et à la mise en place des standards et conventions destinés à normaliser les échanges entre acteurs de la construction²⁴. Cette pratique du BIM dans l'architecture, qui est destinée à être exigée dans les années à venir²⁵, vise à maintenir le continuum numérique de la maquette, et peut ainsi constituer une base de connaissances commune à l'ensemble de la profession.

Dans notre cas, les méthodes de modélisation du BIM peuvent faire office d'un socle de compétences partagées par les architectes. Or, afin d'assurer

24. CART, Léopold, « Les conventions BIM : l'enseignement, clé de la pratique du BIM », mémoire de master en architecture spécialité A.M.E., sous la direction d'Olivier MALCURAT, Nancy, École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy, 2016, 120p.

25. Cette exigence ne concerne actuellement que le cadre des marchés publics. Directive 2014/24/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 février 2014 sur la passation des marchés publics, article 22.4.

la soutenabilité des changements dans le processus vis-à-vis de ses utilisateurs, il est important qu'ils soient le plus simple possible à adopter²⁶. L'approche adoptée s'attachera ainsi à réutiliser ces compétences afin de développer l'utilisation des procédés de prototypage rapide en relation avec la maquette BIM. Celle-ci évitera ainsi non seulement la redondance du travail de modélisation, mais limitera également les temps d'apprentissage nécessaires à l'utilisation des technologies de fabrication digitale.

3.2.4. Élaboration d'un processus de conception architecturale intégrant des technologies de prototypage rapide

En prenant compte de l'ensemble des données issues de l'analyse précédente, nous pouvons définir les grandes lignes d'une méthode faisant usage des technologies de prototypage rapide, et s'insérant dans la démarche de conception architecturale. Le processus proposé s'inspire ainsi en grande partie des méthodologies agiles, et plus particulièrement de la méthode Scrum. Elle en reprendra ainsi les principes généraux en mettant en place des routines de développement, de production, et d'amélioration continue du projet et du processus lui-même.

Rôles et acteurs de la conception.

Le processus que nous proposons reprend une partie des rôles définis par la méthode Scrum, à savoir :

- **Le client**, qui définit ses attentes et ses exigences vis-à-vis du projet. Il est maintenu en dehors du processus de conception à proprement parler afin d'éviter les interférences avec le travail de l'architecte, mais sera consulté régulièrement pour réévaluer la pertinence du développement du projet ;
- **Le chef de projet**, (architecte titulaire) qui contacte le client, traite la demande initiale et définit la direction que prend le projet. Il traduit les exigences du client en éléments réalisables, en définit les priorités, et s'assure de la conformité du travail fourni à la demande initiale. Dans les agences avec des effectifs réduits, il fait également partie de l'équipe ;

26. Selon le modèle de la *Lazy Person Theory* : plus l'effort nécessaire au changement est minime (faible investissement) et rentable (récompense élevée), plus il est soutenable pour les personnes impactées.

- **L'équipe**, constituée d'un nombre limité de personnes (architectes associés), qui travaille sur la conception du projet et a la responsabilité de la production des livrables à chaque étape. Elle est autonome sur la gestion de son travail, c'est-à-dire qu'elle décide de la meilleure manière de réaliser les tâches définies par le chef de projet.

Déroulement du processus.

Le processus en lui-même se présente sous la forme d'une itération de conception. En ce sens, il est composé d'une série d'étapes déterminées, à l'issue desquelles soit une nouvelle itération est amorcée (poursuite du développement), soit le projet passe à la phase suivante (exécution, par exemple).

Il définit ainsi trois niveaux de profondeur imbriqués pour la conception, chacun ayant sa propre temporalité :

- **Les itérations**, durant de 1 à 4 semaines, qui aboutissent systématiquement à un état d'avancement présentable au client ;
- **Les cycles moyens**, durant de 1 à 7 jours selon les besoins de l'équipe, et qui permettent de revoir les stratégies de conception à intervalles réguliers ou de manière ponctuelle ;
- **Les cycles courts**, durant de 0 à 4 heures, qui correspondent à la réalisation de tâches élémentaires par les membres de l'équipe.

Avant de passer au détail des étapes du processus, il est important de préciser leur signification. En effet, comme nous l'avons mentionné, la méthode proposée s'inspire largement des méthodologies agiles, qui prônent notamment une grande flexibilité dans le travail et une attention particulière portée à la communication à tous les niveaux. En ce sens, les étapes que nous allons définir constituent une trame, et non une procédure. Leurs durées et leurs enchaînements peuvent être « cassés » à tout moment du processus, par exemple pour convoquer l'ensemble des membres de l'agence en dehors des étapes prévues, ou pour sortir prématurément de l'une ou l'autre lorsque le développement du projet l'exige. Les membres de l'agence ne sont pas isolés ; au contraire la communication est indispensable pour le fonctionnement de ce type de processus. Ce dernier encourage ainsi les interactions entre personnes et groupes de travail, les échanges informels, le partage de connaissances, l'entraide, et la mise en commun de l'expérience ; aspects humains du processus qui ne peuvent être représentés sur un modèle théorique.

