
Dans quelle mesure le BIM peut accompagner la préconception des points critiques pour les bâtiments modulaires ? L'étude portera sur le projet pilote Modul R de la FWB pour évaluer sa faisabilité grâce au BIM.

Auteur : Crappe, Bryan

Promoteur(s) : de Boissieu, Aurélie

Faculté : Faculté d'Architecture

Diplôme : Master en architecture, à finalité spécialisée en art de bâtir et urbanisme

Année académique : 2024-2025

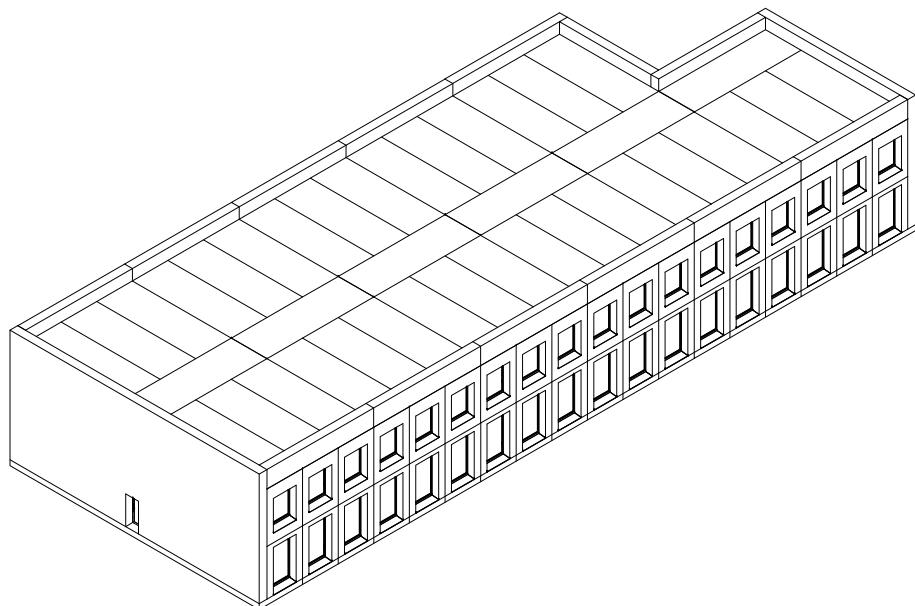
URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/22336>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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

Dans quelle mesure le BIM peut accompagner la préconception
des bâtiments modulaires ? L'étude portera sur le projet pilote
Modul R.



Travail de fin d'étude présenté par Bryan Crappe en vue de l'obtention du grade de Master en Architecture
(2024-2025)

Sous la direction d'Aurélie de Boissieu

Remerciements

Ce mémoire marque l'aboutissement de plusieurs années d'études, un voyage riche en apprentissages, en défis et en expériences humaines. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à sa réalisation.

Je souhaite d'abord remercier madame Aurélie de Boissieu, ma promotrice, pour son accompagnement rigoureux et bienveillant tout au long de cette recherche. Ses conseils avisés et son expertise ont été des éléments essentiels dans l'élaboration de ce travail.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers Olivier Bourez et Arthur Stache, tous deux architectes au sein du bureau Matador, qui ont pris le temps de m'expliquer le projet étudié. Leur disponibilité et leur soutien ont été précieux dans la confection de ce mémoire.

Un immense merci également à Charles Parée, un ami et collègue avec qui j'ai partagé ces années d'études. Charles, ta patience lors des multiples relectures de mon mémoire, ta disponibilité à chaque étape et ton soutien constant ont été inestimables.

À ma maman, qui a non seulement pris le temps de relire ce mémoire, mais qui, avec toute ma famille, s'y est intéressée et m'a soutenue tout au long de ce parcours : je vous suis infiniment reconnaissant. Votre encouragement m'a donné la force d'aller jusqu'au bout.

Je tiens également à remercier Benjamin de Magalhaes, un ami historien de l'art, pour nos discussions enrichissantes sur le sujet et pour le temps qu'il a consacré à relire mon travail avec soin et attention.

Enfin, à ma compagne, qui m'a soutenu dans les moments de doute, m'a encouragé dans les phases les plus complexes et a su m'apporter une sérénité précieuse durant toute l'élaboration de ce mémoire : merci, de tout cœur.

À toutes et tous, ce mémoire est en partie le fruit de votre aide et de votre soutien. Merci infiniment.

[Page laissée volontairement blanche]

Résumé

Cette recherche examine le potentiel du BIM pour soutenir la phase de préconception des bâtiments modulaires, en se concentrant sur le projet pilote Modul R de la Fédération Wallonie-Bruxelles. L'architecture modulaire, caractérisée par la préfabrication hors site et l'assemblage standardisé, offre des avantages significatifs, notamment des économies de coûts, une réduction des délais de construction et des bénéfices environnementaux. Cependant, son adoption reste freinée par une méconnaissance de ce mode de construction et la complexité de mise en place d'un système modulaire efficace. Cette étude vise à déterminer comment le BIM peut faire face à ces défis et améliorer la prise de décision dans la construction modulaire.

La recherche adopte une approche mixte, combinant un entretien semi-dirigé et une expérimentation. Ces deux méthodes permettent d'étudier les processus associés au BIM dans le contexte des bâtiments modulaires, en mettant en évidence ses apports pratiques.

Les résultats montrent que le BIM joue un rôle clé dans l'identification des éléments génériques, le calcul des coûts et des surfaces, et la création d'une bibliothèque d'éléments réutilisables. Ces outils permettent d'améliorer la précision des modèles et d'optimiser les processus de conception et de fabrication.

En conclusion, cette étude met en lumière le potentiel du BIM pour transformer les pratiques de l'architecture modulaire. En intégrant des outils numériques performants, le BIM contribue non seulement à une gestion plus efficace des projets, mais aussi à une meilleure durabilité économique et environnementale. Ce mémoire constitue une base pour des recherches futures visant à perfectionner ces approches et à surmonter les limitations actuelles, afin de promouvoir des pratiques de construction plus innovantes et durables.

Mots clés

BIM, architecture modulaire, DFMA, expérimentation, Revit

Abstract

This research examines the potential of BIM to support the pre-design phase of modular buildings, focusing on the Modul R pilot project of the Wallonia-Brussels Federation. Modular architecture, characterized by off-site prefabrication and standardized assembly, offers significant advantages, including cost savings, reduced construction times, and environmental benefits. However, its adoption remains hindered by a lack of awareness about this construction method and the complexity of implementing an effective modular system. This study aims to determine how BIM can address these challenges and improve decision-making in modular construction.

The research adopts a mixed-method approach, combining a semi-structured interview and experimentation. These two methods allow for the study of BIM-related processes in the context of modular buildings, highlighting its practical contributions. The results demonstrate that BIM plays a key role in identifying generic elements, calculating costs and areas, and creating a library of reusable elements. These tools enhance the accuracy of models and optimize the design and manufacturing processes.

In conclusion, this study highlights the potential of BIM to transform modular architecture practices. By integrating advanced digital tools, BIM contributes not only to more efficient project management but also to better economic and environmental sustainability. This thesis serves as a foundation for future research aimed at refining these approaches and overcoming current limitations to promote more innovative and sustainable construction practices.

Keys words

BIM, modular architecture, DFMA, experimentation, Revit

Table des matières

<i>Remerciements</i>	2
<i>Résumé</i>	4
<i>Mots clés</i>	4
<i>Abstract</i>	5
<i>Keys words</i>	5
<i>Table des matières</i>	6
1 Introduction	9
2 État de l'art	10
2.1 L'architecture modulaire	11
2.1.1 Définitions	11
2.1.2 Les avantages reconnus de l'architecture modulaire	13
2.1.3 Les types de modularité	20
2.1.4 Les cinq niveaux de préfabrication	21
2.1.5 Les stratégies d'assemblage	22
2.1.6 Le bois dans l'architecture modulaire	24
2.1.7 Les contraintes de l'architecture modulaire	26
2.2 Le BIM comme de levier à l'architecture modulaire	28
2.2.1 Définitions du BIM	28
2.2.2 Les limites du BIM	29
2.2.3 BIM et architecture modulaire	31
2.2.4 Les avantages du BIM dans l'architecture modulaire	32
2.2.5 La technologie RFID	35
2.2.6 Des exemples d'architecture modulaire utilisant le BIM	37
3 Méthodologie	41
3.1 Cadre méthodologique	42
3.1.1 La recherche qualitative	42
3.1.2 La recherche expérimentale	43
3.2 Méthode de recherche	44
3.2.1 Application de la recherche qualitative (entretien semi-directif)	46
3.2.2 Application de la recherche expérimentale	46
3.3 Le projet étudié	48
3.3.1 Quel est le logiciel BIM le plus optimal pour l'architecture modulaire ?	48
3.3.2 Description du projet Modul R	49
4 Analyses	50
4.1 Analyse d'entretien semi-directif	51
4.2 Analyse et résultats de la recherche expérimentale	55
4.2.1 Inventaire	56
4.2.2 Nomenclature	71

4.2.3	Fabrication d'une grille structurelle 2.65x2.65m pour la conception modulaire.....	78
4.2.4	Organisation modulaire : Groupement, duplication et mises à jour rapides	80
4.2.5	Détection des conflits et modification des éléments modélisés	83
4.2.6	Utilisation de la technologie RFID pour l'identification et le montage des éléments.....	90
4.2.7	Analyse et modélisation des flux de chantier : chemins, stockage et utilisation de la grue.....	93
4.2.8	Guide d'utilisation rapide dans Revit.	95
4.2.9	Exemples de modélisation grâce à cette méthode.....	98
5	<i>Discussions des résultats</i>	100
6	<i>Conclusion générale</i>	103
7	<i>Tableau des Figures</i>	105
8	<i>Bibliographie</i>	108
9	<i>Annexe</i>	114
9.1	Le guide d'entretien semi-dirigé	114
9.2	Retranscription de l'entretien avec Matador	115

[Page laissée volontairement blanche]

1 Introduction

L'industrie de la construction est l'une des plus consommatrices de ressources naturelles et émet une quantité importante de déchets. Alors que la population mondiale continue de croître rapidement, les pressions sur les ressources naturelles s'intensifient, nécessitant une transition vers une économie circulaire et des modes de construction plus durables. Dans ce contexte, l'architecture modulaire émerge comme une solution prometteuse, combinant industrialisation et préfabrication pour répondre aux défis actuels (Saliu et al., 2024). Cependant, malgré ses nombreux avantages, tels que la réduction des délais, des coûts et des impacts environnementaux, l'adoption de ce modèle constructif reste freinée par des limitations pratiques et organisationnelles (Beddiar et al., 2021).

Le BIM s'impose comme un outil clé pour surmonter ces obstacles. Grâce à sa capacité à intégrer et gérer des informations tout au long du cycle de vie d'un projet, le BIM optimise la conception, la production et l'assemblage des modules préfabriqués. Cette recherche vise à explorer dans quelle mesure le BIM peut accompagner la préconception des bâtiments modulaires, en se basant sur l'étude du projet pilote Modul R de la Fédération Wallonie-Bruxelles (FW-B). Ce projet servira de cas d'étude pour évaluer la faisabilité et les bénéfices de l'intégration du BIM dans un contexte modulaire.

C'est pour répondre à ce problème de limitation pratiques et organisationnelles que le chercheur implémente les capacités du BIM à l'architecture modulaire. De nombreuses études ont été menées ces dernières années à ce sujet. Celles-ci cherchent les avantages et obstacles du BIM dans la construction modulaire (Saliu et al., 2024). Mais peu de recherches ont été menées sur une expérimentation d'un cas d'étude d'implémentation du BIM pour un projet d'architecture modulaire.

Ce mémoire s'organise en plusieurs chapitres : l'[État de l'art](#), qui permet de définir les concepts généraux d'architecture modulaire et du BIM, la [Méthodologie](#) qui explique comment le chercheur va répondre à la question : **Dans quelle mesure le BIM peut accompagner la préconception des bâtiments modulaires ?** L'étude portera sur le projet pilote Modul R de la FW-B pour évaluer sa faisabilité grâce au BIM et à l'hypothèse suivante : Le BIM facilite-t-il la prise de décision en faveur de l'architecture modulaire ? suivi de l'analyse des résultats d'un [entretien semi-directif](#) et [d'une expérimentation](#). Pour enfin arriver aux [discussions](#) et nouvelles perspectives qu'ouvrent ce mémoire.

L'objectif de cette recherche est de faire comprendre au lecteur que l'architecture modulaire assistée par le BIM peut faciliter la prise de décision en faveur de ce mode constructif, contribuant ainsi à l'évolution du secteur de la construction. Tout en tenant compte de son impact sur l'environnement.

2 État de l'art

2.1 L'architecture modulaire

2.1.1 Définitions

La préfabrication est un système constructif qui repose sur des méthodes de production en usine. Elle est souvent associée au concept d'assemblage « hors-site ». Elle vise à transférer une grande partie de la construction, normalement réalisée sur le chantier, vers des ateliers ou des usines, permettant ainsi une fabrication plus efficace dans un cadre contrôlé (Razkenari et al., 2019). Au sein de ce processus de construction, la production suit souvent un modèle de fabrication en série. Le produit final passe d'un poste de travail à un autre sur une chaîne d'assemblage ou est assemblé sous forme de modules dans des unités de production parallèles (Rochat, 2024).

La préfabrication est liée aux idées de la standardisation du XIXe siècle et au modernisme du XXe siècle (Saliu et al., 2024). En réalité, les méthodes de construction n'ont que très peu évolué depuis 80 ans. La naissance d'un projet architectural exige des années d'efforts, des investissements colossaux, et s'accompagne d'un parcours semé de conflits, de compromis budgétaires, de préoccupations incessantes, et trop souvent, de désillusions (Smith, 2010). Cela ne signifie pas que d'autres industries n'ont pas fait de progrès spectaculaires en matière de matériaux et de méthodes de production, loin de là. Comme l'écrit Fernández, (2012): «*Il est largement admis que la construction est l'industrie de grande ampleur la plus lente à intégrer des innovations technologiques scientifiquement éprouvées.*» Ce manque d'innovation dans le secteur de la construction est lié à de multiples facteurs. La recherche d'innovation doit être considérée comme un argument en faveur d'une adoption renforcée de la préfabrication (Smith, 2010).

Deux termes principaux sont utilisés pour exprimer la modularité en architecture : 1/ construction modulaire, 2/ Design for Manufacture and Assembly (que l'on peut traduire par : Conception pour la Fabrication et l'Assemblage).

La construction modulaire désigne un mode de construction où des unités tridimensionnelles/volumétriques qui sont généralement fabriquées dans une usine et livrées sur le site comme éléments structurels principaux du bâtiment (Gibb, 1999). La construction modulaire joue un rôle clé dans l'expansion de l'industrie de la construction préfabriquée (Lu & Korman, 2010a; Pasquie, 2002).

Un concept clé de la construction modulaire est le « DfMA » (pour : « Design for Manufacture and Assembly¹ »), qui réunit deux notions : le « *Design for Manufacture*² » (DfM) et le « *Design for Assembly*³ » (DfA). Le « DfM » vise à simplifier la fabrication des composants destinés à former le

¹ Conception pour la Fabrication et l'Assemblage.

² Conception pour la Fabrication.

³ Conception pour l'Assemblage.

produit final après assemblage, tandis que le « DfA » se concentre sur la facilité d'assemblage de ces composants une fois produits. Ces deux approches sont complémentaires et renforcent l'efficacité de la construction hors-site (Wasim et al., 2022).

La construction hors-site est également souvent appelée construction préfabriquée ou modulaire. Elle offre une approche différente par rapport aux méthodes traditionnelles de construction sur site avec des différences subtiles selon les contextes. Certains chercheurs définissent la construction modulaire comme une approche de fabrication hors site bien développée, dans laquelle les modules préfabriqués sont terminés à 85 à 90 % avec des finitions en usine. La fabrication hors site fait également référence à la construction volumétrique préfabriquée et préfinie (Wang et al., 2020).

2.1.2 Les avantages reconnus de l'architecture modulaire

Budgétaire

L'un des avantages de l'architecture modulaire est le gain au niveau du budget. Pour les bâtiments d'une certaine ampleur, il est plus avantageux d'opter pour des éléments venant de stocks préfabriqués plutôt que des éléments qui sont fabriqués sur commande, plus coûteux. La Figure 1 montre les gains économiques liés à la fabrication standardisée de panneaux préfabriqués. Pour ces panneaux, une répétition minimale de dix unités est nécessaire pour en garantir la rentabilité, tandis que l'optimum se situe autour de 30 unités. Par exemple une unité de plancher répétée plus de dix fois devient optimale. Au-delà, l'avantage de la répétition supplémentaire devient moins significatif, mais une moindre standardisation entraînerait un surcoût pour le projet (Gibb, 1999). Cela signifie que dans les grands bâtiments, le principe de la préfabrication est rapidement plus intéressant financièrement parlant car au moins dix unités sont semblables dans le bâtiment.

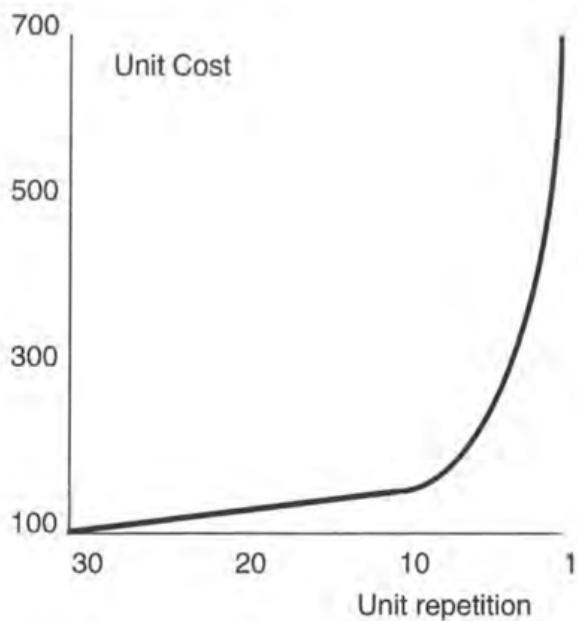


Figure 1 : Coût unitaire et la répétition des unités (standardisation) pour les panneaux préfabriqué (Gibb, 1999).