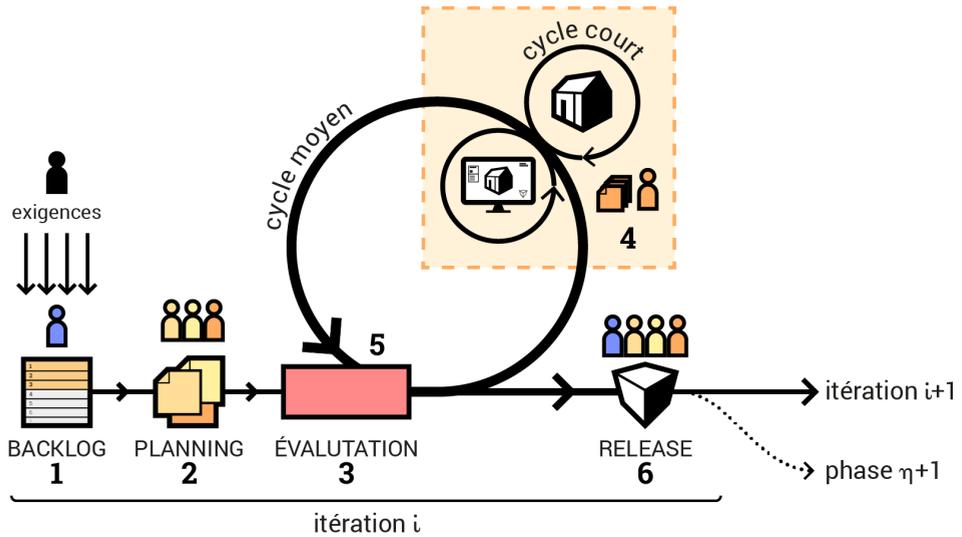


fig.40: Itération de conception, processus intégrant les procédés de prototypage rapide.
(Version simplifiée, voir dépliant pour une plus grande taille)

Le processus proposé se décompose en six étapes :

- 1- **Backlog** : cette étape est le point d'entrée de l'itération. Le chef de projet compile les exigences, les demandes et les requêtes émises par le client à l'issue de l'itération précédente. Celles-ci sont ensuite traduites en tâches concrètes à réaliser (livrables, points à réviser, nouvelles idées, ...). Elles sont alors ajoutées aux tâches déjà en cours, et la priorité de chaque élément de la liste est réévalué par rapport aux nouvelles entrées ;
- 2- **Planification** : la liste des tâches est soumise à l'équipe de travail, qui va sélectionner avec le chef de projet les livrables réalisables d'ici la fin du cycle de l'itération, en commençant par les éléments de haute priorité. La durée de ce cycle est définie à ce moment, et correspond à un temps moyen allant de 1 à 4 semaines en fonction des tâches et des capacités de l'agence ;
- 3- **Évaluation de groupe (entrée de cycle)** : à sa première occurrence, l'évaluation de groupe correspond au point d'entrée du cycle de conception. L'équipe se réunit pour répartir la responsabilité des

livrables (tâches) sélectionnés pendant le backlog entre ses différents membres, individuellement ou en formant des groupes de travail ;

4- Auto-évaluation : c'est à cette étape que la conception du projet en tant que tel se déroule. Le travail est fait en autonomie par rapport aux autres membres de l'équipe, et correspond à la succession de nouveaux cycles de conception, plus courts, pour la réalisation de tâches spécifiques (moins de 4h). Chaque cycle comporte deux phases :

- › Une phase de prototypage, qui peut être virtuel (modélisation 3D, paramétrique, ...) ou physique (impression 3D, découpe, usinage, ...). Ces deux aspects du prototypage sont intrinsèquement liés, et peuvent être réalisés en alternance ou en parallèle. Il s'agit dans tous les cas d'expérimenter diverses solutions de projet, ou de générer/accumuler des variantes d'une même solution, soit par la modélisation informatique (maquette numérique), soit la fabrication de modèles (maquette physique) ;
- › Une phase d'auto-évaluation, où les maquettes (numérique et physique) sont retravaillées, commentées et critiquées par la personne ou le groupe de travail. À l'issue de cette phase, le travail effectué est évalué pour déterminer s'il est prêt pour une revue avec l'ensemble de l'équipe, ou si un nouveau cycle court doit être utilisé ;

5- Évaluation de groupe (sortie de cycle) : à la fin de chaque cycle de conception, l'équipe se réunit afin que chaque membre puisse soumettre son avancement à ses collaborateurs. Les propositions sont discutées afin de valider ou de réfuter les hypothèses de conception émises individuellement. Les tâches validées sont archivées, et celles restantes sont réévaluées (temps alloué, priorité et affectation de la tâche). Si des tâches sont encore en cours ou ne sont pas validées à l'issue de l'évaluation de groupe, un nouveau cycle de conception est amorcé. Si l'ensemble des tâches allouées lors de la planification sont validées, ou si la durée déterminée pour le cycle arrive à terme, alors le cycle s'arrête, et le processus passe à l'étape suivante ;

6- Release : lors de cette étape, l'équipe et le chef de projet effectuent ensemble une rétrospective de l'itération en cours, qui se décompose en deux parties :

- › La rétrospective sur le processus, qui va viser à discuter du déroulement de l'itération en cours, et des méthodes qui y ont été appliquées, afin d'identifier les failles dans le processus (tâches non terminées, erreurs d'interprétation, ...). L'objectif est alors d'en extraire les problèmes sous-jacents (mauvaise répartition ou sous-estimation des tâches, cycles trop courts, problème de communication, ...), et de proposer des solutions à appliquer dans les itérations suivantes ;
- › La rétrospective sur le projet, permettant d'initier une discussion ouverte sur les livrables produits pendant l'itération en cours. L'ensemble des membres de l'agence sont sollicités pour présenter la production, et en valider la conformité par rapport aux exigences initiales. L'ensemble des livrables exploitables sont ensuite soumis au client pour validation finale. À l'issue de cette discussion, en fonction de l'état d'avancement du projet et des retours client, le projet entrera soit dans une nouvelle itération (itération $i+1$), soit dans la phase suivante du projet (phase $n+1$, d'exécution par exemple).