En plus de ces économies de production, la réduction des coûts de main-d'œuvre est souvent citée comme un des avantages majeurs de la construction hors-site et modulaire. En effet, la production en usine peut entraîner une réduction moyenne de 20 % des coûts par rapport à la construction traditionnelle (Smith, 2010). Cela pourrait même atteindre jusqu'à une réduction des coûts de 33 % par rapport à la construction traditionnelle (Autodesk, s. d.-a).

De plus, les techniques « DfM » et « DfA » jouent un rôle clé dans cette réduction des coûts en facilitant la production locale. D'autres avantages budgétaires existent grâce à l'architecture modulaire : Améliorer la chaîne d'approvisionnement, réduire les coûts de transport, maintenir de faibles niveaux de stocks et accélérer la production (Wasim et al., 2022).

Certaines études ont montré le coût d'un projet traditionnel en comparaison avec un projet modulaire, en prenant en compte les évolutions potentielles du coût selon le type de chantier. Nous pouvons voir que les coûts se distribuent différemment. Par exemple, les phases de préconstruction restent assez similaires. C'est au niveau du prix des matériaux, du design et de la logistique qu'il y a une grande différence qui avantage l'architecture traditionnelle. Bien que l'architecture modulaire ajoute des postes qui ne sont pas utilisés dans l'architecture traditionnelle (le travail hors site et le travail en usine), le coût total d'un projet modulaire serait compris entre 20 % moins cher et 10 % plus cher qu'un projet traditionnel (*Figure 2*) (McKinsey, 2019).

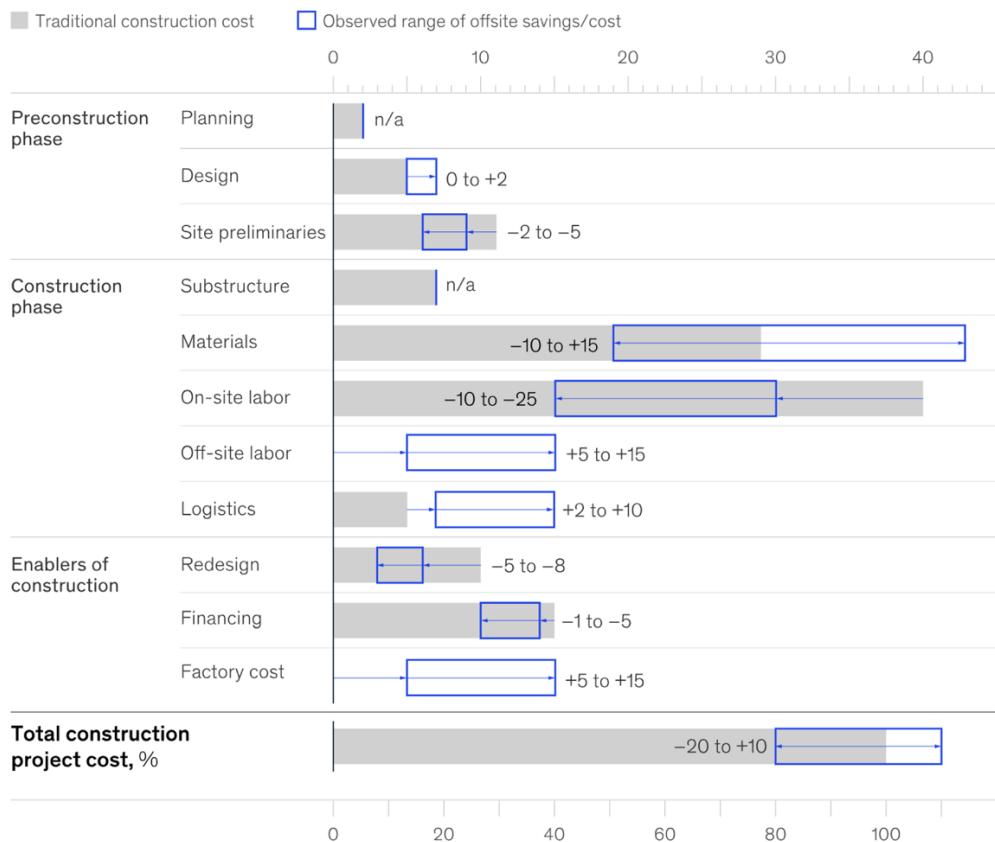


Figure 2 : Coût d'un projet traditionnel et modulaire et évolution potentielle en % (McKinsey, 2019).

Cependant, plusieurs études montrent une contradiction entre les avantages cités ci-dessus et la réalité des chantiers modulaires. Certaines recherches révèlent que, dans certains cas, les bâtiments modulaires peuvent être entre 26,3 % et 72,1 % plus coûteux que les constructions traditionnelles (Saliu et al., 2024).

Économie de temps de chantier

La construction hors-site est souvent présentée comme un moyen efficace pour réduire le temps de construction. De nombreuses études estiment que cette méthode permet de gagner 30 à 50 % de temps par rapport à la construction traditionnelle, grâce à la fabrication des éléments ou modules en usine avant le début des activités sur site. Ainsi, la préparation du chantier et la production des modules peuvent se dérouler simultanément, ce qui optimise les délais (Figure 3) (Saliu et al., 2024; Wang et al., 2020).

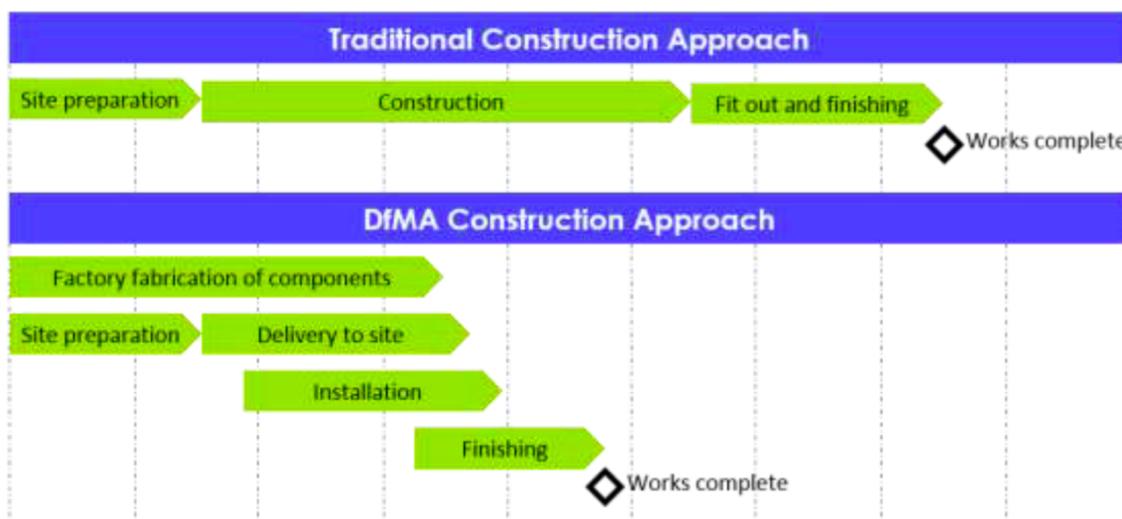


Figure 3: Calendrier de projet typique pour une approche de construction « DfMA » (Building and Construction Authority, 2016).

Samarasinghe et al. (2015) vont encore plus loin en affirmant que la construction modulaire pourrait réduire les temps de chantier de 50 à 60 % par rapport aux méthodes conventionnelles. Ces avantages sont renforcés par la facilité d'installation des modules préfabriqués, ce qui permet de gagner encore plus de temps sur les phases finales du projet (Saliu et al., 2024).

Cependant, il existe des contradictions importantes dans la revue de la littérature. Certaines recherches montrent que, malgré les promesses théoriques de gain de temps, le délai total allant de la conception à l'assemblage sur site peut parfois être plus long que pour la construction traditionnelle (Wang et al., 2020). Selon le chercheur, cela peut être dû à la complexité de la coordination entre la fabrication en usine et les travaux sur site, ou à des retards imprévus dans l'approvisionnement ou l'assemblage.

De plus, une étude menée aux États-Unis révèle que près de la moitié des projets modulaires mis en place n'ont économisé que moins de 5 % des heures de travail totales. Ces chiffres sont bien en dessous des attentes en réduction de temps pour l'architecture modulaire (Saliu et al., 2024). Cette disparité dans les résultats souligne que, même si les méthodes « DfMA » devraient théoriquement

réduire les délais, la réalité sur le terrain peut varier en fonction de la gestion du projet et des conditions spécifiques de chaque chantier.

La réduction de besoins en main d'œuvre

La construction modulaire offre des avantages significatifs en matière de réduction des besoins en main-d'œuvre. En effet, cette approche mène à une réduction des heures de travail et à des économies substantielles, ce qui en fait une solution attrayante pour les projets contemporains. De plus, cette diminution de la main-d'œuvre requise simplifie la gestion des projets en réduisant la complexité liée à la coordination d'un grand nombre d'intervenants sur site (Wasim et al., 2022).

En parallèle, la construction modulaire réduit également le besoin d'ouvriers qualifiés. Cette réduction peut s'avérer cruciale dans un contexte de pénurie de main-d'œuvre dans le secteur de la construction (Lu & Korman, 2010a). En allégeant les exigences en matière de compétences sur site, cette méthode permet aux équipes de se concentrer sur des tâches plus techniques et stratégiques, améliorant ainsi la productivité globale des projets. Ainsi, la réduction des besoins en main-d'œuvre dans la construction modulaire représente un atout précieux, tant pour les économies réalisées que pour l'efficacité accrue dans la gestion des projets (Wasim et al., 2022).

L'impact environnemental

Le secteur de la construction est le plus gros émetteur de gaz à effet de serre avec 37% des émissions (U.N. Environment, 2023).

Or, l'architecture modulaire permet une diminution des émissions de CO₂ en utilisant, par exemple en utilisant des matériaux renouvelables comme le bois ou d'autres matériaux recyclés. De plus, il est plus simple d'utiliser une énergie plus verte en usine que sur chantier, grâce à des infrastructures plus adaptées. La centralisation de la production en usine permet un déplacement moindre des ouvriers en valorisant les filières locales. Cela réduit également les émissions CO₂. (Beddiar et al., 2021).

La *Figure 4* ci-dessous représente la production de CO₂ des chantiers conventionnels en comparaison avec les chantiers modulaires. Malgré une dépense d'énergie en usine plus grande dans l'architecture modulaire, on peut voir que certains points sont bien moins énergivores comme l'énergie utilisée sur site et le transport des travailleurs sur site. La totalité des émissions de CO₂ est en moyenne moindre pour les chantiers modulaires que dans les chantiers conventionnels. La *Figure 4* prend en compte les données telles que les déchets, le transport des travailleurs sur le chantier, le transport des travailleurs vers l'usine, l'énergie utilisée sur le chantier, l'énergie utilisée à l'usine, le transport des modules vers le chantier et la production des matériaux (Rochat, 2024).

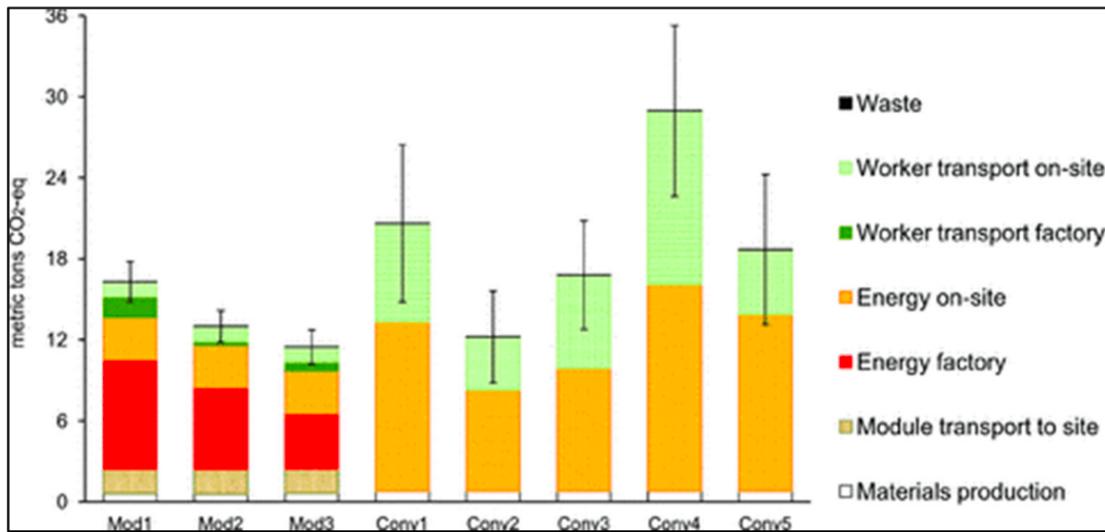


Figure 4: Émission de CO₂ selon le mode de construction (Quale et al., 2012).

L'architecture modulaire permettrait de réduire de 60 à 80 % les flux liés l'activité de la construction tels ceux des camions, ainsi que ceux des ouvriers et de l'approvisionnement en matériaux (Beddiar et al., 2021).

De plus, l'architecture modulaire est considérée comme plus « propre ». Elle permet de réduire les déchets de construction mais aussi le bruit, la poussière et l'épuisement des ressources (Tan et al., 2019).

L'architecture modulaire favorise également la durabilité en diminuant l'impact environnemental négatif associé aux opérations de construction. En effet, l'application des principes de « DfMA » renforce la productivité des projets tout en minimisant les déchets et les chutes générés, notamment dans le cadre de la construction hors site (Wasim et al., 2022). Ces chutes sont en moyenne de 2 à 5 % pour la construction de bâtiments traditionnels contre 1 à 2 % pour les bâtiments modulaires (Beddiar et al., 2021).

Par ailleurs, des études montrent que la construction préfabriquée génère entre 50 et 75 % de déchets en moins par rapport à la construction traditionnelle sur site (Smith, 2010). Par exemple, les déchets d'emballage laissés sur site sont diminués grâce à une fabrication des éléments en usine. Il est également plus facile de trier ces déchets quand on est dans un environnement contrôlé (Rochat, 2024).

Cette approche présente de nombreux avantages en matière d'optimisation logistique et environnementale. En réduisant le nombre de kilomètres parcourus pour le transport des matériaux et en maximisant l'utilisation de l'espace lors des livraisons par camion (Lu & Korman, 2010b), elle contribue significativement à la diminution de l'empreinte carbone. Par ailleurs, la fabrication en usine permet de regrouper les activités sur un même site, ce qui réduit le temps

passé sur chantier ainsi que la quantité de main-d'œuvre nécessaire. Cette relocalisation entraîne une diminution des flux de véhicules et d'ouvriers pouvant atteindre jusqu'à 80 %, tout en favorisant la création d'un bassin d'emploi et de fournisseurs plus locaux (Beddiar et al., 2021).

Enfin, la réalisation des tests en usine s'avère plus simple et plus efficace que sur le terrain. Cela garantit une performance optimale des matériaux. Lors de leur conception, les matériaux peuvent être testés avant d'être acheminés sur chantier et sont donc mis à l'épreuve dans un environnement contrôlé. Ces tests réalisés en usine permettent de vérifier le bon fonctionnement des éléments par exemple l'étanchéité des fenêtres et les réseaux (Beddiar et al., 2021).

L'augmentation de la qualité des produits finis

La construction modulaire est associée à une amélioration significative de la qualité de la mise en œuvre des bâtiments, grâce à des méthodes de production qui se déroulent en usine. Cette approche permet un contrôle de qualité supérieur, car les éléments sont fabriqués dans un environnement contrôlé. Ce type de production réduit les erreurs de mise en place et assure une finition plus soignée (Saliu et al., 2024).

De plus, cette méthode contribue à l'amélioration générale de la qualité des éléments construits hors-site. Les processus industrialisés de fabrication en usine garantissent une constance et une précision qui sont souvent difficiles à atteindre sur un chantier traditionnel (Lu & Korman, 2010a).

La production en usine offre aussi un environnement de travail protégé des dégradations causées par les conditions météorologiques. Sur chantiers, il n'est pas rare de voir les matériaux qui se dégradent avec les intempéries et l'humidité. De plus, les outils industriels garantissent une meilleure qualité grâce à l'utilisation d'outils à commandes numériques, limitant les imprécisions humaine sur le terrain (Beddiar et al., 2021).

L'architecture modulaire permet également de faire des économies grâce à la réduction des défauts de non-conformités qui se généralise par l'incompatibilité avec d'autres éléments, des pièces de mauvaise dimension, le non-respect des normes incendie,... Les éléments sont vérifiés avant leur acheminement sur chantier et cela permet de faire des économies sur les pièces comportant des défauts non modifiables sur le chantier. Cette économie est difficilement quantifiable mais certaines études montrent que le surcoût dû à la non-qualité des composants représente entre 5 et 12,4 % des coûts d'un projet de construction tandis que le coûts de reprise est estimé entre 2,5 et 5 % du coût total de la construction (Beddiar et al., 2021).

L'augmentation de la sécurité sur site et de la qualité de travail

Comme énoncé précédemment, l'objectif principal de la construction modulaire est de transférer certaines activités de construction vers des environnements plus contrôlés, en usine. Cela permet de bénéficier d'un meilleur contrôle sur les processus, ce qui permet en outre des mesures de

sécurité renforcées. Ces caractéristiques de sécurité ont d'ailleurs contribué à la croissance rapide de l'architecture modulaire à l'échelle mondiale ces dernières années (Saliu et al., 2024).

La liste des étapes sur chantier modulaire est moins longue. Un projet étudié par une équipe de recherche montre que les onze étapes du chantier « traditionnel » ont laissé place aux six étapes pour un chantier modulaire. Cela permet de mettre plus d'attention sur ces étapes et donc une meilleure gestion de la sécurité (Vaz-Serra et al., 2020).

De plus, la réduction des risques sur chantier est liée à la réduction du besoin de main d'œuvre. Comme le temps passé sur site est moins important, les risques sur chantier sont automatiquement réduits (Wasim et al., 2022).

Les machines pour la préfabrication en usine sont plus précises, de meilleure qualité et adéquates à chaque tâche. Ces avantages permettent de diminuer les risques de blessure des ouvriers sur chantier (Beddiar et al., 2021).

Les deux points ci-dessus augmentent les conditions de travail sur chantier. De plus, le travail réalisé dans les usines permet d'éviter le plus possible les conditions météorologiques défavorables. Tous ces avantages permettent de proposer des métiers alternatifs moins pénibles et donc de répondre à un manque de main-d'œuvre dans le secteur de la construction (Beddiar et al., 2021).

En somme, la construction modulaire et le « DfMA » favorisent des environnements de travail plus sûrs tout en optimisant les processus de construction.

Une étude a été menée comparant le taux de mortalité et de blessures causés sur chantier en comparaison avec l'industrie (*Figure 5*). Nous pouvons voir que tous les arguments vu précédemment coïncident avec les chiffres de la *Figure 5*. Ils montrent qu'il y a moins de risques de travailler dans une usine et que cela rend le métier moins pénible (Beddiar et al., 2021).

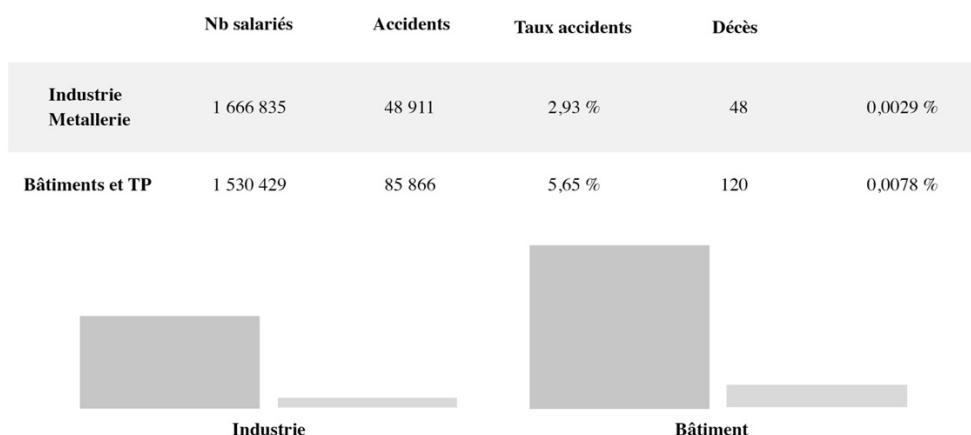


Figure 5 : Comparaison du taux d'accident et du taux de décès dans le secteur de la construction et de l'industrie (Beddiar et al., 2021).

2.1.3 Les types de modularité

D'après Smith (2010), la modularité se définit selon quatre degrés de préfabrication, à savoir (1) matériau, (2) le composant, (3) les panneaux et (4) les modules (*Figure 6*) (Smith, 2010). Chacun des éléments de ces niveaux fait partie intégrante de l'architecture modulaire. Plus on va vers un degré de préfabrication avancé, plus les avantages de l'architecture modulaire sont effectifs.

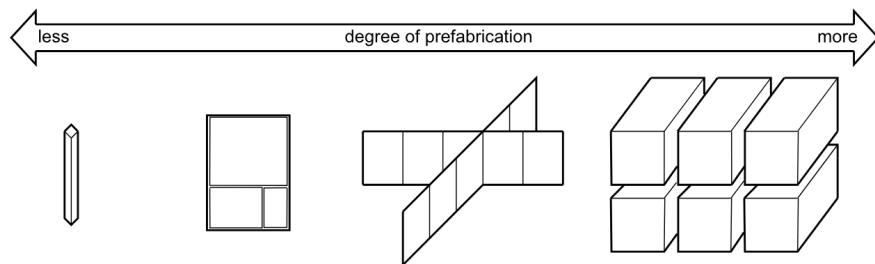


Figure 6: La préfabrication peut être classée selon le degré de complétude des éléments avant leur assemblage sur site.
De gauche à droite : matériaux, composants, panneaux et module (Smith, 2010).

Pour Samarasinghe (2015), il existe généralement trois types de construction préfabriquée : le système modulaire, le système de composants et le système dit « *Hybrid Pods* ⁴ » (Samarasinghe et al., 2015). Ces types peuvent être décrits comme suit :

1. Système modulaire : Ce système consiste à fabriquer l'unité complète dans une usine hors site avant de la transporter sur le chantier. Il est principalement utilisé dans l'industrie du logement préfabriqué (Samarasinghe et al., 2015).

2. Système de composants : Dans ce système, différents composants du bâtiment, tels que les murs, les sols, le toit, ainsi que les systèmes de ventilation et de plomberie, sont fabriqués en usine et peuvent ensuite être assemblés rapidement et efficacement sur site. Ce système est surtout utilisé dans les bâtiments présentant moins d'espaces répétitifs (Samarasinghe et al., 2015).

3. Système de « *hybride pod* » : Ce type de système consiste à fabriquer séparément différents espaces du bâtiment dans une usine hors site, avant de les transporter sur le chantier pour assemblage. Ces modules peuvent inclure des unités de salle de bain, des chambres, des cuisines et d'autres espaces. Ce système est principalement utilisé dans les bâtiments comportant de nombreux espaces répétitifs, comme les immeubles d'appartements, les bureaux et les hôpitaux (Samarasinghe et al., 2015).

Enfin, dans l'architecture modulaire, une structure hiérarchique est pensée et se divise en deux catégories : l'ensemble et la partie, autrement dit : le parent et l'enfant. Par exemple, les propriétés

⁴ Pods hybrides

des matériaux et des composants peuvent faire partie du module ou de l'unité, mais elles ne sont pas identiques au module ou à l'unité elle-même (Li et al., 2019).

2.1.4 Les cinq niveaux de préfabrication

La préfabrication comprend tous les éléments fabriqués en usine. Le « matériau de base » est considéré comme le niveau zéro car ne possède pas de fonctionnalité d'assemblage préinstallé (Pan et al., s. d.).

Le présassemblage est considéré comme « *un processus par lequel divers matériaux, composants préfabriqués et/ou équipements sont assemblés ensemble à un emplacement distant pour une installation ultérieure en tant qu'unité* » (Haas et al., 2000). Pour Haas (2000), la préfabrication est souvent définie selon cinq niveaux:

Le premier niveau, la « *fabrication de composants et sous-assemblages* », désigne les petits éléments faisant partie de sous-ensembles souvent assemblés avant leur installation (Pan et al., s. d.).

Le deuxième niveau, le « *présassemblage non-volumétrique* » comprend les unités présassemblées ne contenant pas de volume utilisable. Comme par exemple les fermes de toit en bois (Pan et al., s. d.).

Le troisième niveau, le « *présassemblage volumétrique* », contient les espaces utilisables souvent fabriqués et montés complètement en usine. Souvent, le présassemblage volumétrique ne contient pas toutes les parties du bâtiment fini. Comme par exemple les toilettes ou les salles de bain (Pan et al., s. d.).

Le quatrième niveau, la « *modularisation* », consiste en la préfabrication d'un système complet en usine avant le transport de ce système complet sur le chantier (Pan et al., s. d.). Les systèmes modulaires sont souvent similaires aux systèmes hybrides, ils contiennent plusieurs pièces sous forme d'unités. Les systèmes modulaires sont par exemple des maisons ou des blocs d'appartement complets qui sont fabriqués et assemblés en usine. Ces unités sont assez finies et contiennent les finitions intérieures, les installations électriques, mécaniques et sanitaires (Lu, 2007).

Le cinquième niveau, le « *système hybride* », est une combinaison des différents niveaux vus auparavant (système volumétrique et non volumétrique). Le système hybride est une unité entièrement finie en usine, incluant les aménagements intérieurs et les installations du bâtiment (Lu, 2007).

2.1.5 Les stratégies d'assemblage

Les bâtiments complexes à construire, à démonter et à assembler entraînent des coûts plus élevés, tant dans les offres initiales que dans les changements au cours du projet. Les éléments préfabriqués permettent de développer des détails qui facilitent l'assemblage sur chantier. Étant donné que chaque équipe utilise une variété de matériaux et de méthodes d'installation différentes, la préfabrication aide à minimiser les conflits entre les différents métiers et à résoudre les problèmes d'assemblage dès la phase de conception. Bien qu'un détail de qualité soit souvent perçu par les architectes comme esthétiquement plaisant, il n'est pas nécessairement le plus efficace sur le plan de l'assemblage et de la construction. L'objectif de tout processus de conception efficace est de trouver des solutions qui satisfont à ces deux critères (Smith, 2010).

Smith (2010) identifie neuf stratégies d'assemblage indispensables à l'architecture modulaire et qui sont détaillées ci-dessous.

« Uncut units » (Unités non découpées).

La coordination des composants à assembler sur site est cruciale pour limiter, voire éliminer, la nécessité de découpes ou de manipulations supplémentaires. Cette méthode permet non seulement de gagner du temps lors de l'assemblage, mais aussi de réduire les erreurs potentielles dues aux ajustements de dernière minute (Smith, 2010).

« Minimize elements » (Minimiser les éléments).

L'objectif est de réduire le nombre d'éléments différents à expédier et à assembler sur le chantier. Cette réduction entraîne non seulement une diminution des coûts de main-d'œuvre, mais aussi une réduction des risques de défaillance au niveau des joints (Smith, 2010).

« Easy to handle » (Facile à manipuler).

Dans la conception des éléments préfabriqués, il est essentiel d'éviter de créer des composants trop volumineux, que ce soit pour la fabrication, le transport ou la mise en place sur le chantier, en tenant compte à la fois des dimensions et du poids. Les instructions d'installation doivent également être précises : les éléments doivent être soit symétriques pour permettre une installation dans n'importe quelle orientation, soit clairement asymétriques pour en faciliter le positionnement. Enfin, le marquage des éléments par des codes ([RFID](#)⁵, par exemple) est une méthode de coordination efficace (Smith, 2010).

⁵ Identification par radiofréquence.

« Repetition » (Répétition).

Lorsque des conditions spéciales ou uniques ne sont pas requises, la répétition dans la séquence de construction permet une construction plus rapide et de meilleure qualité. Cette approche devient particulièrement avantageuse dans les grands projets, où la standardisation contribue à des économies de coûts significatives (Smith, 2010).

« Simulation and prototyping » (Simulation et prototypage).

Lorsque cela est possible, des simulations de séquences de construction devraient être réalisées afin d'anticiper les conflits potentiels. L'utilisation du BIM a grandement facilité ce processus grâce aux analyses en 4D et 5D. De plus, le prototypage et les maquettes permettent de résoudre les erreurs de préfabrication dès les premières étapes. Il est essentiel de ne pas se limiter à la création de maquettes en usine, mais également de réaliser des tests sur site pour évaluer la facilité d'assemblage (Smith, 2010).

« Accessible mockups » (Prototypes accessibles).

Les équipes peuvent installer des prototypes sur site afin qu'ils soient observés par les équipes en charge du projet. Cette pratique revêt une importance particulière lorsqu'il y a plusieurs personnes impliquées dans l'installation. L'éducation joue un rôle crucial dans le processus de construction, mais elle est d'autant plus essentielle dans le cas de la préfabrication, où des méthodes de conception efficaces sont mises à profit (Smith, 2010).

« Accessible connections » (Connexions accessibles).

Il est essentiel de concevoir les assemblages de manière à ce que les installateurs sur site puissent accéder facilement aux travaux. En plaçant les éléments à une hauteur accessible depuis les niveaux supérieurs, et en permettant que les assemblages se fassent une fois que la superstructure est érigée, on facilite grandement l'installation. Les séquences de travail qui ne permettent pas aux ouvriers d'accéder aux parties nécessaires pour boulonner, visser, sceller ou clouer doivent être repensées sur le chantier. Cela concerne notamment les connexions situées derrière des colonnes, des poutres en porte-à-faux, des angles, etc. De plus, cette accessibilité est également importante, car certaines connexions devront être accessibles pour des opérations de maintenance ou de démontage ultérieures (Smith, 2010).

« Clearances » (Tolérance).

Bien qu'une structure puisse être conçue et fabriquée pour s'adapter parfaitement, des variations sur site, dues à des tolérances dimensionnelles lors de l'érection et à la manipulation des éléments pour les placer dans leur position finale, nécessitent que tous les détails aient un peu d'espace supplémentaire en plus de leurs propres dimensions. Un exemple courant est celui d'une unité de fenêtre qui doit s'insérer dans une ouverture approximative. Toutefois, cette logique s'applique à tous les éléments préfabriqués dans la construction d'un bâtiment (Smith, 2010).

« Clash detections » (Détection des conflits).

Les dépassements de coûts courants sont souvent dus à des ordres de modification découlant de conflits entre différents systèmes au sein d'un bâtiment, en particulier entre les structures, les enveloppes et les systèmes d'aménagement intérieur. Les services techniques peuvent fréquemment entrer en conflit entre eux, mais aussi avec le système structurel. Dans le cas d'un assemblage hors site, ces conflits surviennent notamment entre éléments préfabriqués et éléments construits sur place. Le retour d'un élément pour ajustement entraîne un coût plus élevé. Sans une coordination rigoureuse, la préfabrication peut s'avérer plus coûteuse que prévu. Une détection précoce des conflits, facilitée par une coordination minutieuse dès la phase de conception avec le BIM, permet de réduire ces risques (Smith, 2010).

2.1.6 Le bois dans l'architecture modulaire

Alors que le secteur de la construction est l'un des plus émetteurs de gaz à effet de serre, le bois est l'un des meilleurs matériaux utilisés aujourd'hui pour lutter contre les changements climatiques. Le bois est un matériau renouvelable et durable (à condition d'une gestion durable des forêts). De plus, sa production nécessite moins d'énergie et génère moins de gaz à effet de serre que les autres matériaux traditionnels (comme le béton et l'acier) (Michon, 2023).

Le bois est donc une solution appuyée par de nombreuses recherches environnementale (Rochat, 2024).

De plus, le bois est le seul matériau de construction à emmagasiner du carbone durant toute la durée de vie du bâtiment. En général, on estime que 1 m³ de bois permet de stocker 1 tonne de CO₂. Si on compare les émissions de gaz à effet de serre des trois matériaux les plus couramment utilisés dans la construction : le bois, l'acier et le béton. La *Figure 7* illustre l'émission de gaz à effet de serre du bois comparé au béton et à l'acier. Le bois est de loin le moins émetteur en gaz à effet de serre (Cecobois, s. d.).

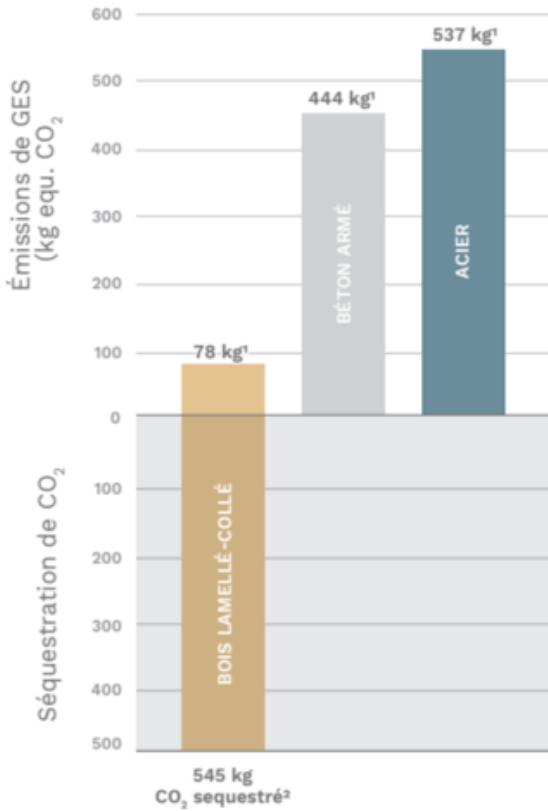


Figure 7: Émissions de Gaz à effet de serre liées à la fabrication calculées avec Gestimat (Cecobois, s. d.).

D'autant plus que le bois est assez accessible pour les petites et moyennes entreprises (PME), les systèmes de construction hors-site à base de béton et d'acier ont tendance à provenir de conglomérats. L'écosystème commercial du bois comprend un nombre important d'entreprises de petites tailles (Patlakas et al., 2015).

Pour la construction ex-situ, l'utilisation du bois nous ramène au chapitre «[Easy to handle](#)»⁶ de ce mémoire. Effectivement, le bois est plus léger que l'acier et le béton. Il est donc plus facilement manipulable car moins lourd. De plus, c'est un matériau sec, contrairement au béton, ce qui permet une augmentation de la productivité sur chantier (Cecobois, s. d.).

La plupart des éléments peuvent être construits en bois comme les murs, les planchers et les fermes de toit à ossature légère. Des panneaux en bois sont souvent utilisés dans cette méthode de construction. Les principaux types de conception des éléments en bois se font par panneau de bois en lamellé-croisé (CLT), en panneau de bois lamellé-cloué (NLT) ou en lamellé-collé (LC ou GLULAM). Ces différents éléments sont montrés dans la *Figure 8* (Hunt, 2018).

⁶ Facile à manipuler.

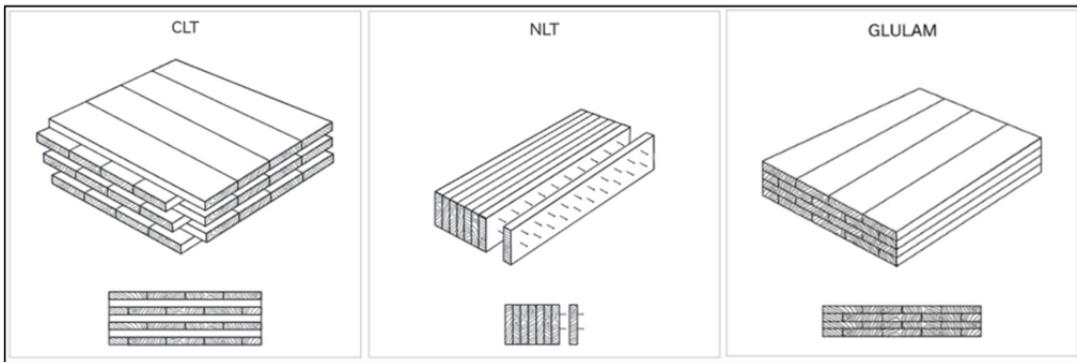


Figure 8 : Types de composants en bois massif (Rochat, 2024).

2.1.7 Les contraintes de l'architecture modulaire

Le manque de connaissances

Le manque de connaissance en construction hors-site est l'une des contraintes les plus mises en avant dans plusieurs articles (Beddiar et al., 2021; Huang et al., 2008; Wang et al., 2020).

En effet, l'architecture modulaire a encore une connotation négative à cause de son aspect répétitif et standardisé. La construction est une industrie qui évolue lentement. Le passage d'une architecture traditionnelle à une architecture préfabriquée n'est pas facile car les méthodes et techniques de travail dans ce secteur n'ont pas changé depuis des décennies (Han & Wang, 2018). Actuellement, l'architecture modulaire est vue comme un mode de construction moins créatif et une production en série de bâtiments tous semblables. Pourtant, il est prouvé que l'architecture modulaire permet tout de même une marge de manœuvre permettant de faire varier les formes, taille et matériaux de ces bâtiments (Beddiar et al., 2021).