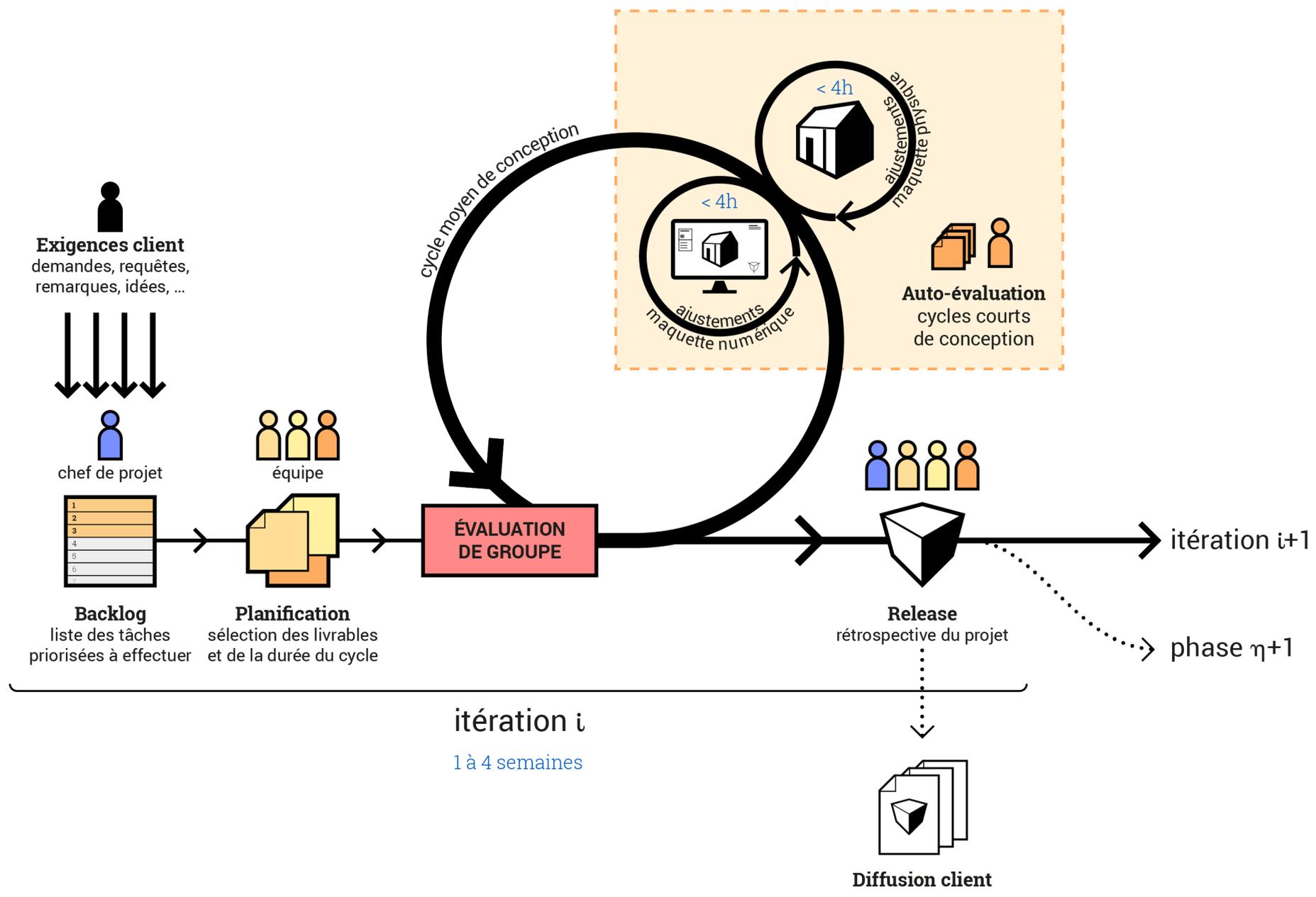


fig.41: Déroulement d'une itération de conception dans le cadre d'un processus intégrant les procédés de prototypage rapide.

3.2.5. Une utilisation du prototypage rapide en architecture : l'exemple du Norwegian Wild Reindeer Pavilion



Le *Norwegian Wild Reindeer Pavilion*, plus connu en Norvège sous le nom de Tverrfjellhytta a été conçu et réalisé par l'agence Snøhetta. Le projet trône à 1 222 mètres au-dessus du niveau de la mer, au bout d'une randonnée longue de 1,5km à Dovre, municipalité de Hjerking. L'édifice est utilisé en tant qu'observatoire par la Fondation des rennes sauvages à des fins éducatives, mais est ouvert au public tout au long de l'année.

Le concept de départ de l'édifice était de construire une enveloppe extérieure rigide en acier brut, abritant un cœur organique en bois. La façade extérieure sud où se trouve l'entrée et l'intérieur sont définis par la présence d'un grand volume en bois. L'ouvrage dégage ainsi un espace singulier et chaleureux, tout en développant un panoramique impressionnant en vitrant intégralement la façade nord.