Selon une enquête réalisée en 2020 dans le secteur de la construction hors site, plus de 90 % des répondants issus d'entreprises de construction estiment que le manque de mise en œuvre de technologies avancées constitue la principale contrainte au développement de la construction hors site (Wang et al., 2020).

De plus, l'adoption générale des technologies numériques dans l'industrie de la construction progresse lentement par rapport à d'autres secteurs, en raison d'un manque de compréhension concernant leur identification, leur évaluation et leur sélection (Wang et al., 2020).

Ces deux éléments soulignent l'importance cruciale d'investir dans la technologie pour favoriser l'innovation et améliorer les processus dans le domaine de la construction hors site.

Communication et gestion de l'information

Les bâtiments modulaires dépendent fortement de la phase de conception en amont pour assurer une communication fluide avec la préfabrication et l'installation sur site (Gan, 2022). Cependant, leur adoption et leur utilisation optimale rencontrent de nombreux défis. En particulier, la fragmentation de l'information et un environnement de travail disjoint entre ces phases sont considérés comme des obstacles majeurs (Saliu et al., 2024).

De plus, l'efficacité et la collaboration sont souvent compromises, car les informations liées au projet sont stockées et gérées dans des systèmes hétérogènes appartenant à divers acteurs, qui sont fréquemment géographiquement isolés (Li et al., 2019).

Selon Saliu et al. (2024) et Li et al. (2019), ces éléments soulignent la nécessité d'améliorer la communication et la gestion de l'information pour optimiser les processus dans la construction modulaire.

2.2 Le BIM comme de levier à l'architecture modulaire

2.2.1 Définitions du BIM

La Figure 9 montre l'histoire de l'industrialisation dans le secteur du bâtiment selon Smith (2010). On peut voir que le BIM arrive assez tardivement dans ce développement. Il arrive vers les années 2000 mais a déjà été évoqué plus tôt dans un article scientifique écrit par Charles M. Eastman dans les années 1970 mentionnant le concept de BIM. Dans son article de 1974, *An Outline of the Building Description System*, Eastman décrit un « *Building Description System* » (BDS) : un modèle numérique centralisé pour stocker et gérer des informations sur les bâtiments, préfigurant le BIM tel qu'on le connaît aujourd'hui (Eastman et al., 1974).

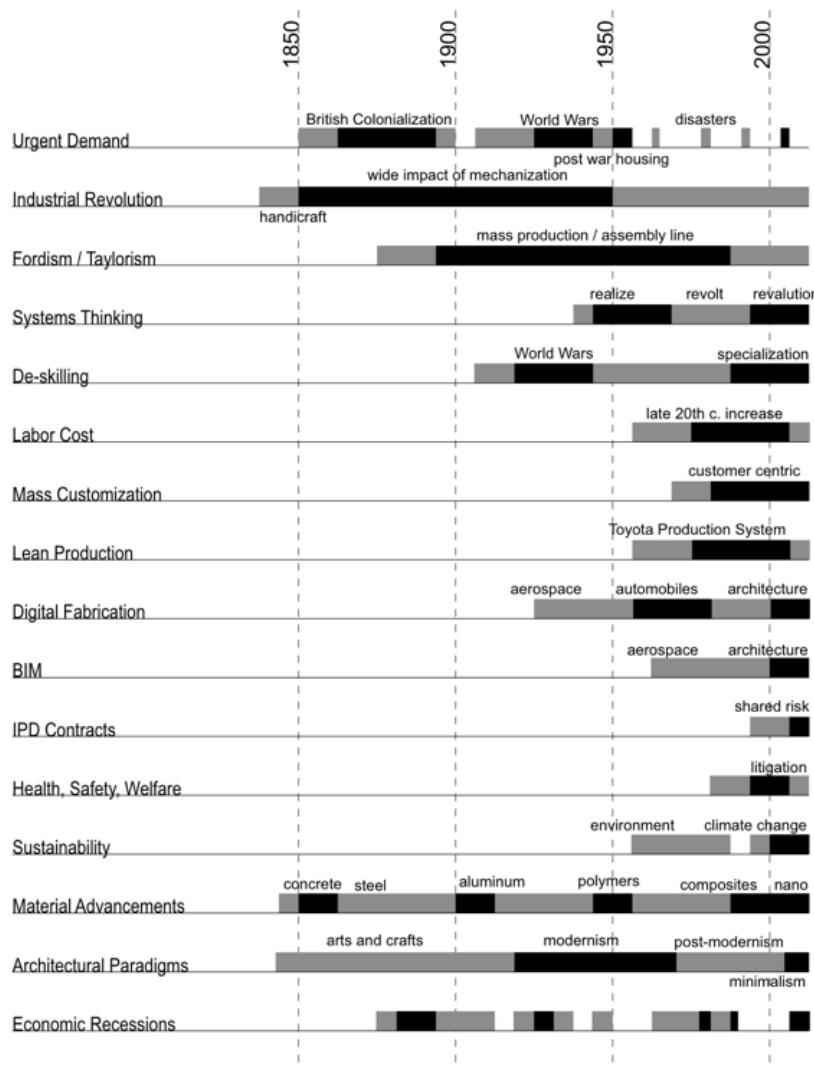


Figure 9: Histoire de l'industrialisation dans la construction (Smith, 2010).

Aujourd'hui, l'acronyme BIM, couramment compris comme « Building Information Modeling », recouvre en réalité trois significations distinctes (Buildwise, 2023 ; Lebègue & Celnik, 2014) :

Building Information Model : Ce terme désigne un modèle numérique représentant un bâtiment sous forme graphique. Ce modèle va bien au-delà d'une simple vue en 3D, car il intègre également des données précises concernant les éléments qui composent la structure, notamment leurs propriétés techniques et leurs performances.

Building Information Modeling : Ce concept fait référence au processus de création d'un modèle BIM. Il s'agit d'une démarche qui inclut non seulement la conception 3D, mais aussi l'intégration, la structuration et la gestion des informations liées aux objets du bâtiment. Ce processus collaboratif implique divers acteurs du projet, chacun contribuant à la base de données partagée.

Building Information Management : Ce concept se concentre sur la gestion des informations contenues dans le modèle numérique. Il englobe les pratiques liées à la gestion, au partage et à l'échange des données entre les différents intervenants d'un projet, assurant ainsi une coordination efficace tout au long du cycle de vie du bâtiment.

Le BIM permet la modélisation et la collaboration de l'ensemble des parties prenantes du projet. Cela facilite la gestion d'informations inscrites au sein du modèle. Cela facilite la gestion du bâtiment tout au long de sa durée de vie : de la conception jusqu'à la destruction passant par les phases de construction, acheminement des matériaux, ... (Lebègue & Celnik, 2014). Le principal avantage du BIM est d'intégrer, gérer et structurer les informations tout au long du cycle de vie du projet (Vrijders et al., 2023).

2.2.2 Les limites du BIM

Le manque de connaissances:

L'un des défis les plus importants dans la mise en œuvre du BIM dans les projets de construction réside dans l'adaptation aux technologies et aux processus associés au BIM (Elmualim & Gilder, 2014; Lu & Korman, 2010a). Les parties prenantes, en particulier dans des marchés en développement, se retrouvent confrontées à la difficulté de réorganiser efficacement les processus existants, ce qui limite considérablement l'implémentation du BIM (Lu & Korman, 2010b; Yan & Damian, 2008).

Les principaux obstacles majeurs à l'intégration du BIM dans le secteur de la construction sont l'insuffisance de compréhension quant à la préparation à l'adoption du BIM, ainsi que l'absence de normes communes pour faciliter cette adoption et sa mise en œuvre (Tan et al., 2019).

Plusieurs points ont été ciblés par Tan et al. (2019) :

La mauvaise compréhension du BIM :

La réussite des projets basés sur le BIM dépend de la capacité des parties prenantes à bien comprendre ce qu'est le BIM (Khosrowshahi & Arayici, 2012). Une interprétation erronée de ses concepts fondamentaux, de ses applications et de ses processus peut finalement empêcher de tirer tous les bénéfices potentiels de cette approche (Panuwatwanich & Peansupap, 2013) et entraîner des risques de mauvaise utilisation (W. Zhang et al., 2018).

Le manque de standardisation :

Il est généralement rare que les acteurs du secteur de la construction se consacrent spécifiquement à la recherche sur le BIM pour leurs projets en raison de contraintes de temps et de ressources. Certains se contentent de copier des plans d'exécution BIM provenant de sources externes (J. Zhang et al., 2016). L'étude limitée sur la mise en œuvre du BIM, réalisée dans le cadre de la construction préfabriquée, pourrait entraîner un faible niveau d'adaptabilité au BIM et freiner sa véritable mise en œuvre (Tan et al., 2019).

Le manque de standardisation de la part des autorités constitue un obstacle fréquemment rencontré à la mise en œuvre du BIM (L. Zhang et al., 2014 ; Jin et al., 2017). L'application du BIM repose sur des normes qui régissent ses procédures, activités et livrables. Bien que ces dernières années aient vu la publication de quelques normes BIM par des agences gouvernementales en Chine, l'étendue générale des normes BIM dans cette région reste indéniablement insuffisante par rapport aux États-Unis, à l'Australie et à d'autres pays de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). De plus, aucune norme n'est actuellement disponible pour la mise en œuvre du BIM dans la construction préfabriquée.

Le coût

Il est essentiel de bien saisir les avantages de la mise en œuvre du BIM, qui incluent à la fois des bénéfices tangibles et intangibles (Hurtado & Sullivan, 2012; Jin et al., 2017; W. Zhang et al., 2018). Néanmoins, les bénéfices économiques associés au BIM demeurent souvent flous, ce qui constitue un obstacle majeur à son adoption (Tan et al., 2019).

En effet, la méconnaissance des avantages économiques peut freiner les entreprises dans leur décision d'intégrer le BIM, malgré les gains potentiels qu'il pourrait offrir en matière d'efficacité et de réduction des coûts. Il est donc crucial de clarifier ces bénéfices.

2.2.3 BIM et architecture modulaire

Le BIM et la construction préfabriquée ont le potentiel de transformer l'industrie de la construction, passant d'un processus coûteux, long et laborieux à un processus dynamique, professionnel, permettant d'économiser temps et coûts, tout en étant davantage axé sur la conception et la construction de bâtiments durables (Samarasinghe et al., 2015). Il est également dit que l'utilisation du BIM facilite l'intégration de la préfabrication et la collaboration dès les premières phases du processus de conception et de construction (Warner & Cowles, 2013).

Malgré ce potentiel d'amélioration, le travail de Wang (2020) illustré par la *Figure 10* montre que les recherches sur les outils numériques en lien avec la construction hors-site ne sont pas encore fortement développés.

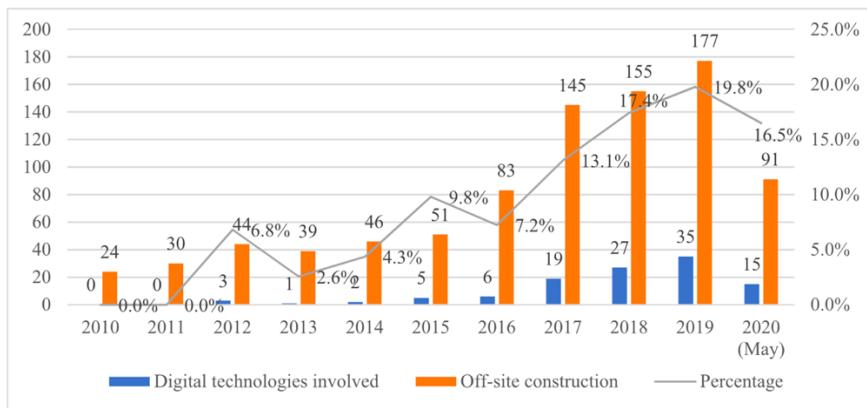


Figure 10: Nombre de publications annuelles sur les technologies numériques impliquées et nombre total d'articles sur la construction hors-site de 2010 à 2020 (Wang et al., 2020).

Un nombre croissant d'études a été réalisé sur ce sujet ces dernières années. Ces recherches portent sur les avantages et les obstacles liés à l'utilisation du BIM dans la construction modulaire ainsi que sur des cadres pour la mise en œuvre du BIM dans ce même domaine (Saliu et al., 2024).

Le travail de Isikdag (2013) synthétisé dans la *Figure 11* ci-dessous montre que plusieurs des avantages du BIM peuvent répondre pertinemment aux difficultés et contraintes de l'architecture modulaire. À partir de notre analyse de la littérature scientifique, nous allons développer en particulier les sujets suivant : 1-l'amélioration de la conception, 2-la réduction des erreurs de conception et 3-la réduction des modifications.

BIM Benefits	Optimized Schedules	Reduced Costs	Improved Design	Better Training	Better Collaboration	Better Logistics	Reduced Design Errors	Accurate & Extensive Amount of Information	Reduced Modification
OSM Barriers									
Need for high level of IT integration					●			●	
Bad reputation	●	●	●						
Limited experience				●	●				●
Modification Difficulties			●				●	●	●
Transportation problems	●		●			●			
Longer lead-in times	●		●		●	●	●	●	
Higher costs		●	●		●	●	●		●
Poor aesthetics			●					●	

Figure 11: Les bénéfices du BIM qui réduisent les limites de l'architecture modulaire (Isikdag, 2013).

2.2.4 Les avantages du BIM dans l'architecture modulaire.

La modélisation des modules préfabriqués

L'intégration du BIM a été reconnue comme une solution potentielle pour améliorer la collaboration et l'efficacité dans la construction modulaire, en fournissant les informations nécessaires dans le format approprié au bon moment et au bon endroit. Ce sujet a fait l'objet d'un nombre croissant d'études ces dernières années (Chen et al., 2015; Jang et al., 2020; Li et al., 2019). Le BIM est essentiel dans la construction modulaire, car il permet de créer une réplique numérique fidèle des composants physiques d'un bâtiment, facilitant ainsi la fabrication et l'assemblage précis en usine avant le montage sur site. En outre, le BIM assisté par ordinateur, comme le soulignent Wasim et al. (2022), peut générer automatiquement des dessins architecturaux et des sections détaillées pour tous les composants des structures préfabriquées en créant un modèle visuel utilisant la création de composants standard et la conception pour le « DfMA » (Salju et al., 2024).

L'avantage de la préfabrication et de la modélisation grâce au BIM est le fait que des composants industriels ou préfabriqués peuvent être stockés sous forme d'objets BIM standardisés dans une bibliothèque d'objets BIM. Ces objets peuvent être réutilisés et améliorés ultérieurement dans la conception (Abanda et al., 2017).

Optimisation des ressources et de la qualité de construction

La conception permet une grande précision des matériaux ainsi que d'autres spécificités directement liées au modèle. Elle permet aussi de savoir quelles sont les quantités de matériaux nécessaires à l'élaboration du projet. Cela rend les commandes plus précises et prévient les excès de matériaux, par conséquent, diminuant les déchets sur chantier (Abanda et al., 2017).

Une validation basée sur un modèle précis peut prévenir entre 4,3 et 15,2 % des déchets liés à la construction qui auraient été générés sans le BIM. Par exemple, en Finlande, l'adoption du BIM dans les projets résidentiels a permis une réduction des déchets de 45 % (Delcambre, 2014).

En plus d'une attention particulière accordée à une utilisation optimale des ressources, certaines normes environnementales peuvent être intégrées dans le BIM. Cela permet de vérifier la conformité environnementale des éléments. Comme, par exemple, les normes BEAM Plus, BREEAM et LEED, qui sont des certifications internationales qui évaluent la performance environnementale des bâtiments en termes de durabilité, d'efficacité énergétique, de gestion des ressources et d'impact sur l'environnement, chacune avec des critères adaptés à des contextes spécifiques (Johnny & Kuan, 2014 ; Azhar et al., 2011 ; Zanni et al., 2014 ; Kasim et al., 2012).

De plus, la modélisation précise des éléments permet également une représentation précise de la géométrie, le comportement et les propriétés des éléments du bâtiment. Avec ce modèle, même les éléments individuels (non développés avec une méthode modulaire) sont facilement incorporés dans les éléments préfabriqués en usine (Nawari, 2012). Le BIM incluant les informations précises et complètes est utile pour combler les lacunes de la mise en œuvre hors-site. Permettant d'éviter les coûts supplémentaires et les problèmes de modification des éléments (Isikdag, 2013).

La qualité des informations incluses dans le modèle est nettement améliorée et de haute précision. Cela conduit in fine à une meilleure qualité de composants de la construction hors-site (Thurnell & Stanley, 2014 ; Suermann & Issa, 2009 ; Wong & Fan, 2013).

L'un des principes de l'architecture modulaire, vu dans le chapitre « [Simulation and prototyping](#) » parle de l'importance de la simulation. Les différents composants sont testés par des simulations intégrées lors de la conception avec le BIM avant d'être assemblés sur site (Schade et al., 2011). Cela réduit considérablement les erreurs susceptibles de compromettre la qualité ou des coûts supplémentaires sans l'utilisation d'une conception précise avec le BIM (Abanda et al., 2017). On peut ajouter à cette liste des avantages de ce type de modélisation le fait que celle-ci améliore la collaboration entre les parties prenantes, ce qui accroît son efficacité et sa prise de décision. Cela se traduit par une réduction des délais de livraison et une diminution des erreurs de conception (Moses et al., 2015).

En conclusion, lorsque le BIM est utilisé pour modéliser des composants de construction hors site, la conception et la mise en œuvre de projets fabriqués hors site deviennent plus simples (Abanda et al., 2017).

La gestion de l'information

L'approche traditionnelle de la construction entraîne souvent de nombreux conflits entre les différents corps de métier au cours des phases de construction. Cela est principalement dû à un manque de coordination entre ces disciplines (Samarasinghe et al., 2015).

Des études antérieures soulignent un intérêt croissant pour le développement de nouveaux modèles de données visant à améliorer la représentation et l'interopérabilité des informations de conception dans l'industrie de la préfabrication, tels que l'IFC4Precast (qui est une extension conçue pour améliorer la collaboration entre les logiciels BIM utilisés dans les différentes étapes du cycle de vie des éléments préfabriqués, tout en réduisant les risques d'erreurs dans le transfert de données). Ces développements peuvent établir une base universelle pour l'échange d'informations BIM, la planification de la conception et l'optimisation des processus dans les bâtiments modulaires (Gan, 2022).