Modélisation et prototypage : l'outil au service de la conception.

L'agence Snøhetta définit elle-même sa démarche comme une recherche permanente de solutions plus efficaces de production, avec une attention particulière portée sur l'utilisation des nouvelles technologies pour la conception et pour la fabrication. Ainsi, pour le développement de ce projet, les architectes ont éludé les méthodes traditionnelles de la conception, et sont passés directement de l'idée à la réalisation d'une maquette numérique en 3D, à l'aide du logiciel de modélisation Rhino.

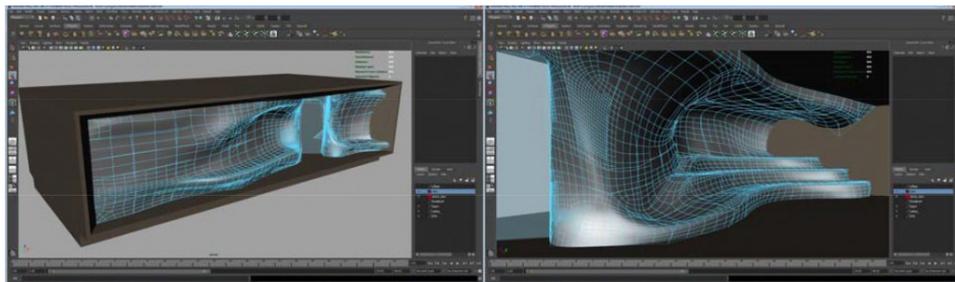


fig.42: Première modélisation du pavillon sous le logiciel Rhino.

Durant la phase de conception, l'agence a ainsi pu produire à partir de cette maquette numérique plusieurs maquettes d'études, via un procédé d'impression 3D par succession de couches de poudre de gypse de 0,08mm d'épaisseur, maintenues solides par un liant. Ce procédé a permis une grande propreté et une grande précision dans la réalisation de ces maquettes, qui ont ensuite pu être retravaillées à la main, scannées, et réintégrées dans la maquette numérique.

Ce processus de conception, alternant des phases de conception sur digitale et analogue, a permis de tester de nombreuses variantes et configurations du projet tout en maximisant le temps de création.

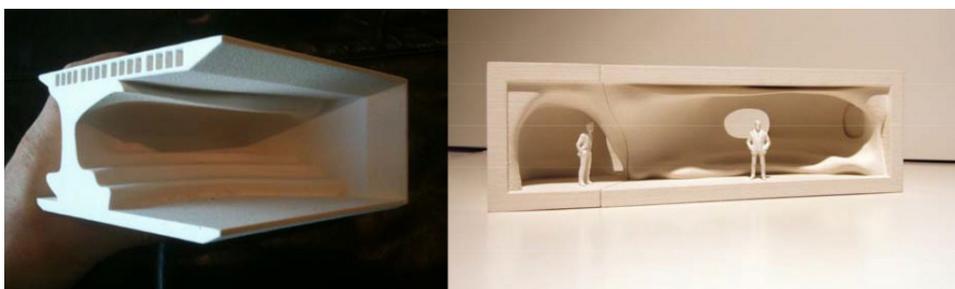


fig.43: Maquette d'étude du pavillon, imprimée en 3D puis retravaillée à la main.

Avant de rentrer dans la phase de construction du projet, l'agence a également fait usage d'une fraiseuse sur bras articulé, disponible dans les locaux de l'agence, afin de fabriquer une maquette à grande échelle (1:50) en chêne massif. À cette étape, de nombreuses transformations du modèle sont nécessaires pour permettre à la machine d'opérer. Le processus fait intervenir dans un premier temps un logiciel de simulation de l'usinage, afin de s'assurer de sa faisabilité : à l'inverse de l'impression 3D qui est une méthode additive, l'usinage numérique est un procédé soustractif de fabrication, limitant ainsi les possibilités de déplacement du robot, et par conséquent d'usinage.



fig.44: Usinage de la maquette finale dans du chêne massif à l'aide d'une fraiseuse pilotée par ordinateur (méthode de fabrication digitale soustractive).



fig.45: Maquette finale du pavillon au 1:50, réalisée en chêne massif.

Construction du bâtiment : fabrication digitale.

La recherche d'innovation de l'agence Snøhetta ne se limite pas à la conception et à la fabrication de maquettes, mais s'étend également à la construction du projet.

Ainsi, la maquette numérique est utilisée une nouvelle fois en atelier, exportant cette fois-ci la surface du modèle afin d'usiner les pièces de bois qui constitueront le volume final. La maquette est divisée en sections régulières correspondant aux dimensions des rondins de bois utilisés, à partir desquelles un logiciel générera les instructions de trajectoire pour une fraiseuse 5 axes. La méthode d'usinage consiste à placer et assembler les rondins brutes couche après couche, la machine n'étant en mesure de n'usiner qu'une surface limitée à chaque fois. La structure réalisée a ensuite été transportée sur le site en trois pièces distinctes, assemblées sur place avec un simple système de chevilles.



fig.46: Fabrication de la structure en bois, usinée dans des rondins de chêne à l'aide d'une fraiseuse cinq axes.



fig.47: Assemblage de la structure sur le chantier.

Sources pour cette partie :

- › Site web de l'agence Snøhetta (consulté le 28 août 2016) : <http://snohetta.com/project/2-tverrfjellhytta-norwegian-wild-reindeer-pavilion>
- › *Tverrfjellhytta, Design and manufacturing process*, document rédigé par un architecte au sein de l'agence Snøhetta (auteur non spécifié), joint en annexe.