Une gestion efficace de l'information entre les différents intervenants (architecte, client, entrepreneur, spécialistes et fournisseurs) combinée à l'utilisation d'un modèle 3D unique et partagé par les différents acteurs, facilite la création d'un environnement de travail collaboratif. Cela permet à chacun de rester concentré sur sa tâche en voyant instantanément les améliorations apportées par les autres intervenants, engendrant une création de valeur optimale du début à l'achèvement complet du projet (Abanda et al., 2017).

La planification détaillée du montage sur site

Dans la construction modulaire, le BIM est essentiel car il permet de créer une réplique numérique précise des composants physiques d'un bâtiment, ce qui facilite une fabrication et un assemblage exacts en usine avant l'assemblage sur site. La modélisation complète du projet permet d'indiquer l'emplacement exact des éléments ainsi qu'un stockage des informations sur chacun de ces éléments. Cette démarche s'avère utile tout au long de la vie du bâtiment (pour le montage, la maintenance, la déconstruction, la réutilisation,...) (Abanda et al., 2017). Avec l'intégration du modèle 3D et du planning de construction, le BIM permet de faciliter la commande, la fabrication, l'acheminement et l'installation sur site (Lu & Korman, 2010a).

De plus, le BIM, comme l'ont souligné Wasim et al. (2022), peut générer automatiquement des plans architecturaux et des sections détaillées pour tous les composants des structures préfabriquées. Cela se fait grâce à la création d'un modèle visuel utilisant des normes de création de composants spécifiques au « DfMA ». Cette capacité à automatiser la production de documents

essentiels renforce encore le montage sur site grâce aux nombreux documents de qualité fournis pour la phase de construction sur site (Saliu et al., 2024).

La détection des endroits « critiques »

Des économies significatives en termes de temps et de coûts peuvent être réalisées grâce à la détection des conflits, qui peut être effectuée avant le début de la construction (Samarasinghe et al., 2015). Les modèles intégrés peuvent être utilisés pour vérifier les conflits dans Autodesk Navisworks⁷, où il est possible d'examiner des champs individuels pour détecter les interférences avec d'autres disciplines. Des fenêtres de vue séparées peuvent être créées pour différents conflits, et des commentaires peuvent être ajoutés directement dans le modèle. De plus, Navisworks peut générer un rapport complet de détection des conflits, permettant d'assigner les tâches de résolution aux différentes parties responsables (Samarasinghe et al., 2015).

Bensonwood, une entreprise américaine spécialisée dans la construction de maisons et de bâtiments en bois préfabriqués, a reconnu la puissance du BIM durant la phase de conception pour développer un modèle en 3D et simuler la détection des conflits. Cela leur permet également de prévoir la séquence de construction avant son démarrage, ce qui facilite le découpage des composants en assemblages (Smith, 2010).

Par exemple, le test de détection de conflit qui a été réalisé pour deux bâtiments résidentiels d'une superficie totale de 120 000 m² a permis de mettre en avant 381 erreurs de conception (Won et al., 2016). Un autre exemple de cette technique a été testée sur un complexe sportif et a permis d'identifier 136 erreurs de conception (Won et al., 2016). Cette habileté du BIM à repérer automatiquement ces erreurs de conception et à mettre en avant les potentiels problèmes de conception des bâtiments permet un travail en amont pour ne pas avoir à corriger ces erreurs sur chantiers (Lee et al., 2015).

2.2.5 La technologie RFID

La technologie d'identification par radiofréquence (RFID) est une méthode de communication sans fil qui utilise des ondes radio pour identifier et suivre des objets, des animaux ou des personnes. Elle repose sur des étiquettes RFID (ou "tags") qui contiennent des données numériques, généralement stockées dans une puce électronique associée à une antenne. Un lecteur RFID capte et lis ces informations sans nécessiter un contact direct avec l'étiquette, contrairement aux lecteurs de codes-barres, permettant ainsi des lectures à plusieurs mètres de distance. Cette technologie est couramment utilisée dans la gestion des stocks, le suivi logistique mais également dans les puces d'identification des animaux domestiques (Pai Raikar, 2024).

⁷ Autodesk Naviwork est un logiciel de coordination BIM.

L'utilisation de la technologie RFID s'avère être un allié de taille durant toutes les phases d'un chantier modulaire.

La fabrication :

Les informations détaillées de chaque élément préfabriqué sont contenues dans le modèle BIM et sont communiquées aux fabricants en usine. Des technologies d'authentification de chaque élément sont développées lors de la fabrication pour faciliter la transmission des informations précises de chaque élément et donc de les transformer en objets contenant des informations (Huang et al., 2008). Cela permet de relier directement les objets avec le modèle BIM. L'une des technologies utilisées est la transmission de l'information par radiofréquence (RFID). Cette technologie fonctionne avec des étiquettes posées sur les éléments préfabriqués. Ces étiquettes (également appelées « tags ») peuvent être examinées par les clients et les fabricants (*Figure 12*).

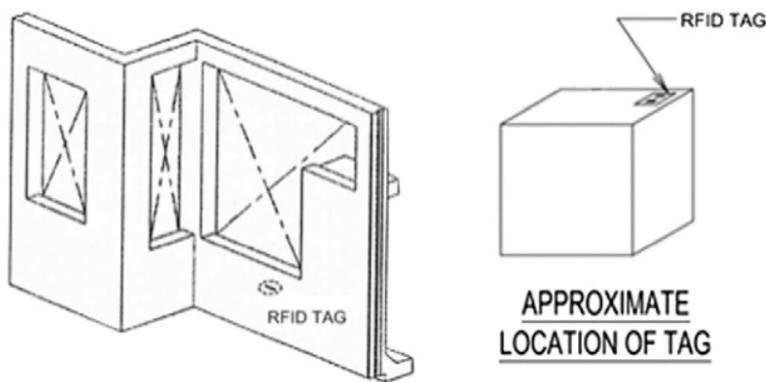


Figure 12: Composants de bâtiment avec étiquettes RFID (Chen et al., 2015).

Les emplacements des étiquettes sont indiqués dans le modèle BIM afin d'assurer une production standardisée. Un numéro d'identification unique est attribué à chaque élément afin de le relier aux informations dans le modèle BIM. Le directeur de l'entreprise de fabrication vérifie que la RFID et la base de données centrale sont correctement corrélées. Les différents éléments sont scannés par un lecteur RFID et permettent de passer d'une étape de « fabrication » à une étape de « en stock », cette mise à jour est faite dans les bases de données. Cela permet aux différents intervenants sur chantier de rester au courant de l'avancée de la fabrication des éléments hors-site et permet une surveillance à distance de l'état d'avancement du chantier (Chen et al., 2015).

Le transport :

L'interopérabilité entre le calendrier BIM et la technologie RFID permet d'élaborer un planning précis de construction et de consulter le suivi d'avancement du chantier en temps réel.

Pour le transport des éléments, cette technologie est aussi utilisée. Les étiquettes RFID sont scannées avant la livraison afin de garantir que les bonnes pièces sont chargées dans le camion.

Le statut passe alors de « en stock » à « en livraison » dans la base de données partagée. Une fois que le camion a livré les modules sur site, il entame une vérification pour s'assurer qu'aucune pièce n'est endommagée. Une fois ces vérifications finies, il scanne les « tags » et les statuts changent de « en livraison » à « reçu » (Chen et al., 2015).

L'assemblage sur site :

Lors de l'installation, les ouvriers scannent les RFID des composants préfabriqués pour obtenir les informations adéquates à l'installation de chaque élément comme l'emplacement du module tel qu'il est développé dans le modèle BIM. Cela permet de garantir l'installation de chaque élément au bon endroit. Lorsque l'élément est installé, la base de données partagée note que l'élément est passé de « reçu » à « installé ». Les différents corps de métiers impliqués dans la construction du bâtiment peuvent obtenir l'état de chaque composant dans le modèle virtuel et permettent d'obtenir des informations sur le processus de construction en temps réel. Cela permet une traçabilité des projets durant toute la phase de construction. Une analyse des délais de chaque étape d'installation permet ensuite de comprendre quels sont les difficultés rencontrées lors de l'érection du bâtiment et ainsi d'améliorer les processus et donc les délais de livraison (Chen et al., 2015).

2.2.6 Des exemples d'architecture modulaire utilisant le BIM

Le cas d'Anderson Anderson

Mark et Peter Anderson ont développé Anderson Anderson Architecture, une agence spécialisée dans la construction hors site, un domaine qui leur a permis de créer un réseau industriel rendant leurs projets réalisables. Aujourd'hui, ils explorent des systèmes hybrides, combinant standardisation et personnalisation, pour aller au-delà de la préfabrication d'éléments discrets. Les frères Anderson soulignent que les architectes n'appréhendent pas toujours le potentiel et les responsabilités liés à la fabrication industrielle, et qu'il est essentiel que concepteurs et constructeurs collaborent directement en usine et lors de la conception (Smith, 2010).

Anderson Anderson identifient plusieurs avantages et inconvénients dans la préfabrication. La préfabrication hors site offre une meilleure prévisibilité en termes de coûts et de délais, ce qui aide les propriétaires, architectes et constructeurs à mieux gérer le projet grâce à la gestion de la chaîne d'approvisionnement. Ce gain de temps se manifeste à chaque étape, même si la durée globale peut rester inchangée. Ils notent aussi que les systèmes modulaires sont économiquement plus viables pour les grands projets multifamiliaux que pour les maisons individuelles (Smith, 2010). Malgré ces avantages, la préfabrication n'est pas toujours la méthode la plus économique pour réduire les coûts initiaux, mais elle garantit une meilleure qualité et durabilité via un contrôle strict. Toutefois, la mise en place de procédés automatisés, comme les équipements CNC, est coûteuse.

Les Anderson privilégient donc les infrastructures existantes pour optimiser les coûts et envisagent l'avenir de la construction industrialisée avec des systèmes standardisés plutôt qu'une personnalisation de masse (*Figure 13*) (Smith, 2010).



Figure 13 : Systèmes de panneaux de bois explorés par Anderson Anderson Architecture (Smith, 2010).

Le cas de Bensonwood

Bensonwood applique une approche « *Virtual First* » pour la préfabrication, utilisant le BIM pour modéliser chaque composant, anticiper les conflits et simuler la séquence de construction. Grâce aux codes CNC⁸, les données BIM sont directement transmises aux machines pour automatiser la découpe, simplifiant la préfabrication en usine. Dans le projet de la maison Loblolly, Bensonwood a développé le modèle BIM de Kieran Timberlake pour planifier la fabrication, la livraison et l'installation, modélisant chaque détail, y compris les vis et connexions. Ils utilisent également le « *patterning de conception* », une méthode qui convertit des objets paramétriques en composants

⁸ Commande Numérique par Calculateur) est une machine automatisée pilotée par ordinateur pour réaliser des opérations d'usinage précises.

réutilisables et adaptables, inspirée du kit de composants de Palladio, pour réduire le nombre d'éléments nécessaires dans un bâtiment à environ 50 (*Figure 14*) (Smith, 2010).



Figure 14 : « Unity House » fabriquée par Bensonwood. La conception de la maison a été faite sur base de 50 éléments de préfabriqués (Smith, 2010).

Le cas de Ramaji

Pendant sa recherche, le chercheur Ramaji a intégré les caractéristiques de la production de logements préfabriqués dans le BIM pour concevoir un modèle d'architecture de produit. Ce modèle rassemble les informations sur les éléments fonctionnels (tels que les attributs, descriptions et spécifications), les objets physiques (comme la forme, la dimension, le poids, le volume et la quantité) et leurs interactions (telles que les relations entre eux) (Ramaji et al., 2017).

Lors de la fabrication, les informations de performance du produit doivent être spécifiées, incluant la date de production, les registres de qualité, le coût, l'emplacement et les émissions de carbone. Pendant le transport, des informations de traçabilité sont nécessaires, comme les détails

concernant le conducteur, le tracteur et la remorque, l'emplacement, l'état d'avancement et le trajet emprunté (Ramaji et al., 2017).

Au stade de la construction, il est indispensable de disposer d'informations notamment le coût, la sécurité, l'échéancier, la qualité, les émissions de carbone, les contraintes, la position et l'espace. Enfin, durant la phase de maintenance, l'interaction entre les produits préfabriqués et les unités d'informations fonctionnelles permet de surveiller et de prévoir des informations essentielles, telles que la consommation d'énergie, la date d'expiration de la garantie et les éventuels défauts (Ramaji et al., 2017).

Ainsi, la collecte d'informations depuis les objets et les lots de travaux jusqu'à la plateforme facilite la gestion de ces données tout au long du cycle de vie de la production de logements préfabriqués (Ramaji et al., 2017; Ramaji & Memari, 2016).

3 Méthodologie

La méthodologie est la partie centrale de l'article scientifique. Elle est importante car elle justifie les choix et les raisonnements qui permettent de répondre et/ou d'ajouter des hypothèses de recherche (Debret, 2020).

3.1 Cadre méthodologique

Un cadre méthodologique a été mis en place pour mieux comprendre le choix de la méthodologie appliquée dans cette étude.

3.1.1 La recherche qualitative

Une étude qualitative a pour but de comprendre ou d'expliquer un phénomène (comportement de groupe, un phénomène, un fait ou un sujet).

Il s'agit d'une méthode de recherche plus descriptive et qui se concentre sur des interprétations, des expériences et leur signification (Claude, 2019a).

La recherche qualitative est axée sur plusieurs méthodes et implique une approche interprétative et naturaliste de son sujet. Cela signifie que les chercheurs qualitatifs étudient les sujets dans leur environnement naturel, en essayant de donner un sens aux phénomènes ou de les interpréter en fonction des significations que les gens leur attribuent. La recherche qualitative implique l'utilisation et la collecte de donnée (Groat & Wang, 2013).

Ce type de recherche en architecture est caractérisée par cinq concepts clés (Groat & Wang, 2013) :

L'accent mis sur les milieux naturels :

Par « milieux naturels », on entend que les objets d'enquête ne sont pas éloignés des lieux dans lesquels ils existent habituellement dans le cadre de la vie quotidienne.

Un accent sur l'interprétation et la signification :

Lors d'une recherche qualitative, les chercheurs jouent un rôle important dans l'interprétation et la compréhension de ces données. De plus, lors de collecte de données comme les entretiens, la qualité de la retranscription dépendra fortement des compétences en interprétation du chercheur.

Une attention particulière portée à la manière dont les répondants perçoivent leur propre situation :

Les chercheurs cherchent à présenter une image holistique du contexte ou du phénomène étudié tel que les répondants le comprennent eux-mêmes. Il faut donc donner de l'importance aux termes utilisés et à la manière dont les répondants les considèrent.

L'utilisation de tactiques multiples :

Certains chercheurs qualifient cette caractéristique de la recherche qualitative de bricolage et la recherche de bricoleur. Un bricolage est « un ensemble de pratiques assemblées et étroitement liées qui fournissent des solutions à un problème dans une situation concrète ». Cela implique

l'utilisation de différentes techniques de collecte de données particulières et adaptées à la question de recherche posée.

Importance de la logique inductive :

Les questions de recherche étudiées dans le cadre d'une étude qualitative évoluent fréquemment dans un processus itératif.

La formulation initiale d'une question est généralement affinée à la lumière des entretiens ou des observations en cours. Cela permet au chercheur de tester les idées émergentes.

Avantages de la recherche qualitative :

Cette méthode permet de comprendre le « pourquoi » des résultats. Moins axée sur les statistiques et les données structurées, elle fait la part belle aux émotions, aux motivations et aux comportements humains, grâce à des informations textuelles. De plus, elle permet de replacer les comportements dans leurs contextes et de dégager de nouveaux thèmes, idées ou hypothèses (Compilatio, 2024).

Les limites de la recherche qualitative :

Malgré les avantages de la recherche qualitative, cette méthode contient des inconvénients tels que la grande quantité de données non structurées qui doit être codées ou analysées d'une manière ou d'une autre, une tâche qui prend énormément de temps ou encore la crédibilité des données qualitatives qui peuvent être remises en doute (par exemple avec le paradigme post-positiviste) (Groat & Wang, 2013).

3.1.2 La recherche expérimentale

Comme son nom l'indique, la recherche expérimentale a pour but de tester, à l'aide d'hypothèses, diverses théories. Grâce aux recherches et aux expériences effectuées, le chercheur peut valider ou invalider ses hypothèses en faisant varier certains paramètres dans son expérience (Scribbr, s. d.).

La recherche expérimentale en architecture est caractérisée par cinq concepts clés (Groat & Wang, 2013) :

L'utilisation d'un traitement ou d'une variable indépendante :

Le chercheur étudie l'impact d'une ou de plusieurs variables spécifiques et identifiables sur le phénomène étudié. Ces variables sont manipulées ou contrôlées par le chercheur d'une manière spécifique et, en tant que telles, elles sont considérées comme des traitements dans la stratégie expérimentale.

La mesure d'une ou plusieurs variables de résultat :

Le chercheur a pu préciser l'impact du traitement expérimental en mesurant soigneusement certaines mesures de résultats, ou variables dépendantes.

La désignation d'une unité d'affectation :

Le chercheur a appliqué le traitement expérimental à une unité d'affectation spécifiée. Chacune de ces « unités » a reçu un traitement manipulé par le chercheur.

Utilisation d'un groupe de comparaison ou de contrôle :

Lors d'études expérimentales, l'utilisation d'un groupe témoin est conseillée. L'utilisation d'un groupe témoin ou de contrôle a pour but de permettre la mesure de l'effet relatif du traitement, ou de la variable indépendante, par rapport aux unités qui n'ont reçu aucun traitement ou un traitement différent.

Un accent sur la causalité :

L'objectif de cette recherche expérimentale est de permettre au chercheur d'établir de manière crédible une relation de cause à effet. En général, le chercheur expérimental cherche à déterminer et à évaluer dans quelle mesure un ou plusieurs traitements entraînent un résultat obtenu dans un contexte de recherche spécifique, que ce soit en laboratoire ou sur le terrain.

Parmi toutes les stratégies de conception de recherche couramment employées par les chercheurs, l'expérimentation est, selon toute vraisemblance, la plus controversée. La conception expérimentale est considérée par les chercheurs post-positivistes comme représentant le plus haut niveau de recherche (Groat & Wang, 2013).

Cette méthode comporte tout de même des sujets qui mènent à discussion comme l'efficacité et la précision en réduisant la réalité complexe pour identifier des variables « causales » ou indépendantes, la mauvaise application de la procédure expérimentale ainsi que les questions éthiques, dans certains cas (Groat & Wang, 2013).

Combiner les atouts de la méthode expérimentale avec ceux d'autres méthodes est probablement le meilleur moyen d'éviter ses faiblesses. Cette recherche peut devenir remarquable ou imparfaite selon la manière dont elle est appliquée à la question de recherche (Groat & Wang, 2013).

3.2 Méthode de recherche

Dans ce mémoire, les méthodes de recherche utilisées sont des méthodes qualitatives, par un entretien semi-directif permettant une récolte de données suffisante. Une fois ces informations récoltées, les données disponibles dans le vade-mecum permettent de créer la maquette numérique BIM du projet Modul R de la FW-B (Matador & KIS Studio, 2024). Une première étude des résultats permettra de mettre en avant la facilité avec laquelle le module a été modélisé. Un retour complet se fera en comparaison avec l'entretien semi-dirigé afin de faire le point sur l'approbation de certaines difficultés lors de l'utilisation du BIM dans ce cadre de recherche.

Ce processus méthodologique est pertinent pour répondre à la question de recherche : **Dans quelle mesure le BIM peut accompagner la préconception des points critiques pour les bâtiments modulaires ? (Focus sur le projet pilote Modul R de la FW-B)**. Le test de l'implémentation d'une maquette numérique BIM dans un projet modulaire va permettre de tester ses habiletés à améliorer le processus de conception de ces bâtiments préfabriqués.

En conclusion, ces méthodes de recherche sont pertinentes car elles vont permettre de valider ou d'invalider les hypothèses de cette recherche. Il sera possible d'obtenir les enjeux de l'implémentation du BIM dans l'architecture modulaire et de comprendre comment cette implémentation peut jouer un rôle crucial dans la phase de conception de ces projets. Une comparaison de l'expérimentation et de l'entretien semi-directif permettra une confrontation de l'expérience établie dans un cadre de recherche avec celui du terrain, vécu par les intervenants des chantiers modulaires.

La *Figure 15* illustre le schéma méthodologique utilisé par le chercheur.

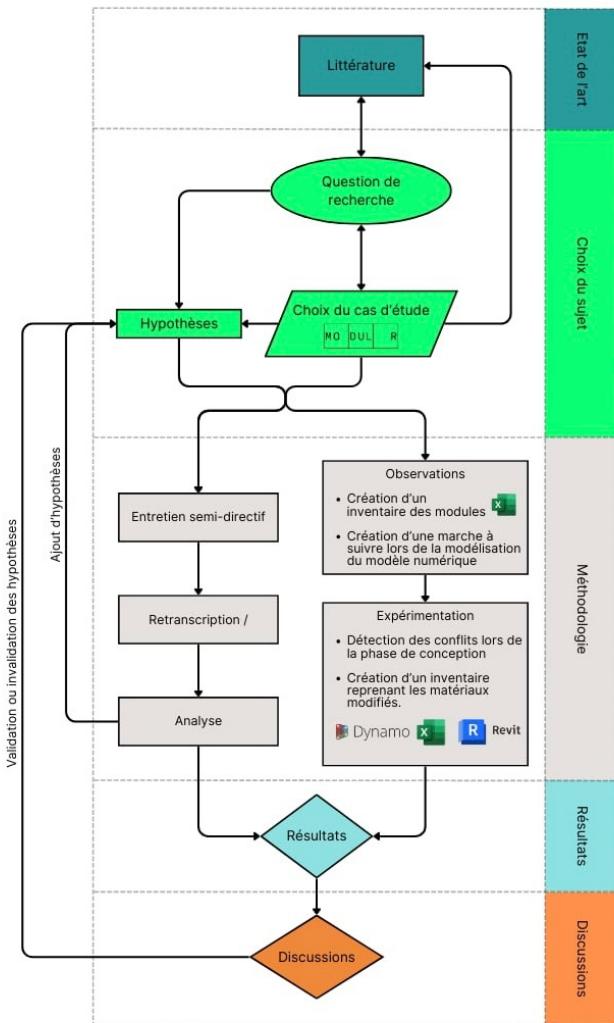


Figure 15: Schéma méthodologique conçu par le chercheur.

3.2.1 Application de la recherche qualitative (entretien semi-directif)

L'entretien de recherche est une technique de collecte de données informatives. Cette méthode permet de récolter et d'analyser plusieurs éléments : l'avis, l'attitude, les sentiments, les représentations de la personne interrogée (Claude, 2019b).

Dans ce mémoire, nous allons utiliser l'entretien semi-directif. Ce type d'entretien, aussi appelé "entretien qualitatif ou approfondi", se base sur des interrogations assez généralement formulées et ouvertes. Il est possible de poser de nouvelles questions si la personne interviewée soulève un aspect encore inconnu (Claude, 2019b). Cette méthode de récolte de données va permettre d'éventuellement d'ajouter de nouvelles hypothèses suite à l'entretien.

Cette méthode comporte plusieurs avantages comme : Il permet d'approfondir un sujet si besoin, il rend possible un vrai échange entre le chercheur et son interlocuteur et peut faire naître de nouvelles hypothèses (Claude, 2019b).

Mais celle-ci a également quelques inconvénients comme le fait qu'une donnée statistique est compliquée à mettre en place ou encore que l'individu interrogé ne peut pas s'étendre longuement sur un sujet précis (Claude, 2019b).

L'application de la recherche qualitative par le biais de l'entretien semi-directif se fera grâce à :

- La création d'un guide d'entretien avec des objectifs clairs, une liste de sujet à aborder ainsi que des pistes et des directions plus précises.
- La retranscription de l'entretien de manière textuelle.
- L'analyse de l'entretien afin de répondre aux objectifs définis dans le guide d'entretien.
- L'implémentation des nouvelles idées, hypothèses dans ce mémoire.

Cet entretien semi-directif sera encadré par un guide d'entretien disponible en annexe.

3.2.2 Application de la recherche expérimentale

L'expérimentation est conduite par le chercheur, qui mobilise ses compétences acquises en logiciels de conception numérique. Ses connaissances reposent principalement sur les cours suivis à l'Université de Liège durant son cursus académique de 2021 à 2024. Le chercheur a suivi des cours de CAO et modélisation 3D (2020), des cours de numérique pour l'architecture (2021), des cours de Culture numérique et conception orientée Data (2023) et des cours d'espace, expérimentation structurelle et sensibilités paramétriques (2023). Le chercheur a également suivi des formations en ligne supplémentaires. Bien que cet apprentissage lui ait permis de réaliser cette recherche, il est important de noter que le chercheur n'est pas un expert confirmé dans l'usage du BIM.

Ordinateur et logiciel

Le chercheur utilise un ordinateur avec la configuration suivante :

- Processeur : Intel Core i5-6600K (3,5 Ghz)
- Nombre de cœurs du processeur : 4
- Carte graphique : GeForce GTX 1060, 6 Go
- RAM : 32 Go, DDR4 2133 Mhz
- Système d'exploitation : Système d'exploitation 64 bits, processeur x64

Le logiciel utilisé dans le cadre de cette recherche est Revit 2024.

Revit est un logiciel de modélisation de la suite Autodesk qui permet la centralisation des documents de conception, l'analyse, la visualisation et la coordination utiles à toutes les phases du projet architectural (Autodesk, s. d.-b).

La nomenclature dans Revit :

La nomenclature Revit permet de quantifier, d'analyser et de gérer les composants, les matériaux, les vues et les feuilles utilisés dans une maquette afin de mieux tirer profit des informations du projet BIM (Benjamin, 2019).

Étapes de la recherche expérimentale

Modélisation d'un module du projet numérique BIM sur base du Vade-Mecum pour le projet Modul R de la FW-B (Matador & KIS Studio, 2024).

L'application de la recherche qualitative par le biais de l'expérimentation sur Revit se fera grâce à :

- La fabrication d'une grille structurelle
- La création d'un inventaire réutilisable
- L'organisation des modules en groupe
- La simplification de la correspondance entre le cahier des charges et le modèle Revit
- La détection des conflits dans Revit
- La nomenclature des coûts du projet
- La nomenclature des éléments génériques et spécifiques
- L'identification des éléments modélisés
- La logistique des éléments préfabriqués
- L'analyse du site pour le chantier
- La confrontation des résultats avec les hypothèses.

3.3 Le projet étudié

3.3.1 Quel est le logiciel BIM le plus optimal pour l'architecture modulaire ?

Le logiciel choisi pour développer ce mémoire est Revit pour différentes raisons :

La gestion des répétitions et variations :

Pour les projets modulaires, où de nombreux éléments sont répliqués, les familles paramétriques de Revit offrent un contrôle poussé sur les répétitions et les ajustements en série, facilitant ainsi la coordination de modules multiples.

L'interopérabilité avec d'autres disciplines (MEP et structure) :

Les projets modulaires impliquent souvent une coordination étroite entre l'architecture, la structure et les systèmes MEP (mécanique, électricité, plomberie). Revit est particulièrement performant pour les projets où chaque discipline intervient de manière interconnectée, avec des outils permettant de vérifier l'intégration de chaque module (par exemple, en identifiant les conflits).

L'anticipation des erreurs :

Les éléments modulaires doivent souvent être assemblés de manière précise, sans ajustement supplémentaire une fois sur site. Revit intègre des outils de détection de conflits qui permettent de repérer les interférences potentielles dès la phase de conception, ce qui est crucial pour la préfabrication et l'assemblage modulaire.

La gestion des fiches techniques et des détails d'assemblage :

Revit génère facilement des documents techniques associés aux modules, incluant des détails sur l'assemblage, le positionnement et les contraintes de fabrication, ce qui améliore la précision lors de la phase de préfabrication et de construction.

Le partage des objets modulaires :

Les objets modulaires créés peuvent être réutilisés et partagés au sein de l'équipe, facilitant la gestion de projets similaires et permettant d'accélérer la conception dans des projets de grande envergure.

En conclusion, Revit offre une combinaison de modélisation, de coordination interdisciplinaire, de détection de conflits et de documentation automatisée, ce qui en fait un outil particulièrement bien adapté pour l'architecture modulaire. Ces fonctionnalités aident les équipes à éviter les erreurs de fabrication, à améliorer la collaboration et à optimiser les processus, pouvant rendre la préfabrication et l'assemblage modulaire plus efficaces et rentables.

3.3.2 Description du projet Modul R

Le projet Modul R, initié par la Fédération Wallonie-Bruxelles (FW-B), propose un modèle novateur de construction modulaire et préfabriquée d'écoles en bois. Conçu pour répondre aux besoins croissants en infrastructures scolaires de qualité, le système permet une construction rapide et économique, tout en intégrant des principes de durabilité environnementale et d'adaptabilité pédagogique.

Ce projet résulte d'une recherche approfondie associant des bureaux d'études, des universités et le partenaire industriel Stabilame, avec un objectif clé : optimiser le parc immobilier scolaire en Wallonie et Bruxelles. Le contexte du projet inclut une pression démographique décroissante mais encore importante, et un besoin de renouveler des infrastructures vieillissantes et inadaptées, tout en respectant des contraintes budgétaires strictes.

Modul R propose une modularité qui simplifie et accélère les processus de construction grâce à une préfabrication en atelier, ce qui réduit les coûts et le temps de chantier. Les modules de base, majoritairement en bois local certifié pour minimiser l'empreinte écologique, offrent des espaces flexibles qui répondent aux exigences modernes en matière de confort thermique, acoustique et luminosité naturelle. Le bois utilisé est non seulement durable, mais apporte aussi des qualités esthétiques et de confort visuel appréciées dans le milieu éducatif.

En parallèle, le système prend en compte les évolutions des pratiques pédagogiques, comme celles introduites par le Pacte pour un enseignement d'excellence, favorisant des espaces polyvalents et adaptables. La modularité permet également des configurations variées selon les besoins spécifiques des établissements, offrant ainsi une école unique à chaque communauté tout en facilitant une standardisation utile pour la reproduction du modèle.

Un projet-pilote à l'Athénée royal de La Louvière teste ce système en conditions réelles. En outre, un vade-mecum en trois volumes est disponible pour guider les concepteurs dans la mise en œuvre du modèle Modul R, de l'étude de faisabilité jusqu'à la construction finale (Matador & KIS Studio, 2024).

Ce projet se positionne comme une solution pragmatique et durable face aux défis du secteur scolaire, visant à fournir des infrastructures flexibles, performantes et respectueuses de l'environnement pour l'avenir de l'enseignement en Fédération Wallonie-Bruxelles.

4 Analyses

4.1 Analyse de l'entretien semi-directif

1. Objectifs du projet Modul R

Le projet Modul R a pour objectif principal d'optimiser la construction des écoles en adoptant une approche modulaire innovante. Cela implique de rationaliser l'ensemble du processus, depuis les premières phases de conception jusqu'à la livraison finale des bâtiments. Comme dit par Mr. Bourez dans l'interview : « *Alors à l'origine le projet c'est quoi ? Comment optimiser toutes les phases d'élaboration d'une école depuis sa conception ? Même depuis son lancement ? Depuis le lancement du marché ou l'étude de faisabilité jusqu'à la livraison du bâtiment ? Comment raccourcir le temps, rationaliser l'argent ? Performer par rapport à tous les niveaux d'exigence aujourd'hui, performance énergétique, ...* » (O. Bourez & A. Stache, communication personnelle, 20 novembre 2024). Cette rationalisation vise à réduire significativement les coûts de construction et à diminuer le temps nécessaire à la réalisation des projets, tout en garantissant des performances énergétiques élevées, essentielles dans un contexte de transition écologique. En parallèle, le projet s'inscrit dans une démarche de recherche spéculative où le modulaire est utilisé comme hypothèse de travail. L'idée centrale est de standardiser certains éléments afin d'améliorer l'efficacité et les performances globales. Toutefois, cette standardisation n'exclut pas la possibilité d'intégrer des spécificités architecturales, permettant ainsi de préserver une certaine flexibilité et d'adapter chaque bâtiment aux besoins particuliers des usagers et aux contraintes du site.

2. Méthodologie de conception

La méthodologie de conception adoptée dans le cadre du projet Modul R repose sur des principes visant à optimiser à la fois les aspects économiques, environnementaux et logistiques.

« *On va augmenter toutes les performances. Donc peut-être qu'avant tout une école il faut essayer de l'optimiser en termes de modules* », nous dit Mr. Bourez (O. Bourez & A. Stache, communication personnelle, 20 novembre 2024).

La préfabrication en deux dimensions (2D) est privilégiée afin de réduire les coûts liés au transport, de limiter l'impact environnemental et de simplifier la logistique sur le chantier. Contrairement aux modules volumétriques (3D), cette approche permet d'éviter le transport d'espaces vides, réduisant ainsi les surcoûts et les contraintes liées à la manutention. « *en utilisant des modules en 3 dimensions, on transporte beaucoup de vides, pour des questions éthiques, minimiser les transports on fait du 2D* », nous dit Mr. Bourez (O. Bourez & A. Stache, communication personnelle, 20 novembre 2024).

Les éléments préfabriqués sont assemblés sur place, offrant une flexibilité accrue dans la conception finale. Cette modularité garantit que les bâtiments peuvent être adaptés à des exigences spécifiques, sans compromettre la qualité architecturale ni la fonctionnalité.

L'adaptation aux particularités des sites est également au cœur de cette méthodologie. Les modules intègrent des éléments spécifiques, tels que des parements, conçus pour répondre aux contraintes locales, qu'il s'agisse de l'orientation, des réglementations en vigueur ou des attentes

des maîtres d'ouvrage. Cette capacité d'adaptation permet de concilier efficacité et personnalisation, deux enjeux clés dans la construction modulaire.

3. Enjeux techniques et limites

Le projet Modul R se confronte à plusieurs enjeux techniques et limites spécifiques au concept de construction modulaire. Parmi les principales contraintes figure la taille des modules, directement influencée par les restrictions du transport routier. Les dimensions doivent permettre de passer sous des ponts ou d'éviter les convois exceptionnels, ce qui conditionne fortement la conception initiale. De plus, la préfabrication nécessite une planification particulièrement détaillée et précise, rendant parfois le processus plus complexe que pour un projet de construction classique.

Certaines problématiques spécifiques apparaissent également, notamment dans la gestion des systèmes techniques. Les installations de chauffage et de ventilation, par exemple, doivent être adaptées individuellement à chaque module ou à des groupes de modules. Cette approche vise à réduire la complexité et la longueur des connexions, mais elle exige une ingénierie soigneusement anticipée.

Enfin, un défi majeur réside dans l'équilibre entre standardisation et évolutivité. Si la modularité offre un cadre standardisé propice à l'efficacité, elle ne doit pas entraver la capacité des bâtiments à évoluer. Les écoles modulaires doivent ainsi conserver une certaine flexibilité pour répondre aux besoins changeants des usagers et aux contraintes futures, tout en évitant une uniformité excessive qui pourrait limiter leur pertinence architecturale et fonctionnelle.

4. Place de l'architecture dans le modulaire

Le projet Modul R se distingue par sa volonté de placer l'architecture au cœur de la construction modulaire, en s'éloignant des approches traditionnelles souvent perçues comme rigides ou uniformes. Contrairement à de nombreux projets modulaires, il privilégie une flexibilité accrue dans les ajustements des espaces, des formes et des matériaux. Cette ouverture permet de préserver une marge de créativité essentielle pour les concepteurs, garantissant que chaque réalisation reste unique et adaptée à son contexte.

Dans cette approche, les modules ne sont pas envisagés comme des limites, mais comme une base structurante adaptable. Le modulaire agit comme un point de départ, conçu pour répondre efficacement aux besoins spécifiques des projets tout en optimisant les processus de fabrication et de construction. L'équilibre recherché entre générique et spécifique incarne cette philosophie : d'un côté, des éléments standardisés assurent efficacité et rationalité ; de l'autre, une attention particulière est portée à la qualité architecturale et à l'intégration contextuelle, afin de préserver la singularité et l'identité des bâtiments. Comme énoncé par Mr Bourez dans l'interview : « *c'est une espèce de tentative d'optimiser tout ce qui est optimisable et de laisser spécifique tout ce qui est spécifique* » (O. Bourez & A. Stache, communication personnelle, 20 novembre 2024). Il soutient également cette pensée en nous disant « *Sans devoir réinventer la poudre à chaque projet. Alors c'est un peu contradictoire avec l'architecture. Parce que l'architecture en principe, elle est toujours très spécifique, mais entre le spécifique et le générique, il y a parfois un entre deux* » (O. Bourez & A. Stache, communication personnelle, 20 novembre 2024).