CONCLUSION GÉNÉRALE

■ Bilan du stage : retour critique sur l'expérimentation

Avancement du stage et proposition.

À travers le travail de recherche et d'expérimentation effectué tout au long du stage, nous avons cherché à définir un processus tirant parti des outils de prototypage rapide pendant les phases de la conception architecturale. Son fonctionnement est inspiré par les principes des méthodologies agiles, notamment :

- La lucidité dans les capacités de production ;
- La flexibilité face aux imprévus et au changement ;
- L'itérativité du processus et cycles courts de conception ;
- L'amélioration continue des méthodes et du projet.

La pensée développée dans ce mémoire se fonde en substance sur une étude des pratiques du maquetage et de l'utilisation des technologies numériques en architecture. Nous avons vu par exemple l'importance de la maquette en tant qu'outil de conception et le rôle qu'elle jouait pour appréhender les différents aspects d'un projet. Nous nous sommes intéressés en parallèle aux utilisations des procédés de fabrication digitale dans d'autres domaines de la conception, comme l'industrie ou le design. Ces recherches ont permis de nourrir la réflexion autour de l'élaboration de notre méthode.

Critique de la démarche expérimentale : les biais de l'application.

L'aspect pratique du stage a servi de cadre d'expérimentation pour le processus que nous proposons. La démarche expérimentale comporte ainsi plusieurs biais :

- Le processus expérimenté est une version simplifiée de celui qui est proposé afin d'être en phase avec le nombre restreint d'acteurs, conduisant notamment à l'accumulation de rôles normalement distincts dans le processus d'origine ;
- Le cas d'application (conception d'un meuble) peut s'apparenter à une démarche architecturale, mais les enjeux, les problématiques et les outils utilisés et utilisables sont fondamentalement différents ;
- La plupart des erreurs et retards survenus dans le processus ont pu être rattrapés rapidement et n'ont pas toujours été pris en compte dans l'évaluation de l'efficacité du processus.

Ainsi, dans le cadre du stage, le processus proposé a permis de développer rapidement des solutions à des problèmes complexes sur des temps relativement courts. Cependant, les biais que nous venons de voir ne permettent pas de généraliser le modèle que nous proposons, qui reste en l'état actuel théorique.

Il serait alors intéressant de mettre la méthode développée dans ce mémoire à l'épreuve d'un cas d'application réel dans une agence d'architecture. Ce nouveau stade de l'expérimentation serait nécessaire pour poursuivre le développement de ce modèle afin d'en identifier les failles et les limites, grâce à l'acquisition de données plus significatives sur les problématiques réelles qu'il pourrait rencontrer. Cette démarche permettrait alors d'améliorer ce processus en consolidant la réflexion théorique qui a mené à son élaboration.

■ Technologies de fabrication digitale et architecture

Au début de notre travail, nous citons les difficultés qu'avaient les technologies numériques à se faire une place dans la pratique architecturale. Ces difficultés pourraient être expliquées par les blocages financiers, temporels et psychologiques définis par les modèles psychologiques du comportement face au changement que nous avons étudiés.

Nous étions alors parti de l'hypothèse selon laquelle les procédés de prototypage rapide comme l'impression 3D ou la découpe laser pourraient faciliter

la fabrication et le travail de la maquette dans le temps de la conception. Cette hypothèse a pu être vérifiée expérimentalement pendant le stage.

La multiplicité des technologies pour maîtriser le projet.

Cependant, l'expérimentation a également pu mettre en évidence l'intérêt de pousser l'utilisation des technologies numériques dans leur ensemble, et non de manière isolée. En effet, la multiplicité des enjeux et des aspects qui constituent un projet d'architecture le dotent d'une grande complexité qu'il est difficile d'appréhender avec un outil unique, que ce soit le prototypage rapide, la maquette numérique ou la maquette BIM.

À l'inverse, l'intégration plus globale des technologies numériques dans la conception architecturale permet de multiplier les points de vue et les méthodes de conception disponibles, et fournit les outils nécessaires pour mieux maîtriser le projet dans son ensemble.

Des compétences et savoir-faire valorisables.

De plus, dans les premières phases d'apprentissage des méthodes de prototypage rapide, nous avons pu mesurer la multiplicité des savoir-faire nécessaires à leur mise en œuvre.

L'investissement temporel et personnel sous-jacent pouvant constituer un obstacle, nous nous sommes attardés sur la question de la réduction de ces coûts. Nous avons alors pu vérifier, par le biais de différentes références et expériences, la possibilité de passer simplement des différents outils de maquettage numérique (logiciels de modélisation, maquette BIM, etc) au maquettage physique, dans un sens comme dans l'autre (fabrication digitale et scanners 3D).

L'existence de ce type de passerelles favorise la réutilisation des compétences pré-existantes, et permet ainsi de réduire l'investissement temporel normalement nécessaire pour maîtriser les différents outils. En plus de démultiplier les possibilités pour la conception du projet (architecture paramétrique ou accumulation de variantes par exemple), l'effort d'apprentissage a alors le potentiel pour être rentable, renforçant ainsi l'intérêt d'investir dans les technologies numériques dans leur globalité.

La place du prototypage rapide dans la conception.