Cette vision novatrice redéfinit le rôle de l'architecture dans un cadre modulaire, en alliant fonctionnalité et expression créative.

5. BIM et modularité

Dans le cadre du projet Modul R, l'utilisation du BIM n'a pas été envisagée. « *Ce projet n'est pas du tout pensé avec du BIM, le projet est entièrement dessiné en 2D sur Autocad* » nous reporte Mr. Stache (O. Bourez & A. Stache, communication personnelle, 20 novembre 2024).

Lors de la phase de conception, Matador⁹ n'a pas intégré le BIM de manière systématique. Cependant, les entrepreneurs ont modélisé une partie du bâtiment avec un niveau de précision élevé, sans toutefois exploiter le BIM. Le chercheur a également envisagé l'utilisation de cet outil pour des applications spécifiques, telles que la détection des conflits entre éléments ou l'établissement d'un inventaire détaillé des matériaux.

Pour les projets futurs, le potentiel du BIM est perçu comme un levier stratégique majeur. Le BIM offre plusieurs avantages, notamment une gestion centralisée des données, une meilleure anticipation des problèmes techniques, et l'optimisation des processus, comme la quantification rapide des matériaux et des coûts. Par exemple, Mr. Bourez nous dit : « *Je pense que là il y a un intérêt à travailler avec le BIM, ..., tu dessines une école, tu la modélises par après et ton dossier d'exécution est déjà presque fini* » (O. Bourez & A. Stache, communication personnelle, 20 novembre 2024).

Une intégration approfondie du BIM pourrait ainsi améliorer l'efficacité, la précision et la qualité des projets tout en renforçant leur adaptabilité aux exigences spécifiques.

6. Avantages économiques et environnementaux

Le projet Modul R met en avant des avantages significatifs sur les plans économique et environnemental, grâce à l'utilisation de la construction modulaire et des principes de préfabrication. L'efficacité de cette méthode se traduit par une réduction notable du temps passé sur le chantier, ce qui engendre des économies indirectes, telles que la diminution des besoins en locations temporaires pour les écoles en cours de construction. Pensée développée par Mr. Bourez : « *Si au moins on a le même prix qu'un projet classique avec de bien meilleures performances. Ça c'est parce qu'en fait, de toute façon, on gagne sur le temps d'étude, sur le temps de chantier, sur le temps de location, ...* » (O. Bourez & A. Stache, communication personnelle, 20 novembre 2024).

Par ailleurs, malgré les spécificités liées à la modularité, les coûts de construction demeurent équilibrés, tout en offrant une meilleure qualité et une durabilité accrue des bâtiments.

Sur le plan écologique, l'approche modulaire contribue à limiter l'impact environnemental. En préférant des éléments plats en 2D aux modules volumétriques, le projet minimise les transports et les espaces inutiles, réduisant ainsi l'empreinte carbone associée à la logistique. En outre, Modul R favorise les circuits courts en intégrant des matériaux locaux, comme le bois, et en soutenant le développement de la production de panneaux de bois lamellé-croisé (CLT) en Belgique. Ces initiatives reflètent un engagement fort envers une construction durable et respectueuse de

⁹ Le bureau d'architecture en charge de la conception du projet Modul R.

l'environnement, tout en répondant aux défis économiques et sociaux actuels.

7. Challenges et perspectives

Le projet Modul R se heurte à plusieurs défis liés à la nature même de la construction modulaire. La préfabrication, bien qu'efficace, impose une grande complexité lors de la phase de conception. Chaque détail technique doit être anticipé et défini à l'avance, rendant le processus de planification plus lourd et exigeant que pour des projets traditionnels. Cette piste est développée par Mr. Bourez : « *Il faut tout définir et de façon très précise. Et là c'est beaucoup plus de travail. Et d'ailleurs la préfabrication en elle-même n'est pas seulement plus économique. Elle est plus performante constructivement, elle a plein de vertus. Mais l'économie, ça reste, ça reste à vérifier* » (O. Bourez & A. Stache, communication personnelle, 20 novembre 2024). Par ailleurs, certaines limites d'évolutivité se manifestent, notamment pour des sites ou projets nécessitant des solutions hybrides combinant modularité et construction classique.

Cependant, les modules jouent un rôle central dans la stratégie de conception du projet. Ils ne se limitent pas à être de simples éléments standardisés, mais servent de base structurante adaptable. Cette approche permet une souplesse précieuse pour agrandir ou modifier les bâtiments, par exemple en facilitant la réalisation d'extensions futures. Pour rester pertinentes, les solutions modulaires doivent toutefois s'adapter aux évolutions des besoins locaux, qu'il s'agisse de nouvelles exigences réglementaires, de contraintes spécifiques au site, ou de demandes des usagers. Cette pensée est développée par Mr. Stache : « *Il y a aussi une dimension qu'on n'a peut-être pas anticipée mais qui est l'accès de chantier sur lequel on se questionne beaucoup pendant le chantier maintenant et qui a été absolument impossible avec des volumes* » (O. Bourez & A. Stache, communication personnelle, 20 novembre 2024).

Ces défis et adaptations illustrent la nécessité d'un équilibre constant entre les avantages de la modularité et les spécificités inhérentes à chaque projet. Modul R démontre ainsi que la flexibilité et l'innovation peuvent coexister avec les contraintes d'un cadre préfabriqué, ouvrant la voie à des perspectives prometteuses dans le domaine de la construction.

8. Suivi et validation des choix

Une fois les écoles construites, une phase d'évaluation post-construction est prévue pour mesurer l'efficacité des choix techniques et des solutions modulaires mises en place. Cette évaluation, qui s'étendra sur une année, permettra de vérifier la performance des solutions adoptées et de confirmer leur adéquation avec les objectifs du projet. Les retours d'expérience récoltés au cours de cette période seront essentiels pour identifier les ajustements nécessaires et guider les décisions dans le cadre des futurs projets modulaires. « *Puis ça donne une échelle directement parce qu'à force d'en faire, y a des ratios qui vont apparaître aussi. On avait quantifié la part de générique, la part de spécifique, Il y a aussi des choses qui ne sont pas dites génériques parce que le projet n'a pas été jusque-là, mais une fois qu'on les a dessinés, cela pourrait le devenir.* », nous rapporte Mr. Stache (O. Bourez & A. Stache, communication personnelle, 20 novembre 2024).

Par ailleurs, la modélisation continue joue un rôle clé dans la recherche et le perfectionnement du projet. Le chercheur peut contribuer en modélisant les modules avec des niveaux de détails adaptés, afin de tester et d'analyser les interactions entre la structure, les systèmes techniques et

les usages. Une collaboration avec des partenaires clé dans le domaine de la préfabrication, pourrait permettre d'approfondir l'intégration du BIM dans le processus. Cette démarche vise à enrichir la conception modulaire et à optimiser les processus pour les projets à venir, tout en assurant une meilleure gestion des données et une plus grande précision dans la mise en œuvre des choix techniques.

4.2 Analyse et résultats de la recherche expérimentale

Ce chapitre explore la modélisation d'un module du projet numérique BIM en s'appuyant sur les directives établies dans le Vade-Mecum du projet Modul R de la Fédération Wallonie-Bruxelles (FWB). Il s'agit d'une démarche méthodique qui applique les principes de la recherche qualitative à travers l'expérimentation sur Revit (Matador & KIS Studio, 2024).

L'analyse détaillera les étapes clés de cette approche, incluant la fabrication d'une grille structurelle, la création d'un inventaire réutilisable et l'organisation des modules en groupes. Elle couvrira également la simplification des correspondances entre le cahier des charges et le modèle Revit, ainsi que la détection des conflits.

En complément, le chapitre abordera les aspects de nomenclature, tant pour les coûts que pour les éléments génériques et spécifiques, tout en identifiant les éléments modélisés et leur logistique.

Cette démarche permettra d'identifier les avantages et les limites de l'approche adopté.

4.2.1 Inventaire

Le projet modul R est au deuxième niveau de préfabrication, le « préassemblage non-volumétrique ». Ce niveau comprend les unités préassemblées ne contenant pas de volume utilisable. Comme, par exemple, les fermes de toit en bois (Pan et al., s. d.). Dans ce projet, les éléments préfabriqués sont des composants comme la toiture, le sol, les éléments verticaux, ... mais ces éléments ne forment pas de volume avant d'arriver sur site. Chacun de ces éléments est construit hors-site et assemblé sur chantier pour former les volumes du bâtiment.

L'utilisation de composants (Samarasinghe et al., 2015), est facilité par l'utilisation des familles Revit. Les familles permettent de créer des modèles standards pour chaque type d'éléments (murs, fenêtres, portes, mobiliers) que l'on retrouve dans les modules, assurant ainsi une uniformité des éléments préfabriqués dans tout le projet.

Une utilisation des types et occurrences (aussi appelé instance) permet la modification de certains éléments qui ne sont pas génériques. La famille Revit peut contenir plusieurs types. Par exemple, une famille de portes peut inclure des types de différentes largeurs ou hauteurs.

Le paramètre d'occurrence est une instance de ce type placée dans le projet. Ainsi, si vous placez trois fenêtres de même type dans le projet, vous avez trois occurrences de ce type de fenêtre.

Voici une proposition de structuration du composant "fenêtre" de Modul R de façon compatible avec le logiciel Revit (*Figure 16*).

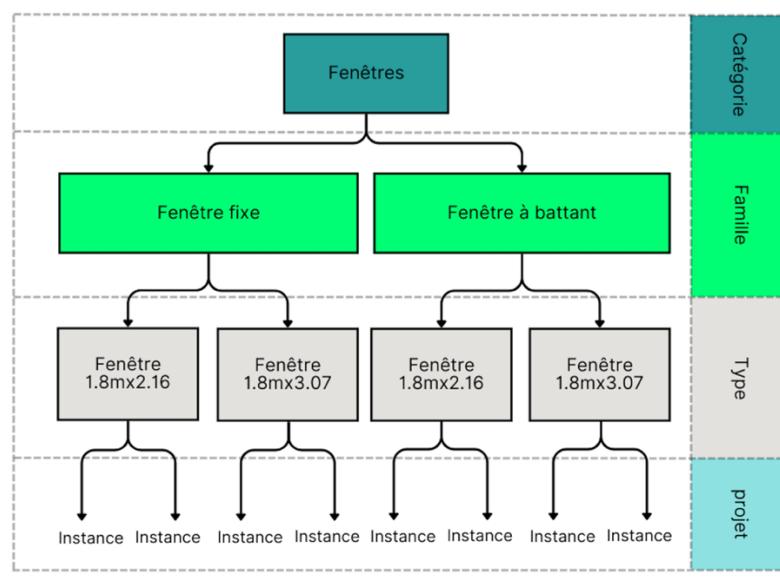


Figure 16: Schéma de la hiérarchie des informations dans Revit conçu par le chercheur.

La *Figure 17* correspond à l'inventaire qui a été établi dans le modèle sur base du document Vade-Mecum de Matador (Matador & KIS Studio, 2024). Cet inventaire comprend les différentes catégories et les différents types qui ont été modélisés dans le modèle. À chaque type, une note

d'identification a été attribuée. Ces notes reprennent les éléments suivants : Porte intérieur simple 0.73x2.04m (1), Porte extérieure simple 0.93x2.1m (2), Fenêtre 1 vantail (droit) 1.8x3m (3), Fenêtre 1 vantail – Imposte basse 1.8x3m (4), Fenêtre1 vantail 1.8x3m (5), Fenêtre 2 vantaux coulissant 1.8x3m (6), Fenêtre 1 panneau 1.8x3m (7), Fenêtre 1 vantail (droit) 1.8x2.16m (8), Fenêtre 1 vantail – Imposte basse 1.8x2.16m (9), Fenêtre 1 vantail 1.8x2.16m (10), Fenêtre 2 vantaux coulissant 1.8x2.16m (11), Fenêtre 1 panneau 1.8x2.16m (12), Poteau « U » (13), Poteau « L » gauche (14), Poteau « L » droite (15), Poutre 50x10mm (16), Mur rideau extérieur (17), Cloison intérieure (18), Mobilier bureau/rangement (19), Mobilier armoire (20), Mobilier armoire/rangement (21), Dalle de sol (22), Plancher (23) et Toiture (24).

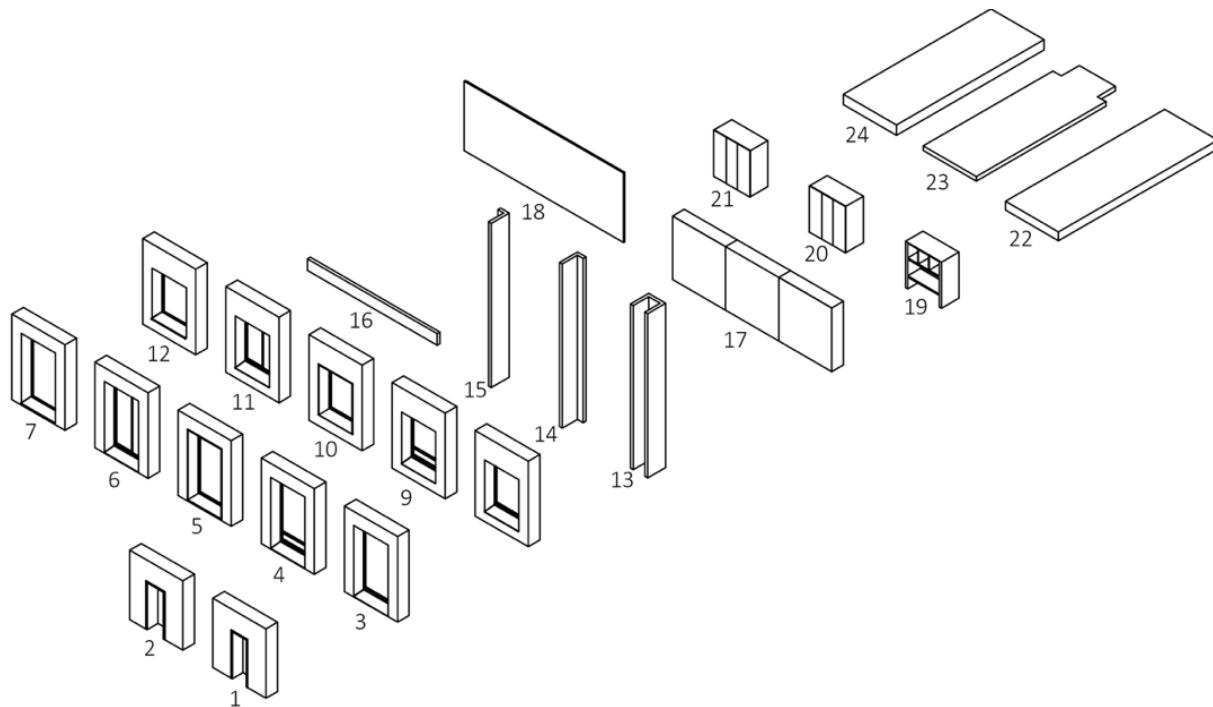


Figure 17 : Inventaire des éléments génériques modélisés par le chercheur dans Revit.

Les portes :

La *Figure 18* illustre la modélisation des portes dans Revit. Le modèle comprend deux types de portes, à savoir, une porte intérieure simple (0.73 x 2.04 m) et une porte extérieure simple (0.93 x 2.1 m).

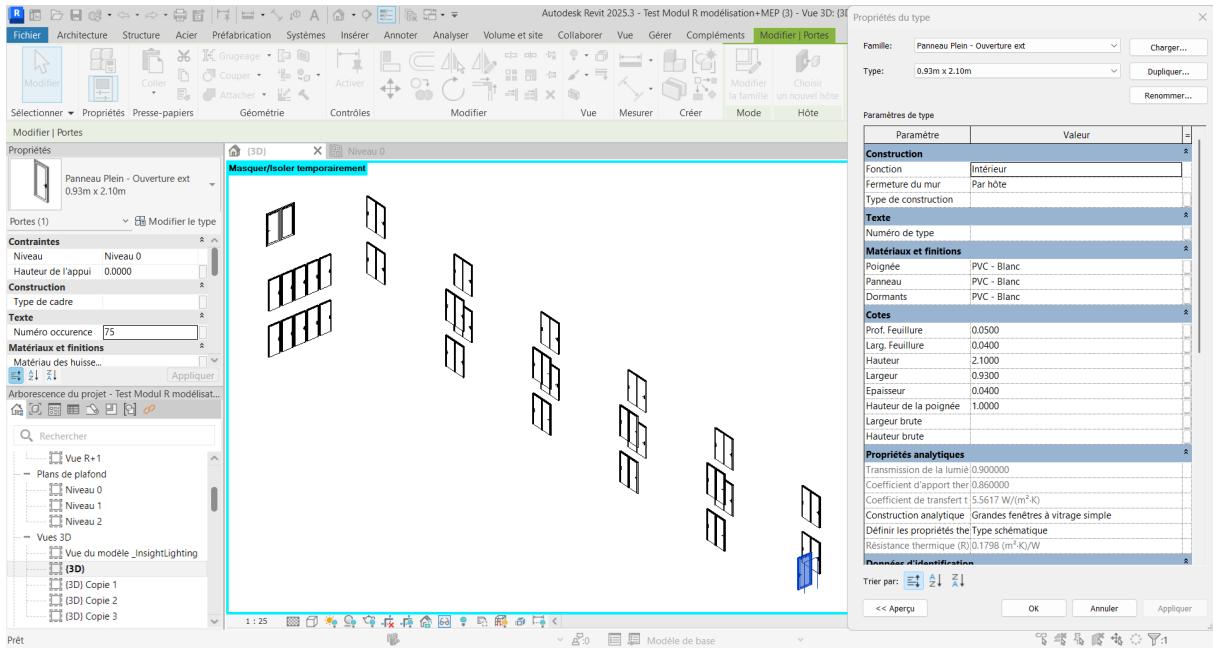


Figure 18 : Modélisation des portes par le chercheur dans Revit.