Le prototypage rapide peut intervenir à toutes les étapes de la conception, et ouvre des portes vers de nouvelles pratiques architecturales du projet. Il

donne accès à de nouvelles manières de faire de l'architecture, et de développer des idées, des concepts, des formes qui seraient inenvisageables avec des outils plus traditionnels de la représentation.

Cependant, l'expérience du stage nous a permis de nous rendre compte des limitations de ces outils, qui ne sont pas tant formelles ou temporelles, mais plutôt humaines. Si les procédés de prototypage rapide offrent de nombreuses possibilités, leur utilisation ne doit pas pour autant être systématique, ne remplaçant pas les méthodes traditionnelles de conception (maquettage à la main, croquis, dessin, ...) qui restent utiles et tout aussi adaptées à la création de projets d'architecture.

Les technologies de prototypage rapide ne rendent pas obsolètes les méthodes plus classiques de la conception. Au contraire, leur utilisation dans le cadre de l'architecture présente un intérêt en tant que complément à ces méthodes, comme un ensemble de nouveaux outils permettant d'améliorer et de rendre plus efficace les processus existants.

Ainsi, par une meilleure appropriation des technologies numériques et des procédés de prototypage rapide, la pratique architecturale pourra développer de nouvelles compétences et des méthodes innovantes qui permettront de rendre l'architecte plus libre dans sa démarche de création.

■ Conclusion personnelle.

Avant de commencer ce master, je m'intéressais déjà aux technologies de prototypage rapide, d'une part à titre personnel, mais aussi dans le cadre des projets réalisés pendant mes études d'architecture. Intuitivement, ces procédés – impression 3D et découpe laser en particulier – me semblaient avoir un fort potentiel pour la conception par la fabrication rapide de maquettes, mais je me posais malgré tout la question de leur applicabilité dans la pratique architecturale réelle. En effet, si je percevais de nombreuses applications et possibilités dans leur utilisation, j'ai pu également voir autant de mésusages et de dérives qui peuvent en faire des accessoires superflus, des facteurs de perte de temps ou de stagnation, plutôt que des outils d'aide à la conception.

Ce stage m'a permis d'expérimenter avec ces outils et de les soumettre à ce questionnement. Je me suis rendu compte de la difficulté qui était liée à leur utilisation, même en ayant à la base une connaissance théorique et pratique sur le sujet. Bien que les potentiels des méthodes utilisées soit réel, j'ai pu prendre conscience du temps nécessaire pour apprendre à les utiliser

et à les mettre en place, et de l'importance d'avoir une bonne maîtrise et une bonne connaissance des limitations des technologies numériques dans leur ensemble afin de pouvoir utiliser le prototypage rapide en situation réelle. Ainsi, le rôle de l'apprentissage est de donner les moyens à l'architecte de développer sa pratique du projet en donnant accès à de nouvelles méthodes et de nouvelles pistes de réflexion, mais aussi et surtout de se sensibiliser aux dérives pour les identifier et les éviter.

En résumé, il existe de nombreux paramètres et quantité de difficultés qui peuvent freiner l'utilisation du prototypage rapide dans l'architecture. Malgré tout, je suis convaincu que ces technologies ont un avenir dans la profession, non seulement pour la conception du projet comme nous l'avons vu dans ce mémoire, mais aussi pour la construction, avec l'apparition de procédés innovants d'impression 3D à grande échelle, que ce soit avec l'impression en béton à échelle 1:1, la fabrication de mobilier sur mesure¹, jusqu'à la fabrication de pièces d'ingénierie ayant des propriétés mécaniques spécifiques².

Dans cette optique, il est possible que ces outils fassent dans les années à venir partie intégrante de la conception de projet. Leur maîtrise peut ainsi devenir un atout, et un enjeu important pour la profession architecturale.

1. Blouinartinfo.com, *L'habitat imprimé de François Brument*, février 2013 [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://fr.blouinartinfo.com/news/story/862641/innovation-lhabitat-imprime-de-francois-brument> [consulté le 12 août 2016].

2. Additive Manufacturing, *Carbon3D Launches M1, Its First Commercial 3D Printer*, 4 juin 2016 [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://www.additivemanufacturing.media/products/-carbon3d-launches-m1-first-commercial-3d-printer> [consulté le 18 août 2016].

NOTES DE RÉFÉRENCE

■ Pratiques de la conception et de la recherche

- › Archigraphie, *Chiffres et cartes de la profession d'architecte*, pp.46-48 [en ligne].
Source des données avancées : Pôle Emploi.
Disponible à l'adresse : http://www.architectes.org/sites/default/files/atoms/files/archigraphie-light_1.pdf [consulté le 3 août 2016].
- › OECD (2015), *Frascati Manual 2015 : Guidelines for Collecting and Reporting Data on Research and Experimental Development*, The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities, OECD Publishing, Paris [en ligne].
DOI:10.1787/9789264239012-en.
Disponible à l'adresse : <http://dx.doi.org/10.1787/9789264239012-en> [consulté le 24 août 2016].

■ Technologies numériques et prototypage rapide

- › Additive Manufacturing, *Carbon3D Launches M1, Its First Commercial 3D Printer*, 4 juin 2016 [en ligne].
Disponible à l'adresse : <http://www.additivemanufacturing.media/products/-carbon3d-launches-m1-first-commercial-3d-printer> [consulté le 18 août 2016].
- › ASME.org, *3D Printing Bridges*, décembre 2015 [en ligne].
Disponible à l'adresse : <https://asme.org/engineering-topics/articles/manufacturing-design/3d-printing-bridges> [consulté le 8 mars 2016].
- › Blouinartinfo.com, *L'habitat imprimé de François Brument*, février 2013 [en ligne].
Disponible à l'adresse : <http://fr.blouinartinfo.com/news/story/862641/innovation-lhabitat-imprime-de-francois-brument> [consulté le 12 août 2016].

- › BOLSHAKOVA, Veronika, « Synchronous collaboration and 3D interactions, AEC industry implementation », mémoire de master en architecture spécialité A.M.E., sous la direction de Gilles HALLIN et Pascal HUMBERT, Nancy, École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy, 2016, 90p.
- › Fablabo.net, *Cartographie des fablabs français* [en ligne].
Disponible à l'adresse : http://fablabo.net/wiki/Cartographie_des_fablabs_français [consulté le 26 août 2016].
- › Faclab.org, *Les Fab Labs : un concept né au Mit* [en ligne].
Disponible à l'adresse : <http://www.faclab.org/decouvrir/les-fablabs/les-fablabs-un-concept-ne-au-mit/> [consulté le 17 juillet 2016].
- › HATCHUEL, Armand et WEIL, Benoît, *Les nouveaux régimes de la conception : Langages, théories, métiers*, Ouvrage collectif, collection Entreprendre, éditions Vuibert, Paris, 2008, 272p. ISBN 9782711769315.
- › HILTON, Paul A., *The early days of laser cutting, 11th Nordic Conference in Laser Processing of Materials*, Lappeenranta, Finlande, 20-22 août, 2007.
- › MINÉ, Adrien, « Méthodologie d'acquisition 3D par scanner et traitement de nuage de points », mémoire de master en architecture spécialité A.M.E., sous la direction d'Olivier MALCURAT, Nancy, École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy, 2016, 91p.
- › PHAM, D. T. et GAULT, R. S., « A comparison of rapid prototyping technologies », *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 38, 1er octobre 1998, p. 1257-1287 [en ligne].
DOI 10.1016/S0890-6955(97)00137-5.
Disponible à l'adresse : [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00137-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00137-5) [consulté le 23 août 2016].
- › Stratasys.com, *Le prototypage rapide et l'architecture* [en ligne].
Disponible à l'adresse : <http://blog.stratasys.com/fr/2012/06/27/le-prototypage-rapide-et-larchitecture-du-virtuel-au-concret/> [consulté le 19 août 2016]

■ BIM et échanges de fichier

- › CART, Léopold, « Les conventions BIM : l'enseignement, clé de la pratique du BIM », mémoire de master en architecture spécialité A.M.E., sous la direction d'Olivier MALCURAT, Nancy, École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy, 2016, 120p.
- › HOCHSCHEID, Élodie, « Développement des échanges de fichiers entre deux acteurs de la construction », mémoire de master en architecture spécialité A.M.E., sous la direction de Mohamed Anis GALLAS, Damien HANSER et Olivier MALCURAT, Nancy, École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy, 2015, 113p.

■ Modèles psychologiques du comportement

- › BURNES, Bernard. *Kurt Lewin and the Planned Approach to Change: A Re-appraisal*. septembre 2004. ISBN 0022-2380.
- › TÉTARD, Franck et COLLAN, Mikael. Lazy user theory: A dynamic model to understand user selection of products and services. Dans : *HICSS'09. 42nd Hawaii International Conference on System Sciences* [en ligne]. IEEE, 2009, p.1–9. Disponible à l'adresse : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4755755 [consulté le 28 août 2016].

■ Documents législatifs

- › Directive 2014/24/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 février 2014 sur la passation des marchés publics, article 22.4

TABLE DES MATIÈRES

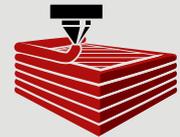
Avant-propos	7
Remerciements	9
Sommaire	11
Introduction	13
Partie 1 : Enjeux et objectifs du stage	17
1.1. Notions manipulées	18
1.1.1. Le processus de conception.....	18
1.1.2. La maquette.....	19
1.1.3. Le prototype.....	20
1.1.4. Le prototypage rapide.....	23
1.2. Définition du cadre de recherche	25
1.2.1. Un cas pratique : conception d'une unité de travail mobile.....	25
<i>Préambule : l'atelier Conception et Fabrication Digitale.</i>	25
<i>Définition du besoin</i>	25
<i>Résolution technique et production.</i>	26
1.2.2. Expérimentation sur le processus de conception.....	27
1.2.3. Documentation et transmission des connaissances.....	28
<i>Notices : documenter et transmettre un savoir-faire.</i>	28
<i>Documentation et continuité de la connaissance.</i>	29
1.3. Méthodologie et hypothèses	29
1.3.1. Méthodologie adoptée.....	29
<i>Recherche par l'expérimentation : stage pratique.</i>	29
<i>Recherches documentaires : ressources en ligne.</i>	30
1.3.2. Hypothèses et objectifs de l'étude.....	31

Partie 2 : Déroulement du stage	35
2.1. Les outils utilisés	36
2.1.1. Organisation et gestion de projet.....	36
<i>Les critères recherchés</i>	37
<i>Appropriation du système : utilisation initiale</i>	38
<i>Première adaptation : affichage et planification</i>	39
<i>Seconde adaptation : simplification</i>	40
2.1.2. Collecte et traitement des informations.....	41
<i>Pinterest : collecter et partager les idées</i>	42
<i>Google Drive : stocker, organiser et partager l'information</i>	43
2.1.3. Technologies de prototypage rapide.....	44
<i>MLLASER ML-W1290 : découpe laser</i>	45
<i>Open Edge : impression 3D</i>	46
2.1.4. Logiciels.....	48
<i>Autodesk AutoCAD : conception des plans de découpe</i>	48
<i>MLLasercut : pilotage de la découpeuse laser</i>	49
<i>Blender : modélisation 3D et maquette numérique</i>	50
<i>Slic3r : conversion des modèles 3D en fichiers pour l'impression</i>	51
<i>AstroPrint/OctoPrint : pilotage à distance des imprimantes 3D</i>	52
2.2. Processus de conception détaillé	53
2.2.1. Organiser le travail : les méthodes agiles.....	53
2.2.2. Déroulement de la semaine-type.....	54
<i>Réunion hebdomadaire (½ journée)</i>	54
<i>Application des correctifs (½ journée)</i>	56
<i>Modélisation sur maquette numérique (1 journée)</i>	56
<i>Fabrication de la maquette intermédiaire (1 journée)</i>	57
<i>Rédaction du rapport d'activité (quelques minutes)</i>	58

2.2.3. Techniques de modélisation pour la maquette numérique	59
<i>Modélisation objet : faciliter l'édition des pièces.</i>	59
<i>Modifieurs et copies liées : optimiser l'efficacité du travail.</i>	60
<i>Contraintes et animation : représenter le comportement réel.</i>	61
2.2.4. De la maquette numérique à la découpe laser	62
<i>Planification de la maquette.</i>	62
<i>Optimisation du plan de découpe.</i>	63
2.2.5. De la maquette numérique au modèle imprimé	65
<i>Préparation de la maquette.</i>	65
<i>Paramétrage de l'impression.</i>	66
2.2.6. Rétrospective sur le processus de conception	68
2.3. Documentation : comment transmettre l'expérience ?	70
2.3.1. Apprentissage initial : répondre à un besoin pratique	70
2.3.2. Formation approfondie : comprendre les méthodes.....	70
2.3.3. Expérimentation directe : maîtriser les outils	71
Partie 3 : Le prototypage rapide, un outil pour l'architecture ?	73
3.1. Les pratiques de la maquette et du prototype	74
3.1.1. La maquette en architecture	74
<i>La maquette d'étude : un outil de conception et de décision.</i>	75
<i>La maquette-prototype : un outil de validation.</i>	77
<i>La maquette-objet : un outil de communication.</i>	80
3.1.2. Le prototype dans l'industrie et le design	83
<i>Le prototypage, de l'idée à la production.</i>	83
<i>Les pratiques du prototypage.</i>	84

3.1.3. La conception dans l'architecture, l'industrie et le design.....	86
<i>Prototypage et technologies</i>	87
<i>Le retard d'appropriation technologique de l'architecture</i>	89
<i>Différence d'échelle, différence de moyens</i>	89
3.2. Le prototypage rapide pour l'architecture	91
3.2.1. Un nouvel outil de conception.....	91
<i>Maquette numérique et prototypage rapide</i>	91
<i>Le prototypage rapide, intérêts et applications</i>	92
<i>Implications et perspectives</i>	93
3.2.2. Les obstacles à la mise en place en architecture.....	94
<i>Coûts initiaux et coûts de fonctionnement</i>	96
<i>Temps de formation et investissement personnel</i>	97
<i>Résistance au changement</i>	98
3.2.3. Une méthode d'intégration du prototypage rapide pour la conception architecturale.....	99
<i>Généralités et objectifs de la méthode</i>	99
<i>Analyse du contexte et du processus de conception</i>	100
<i>Identification des besoins en maquettage</i>	102
<i>Définition des méthodes et des outils</i>	106
3.2.4. Élaboration d'un processus de conception architecturale intégrant des technologies de prototypage rapide.....	107
<i>Rôles et acteurs de la conception</i>	107
<i>Déroulement du processus</i>	108
3.2.5. Une utilisation du prototypage rapide en architecture : l'exemple du Norwegian Wild Reindeer Pavilion.....	114
<i>Modélisation et prototypage : l'outil au service de la conception</i>	115
<i>Construction du bâtiment : fabrication digitale</i>	117

Conclusion générale	119
Bilan du stage : retour critique sur l'expérimentation	119
<i>Avancement du stage et proposition</i>	119
<i>Critique de la démarche expérimentale : les biais de l'application</i>	120
Technologies de fabrication digitale et architecture.....	120
<i>La multiplicité des technologies pour maîtriser le projet</i>	121
<i>Des compétences et savoir-faire valorisables</i>	121
<i>La place du prototypage rapide dans la conception</i>	121
Conclusion personnelle.....	122
Notes de référence	125
Pratiques de la conception et de la recherche	125
Technologies numériques et prototypage rapide.....	125
BIM et échanges de fichier.....	127
Modèles psychologiques du comportement	127
Documents législatifs	127
Table des matières	129



Résumé

Historiquement, la maquette est un des outils de prédilection de l'architecture pour le développement du projet. Cependant, dans les pratiques contemporaines de la profession, elle est souvent éludée du processus de conception, car trop coûteuse et chronophage.

À travers ce mémoire, nous étudierons les technologies de prototypage rapide et leurs applications dans les processus de conception en architecture, dans l'idée de réhabiliter le travail de la maquette comme outil de conception viable dans le contexte actuel du tout numérique.