Informations intégrées :

Information d'identification :

- Numéro de type
- Numéro d'occurrence
- Quantité
- Localisation in situ

Informations géométriques :

- Largeur
- Hauteur
- Épaisseur
- Profondeur feuillure
- Largeur feuillure

Matériaux et finitions :

- Poignées
- Panneaux
- Dormants

Stratégie de modélisation :

N'ayant que peu d'informations sur les portes dans le Vade-Mecum, la modélisation des portes repose sur l'utilisation de portes standards proposées dans Revit. Les deux dimensions principales identifiées dans le projet sont une porte intérieure simple (0.73 x 2.04 m) et une porte extérieure simple (0.93 x 2.1 m) (Matador & KIS Studio, 2024). Cette méthode est particulièrement pertinente, car elle exploite les familles de portes disponibles, réduisant ainsi le temps nécessaire pour créer des éléments personnalisés tout en garantissant une compatibilité avec les systèmes existants.

Les fenêtres :

La Figure 19 illustre la modélisation des fenêtres dans Revit. Le modèle comprend dix types de fenêtres, à savoir : fenêtre 1 vantail (droit) 1.8x3m, fenêtre 1 vantail – Imposte basse 1.8x3m, fenêtre 1 vantail 1.8x3m, fenêtre 2 vantaux coulissant 1.8x3m, fenêtre 1 panneau 1.8x3m, fenêtre 1 vantail (droit) 1.8x2.16m, fenêtre 1 vantail – Imposte basse 1.8x2.16m, fenêtre 1 vantail 1.8x2.16m, fenêtre 2 vantaux coulissant 1.8x2.16m, fenêtre 1 panneau 1.8x2.16m.

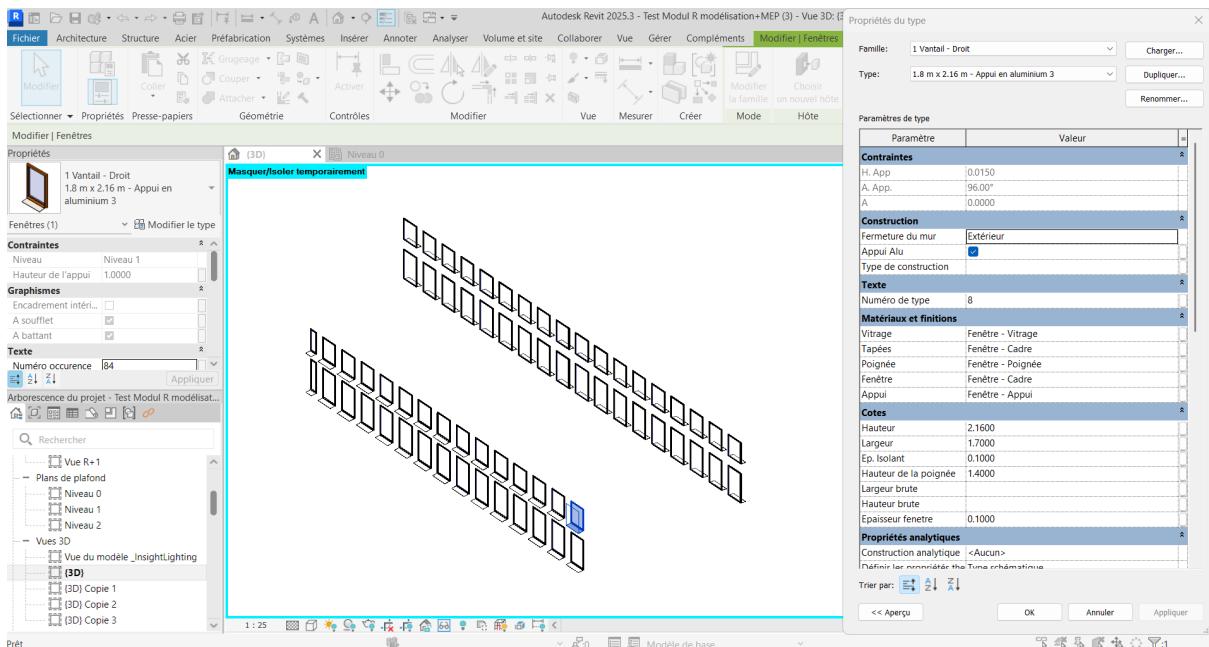


Figure 19 : Modélisation des fenêtres par le chercheur dans Revit.

Informations intégrées :

Information d'identification :

- Numéro de type
- Numéro d'occurrence
- Quantité

Localisation in situ

Informations géométriques :

- Largeur
- Hauteur
- Hauteur de la poignée
- Épaisseur fenêtre
- Épaisseur isolant

Matériaux et finitions :

- Vitrage
- Largeur
- Poignée
- Fenêtre
- Appui

Stratégie de modélisation :

Pour la modélisation des fenêtres, nous disposons des dimensions : 1.8x3m pour les fenêtres du rez-de-chaussée et 1.8x2.16m pour celles du premier étage.

Il est également notifié que les fenêtres peuvent être choisies dans une large gamme de types.

Pour cela, le chercheur a modélisé cinq types de fenêtres différentes aux dimensions demandées pour le projet Modul R. Cela permet une modification aisée des fenêtres en fonction de la demande initiale du projet.

Les colonnes

La *Figure 20* illustre la modélisation des poteaux dans Revit. Le modèle comprend trois types de colonnes, à savoir, les poteaux « U », les poteaux « L » gauche, les poteaux « L » droite.

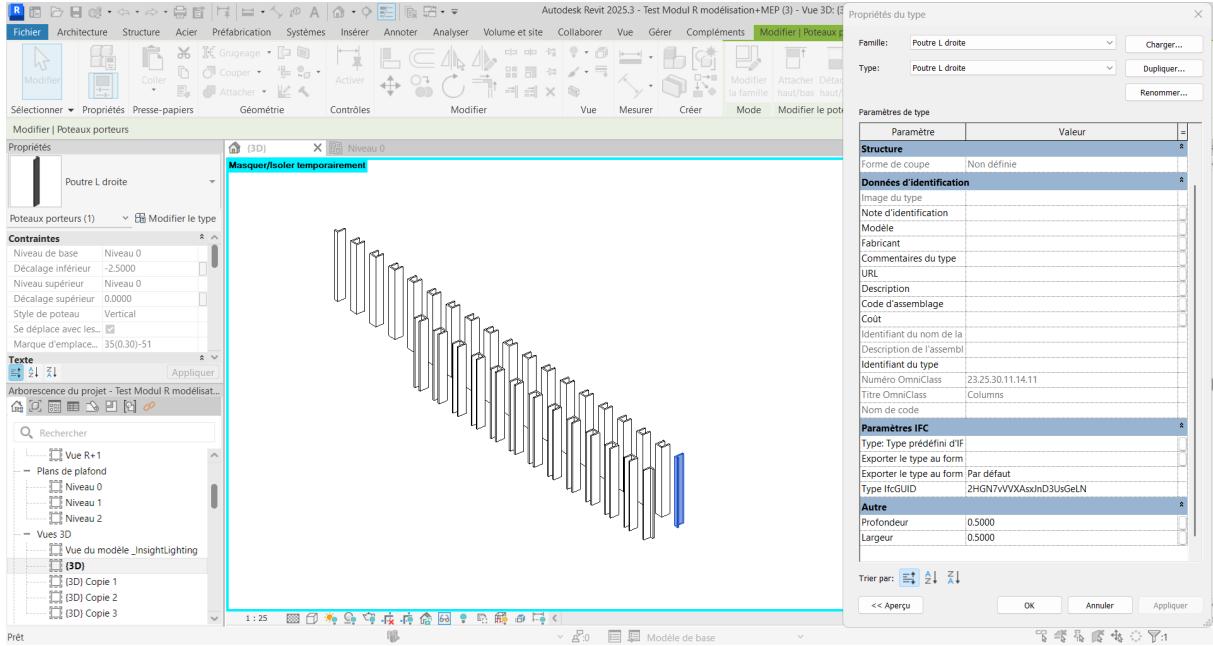


Figure 20 : Modélisation des poteaux par le chercheur dans Revit.

Informations intégrées :

Information d'identification :

- Numéro de type
- Numéro d'occurrence
- Quantité
- Localisation in situ

Informations géométriques :

- Largeur
- Hauteur
- Profondeur

Matériaux et finitions :

- Lamellé-collé

Stratégie de modélisation :

La modélisation des poteaux et poutres repose sur la création de familles dédiées, telles que des poteaux porteurs métriques. Cette méthode permet de regrouper les éléments structurels dans un

modèle partagé entre les disciplines architecturale et structurelle. En utilisant cette approche, on simplifie la coordination entre les différents intervenants du projet.

Les poutres

La *Figure 21* illustre la modélisation des poutres dans Revit. Le modèle comprend un type de poutre, à savoir, une poutre 50x10mm.

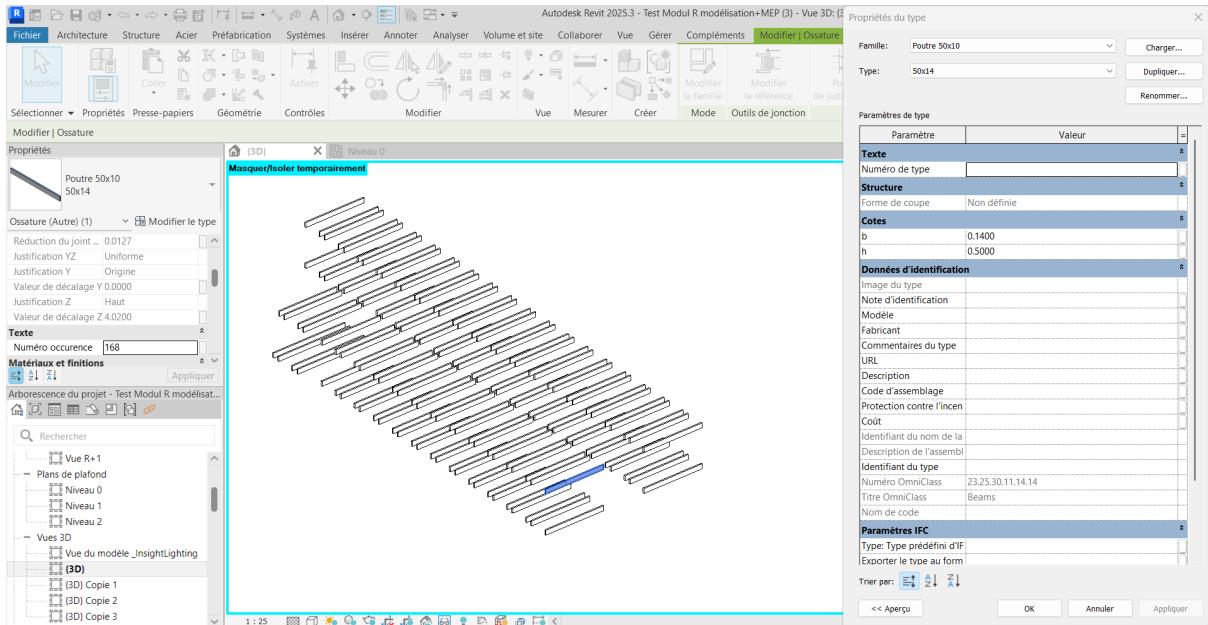


Figure 21 : Modélisation des poutres par le chercheur dans Revit.

Informations intégrées :

Information d'identification :

- Numéro de type
- Numéro d'occurrence
- Quantité
- Localisation in situ

Informations géométriques :

- Base
- Hauteur

Matériaux et finitions :

- Lamellé-collé

Stratégie de modélisation :

Les poutres ont été modélisées comme une ossature, permettant de classer les poutres dans la bonne catégorie et cela permet de les retrouver facilement. Les poutres sont toutes de section identique, une seule section de poutre a été modélisée et celle-ci a été dupliquée dans le projet.

Les murs de façade

La *Figure 22* illustre la modélisation des murs de façade dans Revit selon le Vade-Mecum (Matador & KIS Studio, 2024). Le modèle comprend un type de murs-rideaux, à savoir, le mur rideau extérieur.

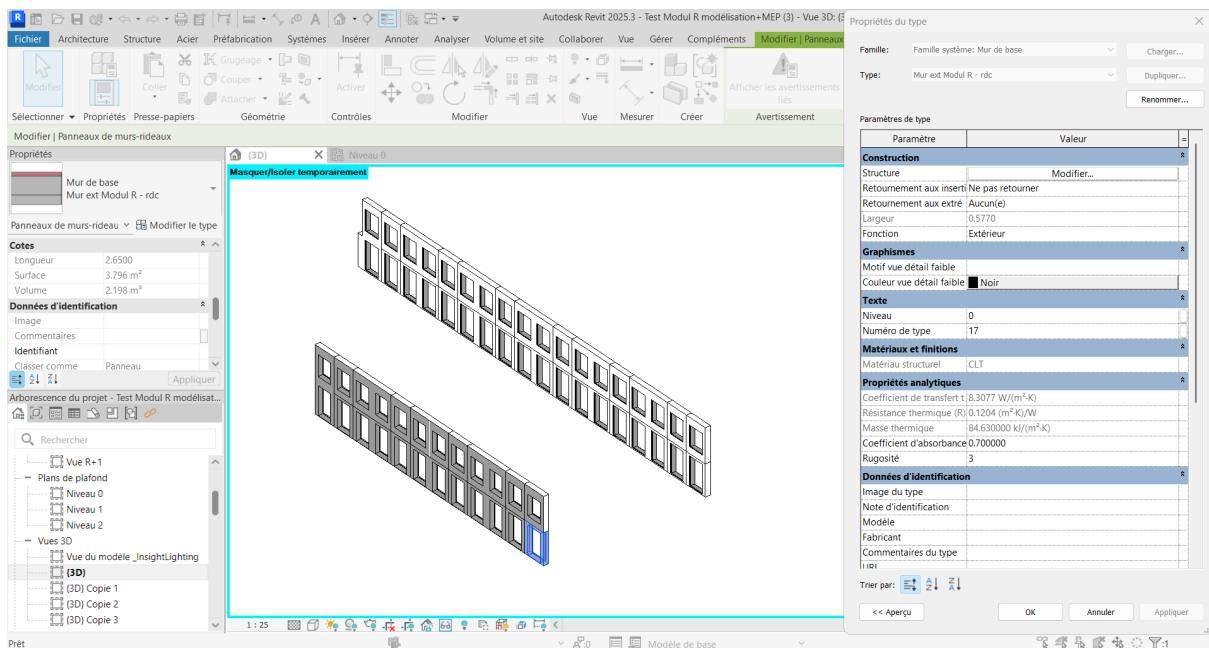


Figure 22 : Modélisation des mur-rideau par le chercheur dans Revit.

Informations intégrées :

Information d'identification :

- Numéro de type
- Numéro d'occurrence
- Quantité
- Localisation in situ

Informations géométriques :

- Hauteur
- Longueur
- Largeur

Matériaux et finitions :

Panneau CLT (160mm), pare vapeur, fibre de bois (340mm) pare pluie, parement (brique 210x100x65mm)

Stratégie de modélisation :

Les murs de façade ont été modélisés comme mur-rideau permettant de comptabiliser le nombre de modules préfabriqués utilisés par étage dans le projet modélisé. Cependant, cette méthode ne permet pas de modéliser les pieds-droits, linteaux et allèges. Mais l'identification du nombre d'éléments indispensables pour la fabrication de la façade est assez simple.

Deux autres méthodes ont été testées pour la réalisation de ces murs. La première consiste en un mur générique mais elle ne permet pas de voir le nombre d'éléments indispensables. La seconde était un groupe de murs mais cette méthode est imprécise bien que permettant de modéliser les pieds-droits, le linteau et l'allège.

Les murs pignon et les cloisons

La *Figure 23* illustre la modélisation des murs génériques dans Revit. Le modèle comprend deux types de mur générique, à savoir, les murs rideau extérieur et les cloisons intérieures.

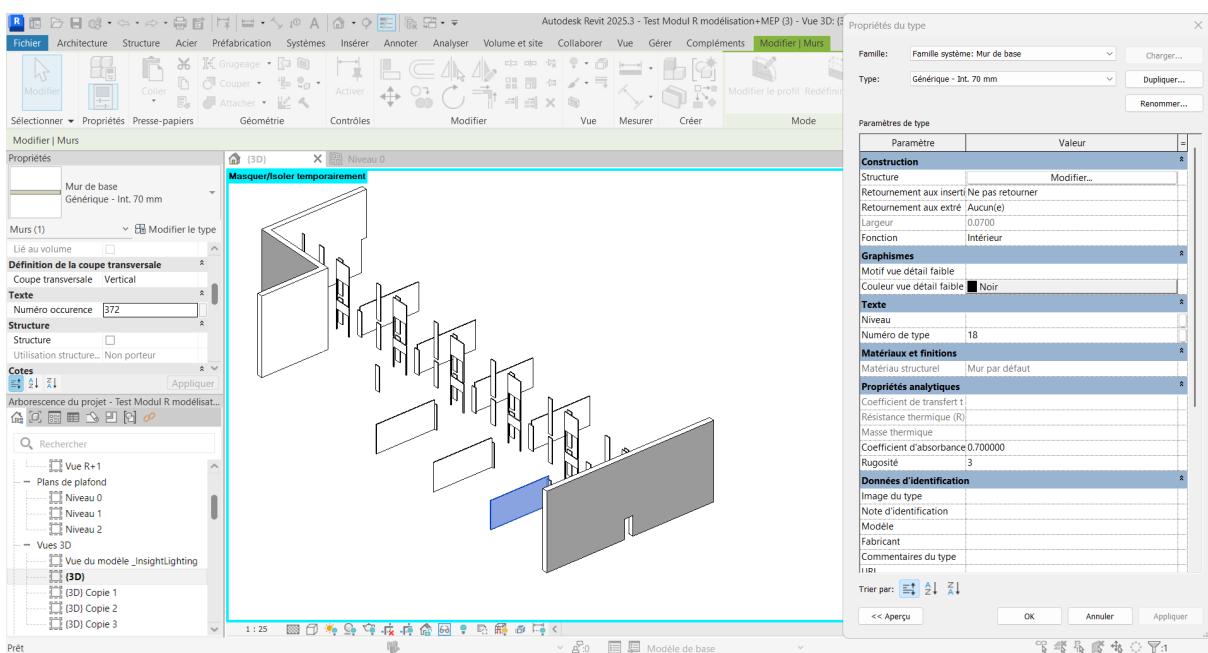


Figure 23 : Modélisation des murs par le chercheur dans Revit.

Informations intégrées :

Information d'identification :

- Numéro de type
- Numéro d'occurrence
- Quantité
- Localisation in situ

Informations géométriques :

- Hauteur
- Longueur
- Largeur

Matériaux et finitions :

Mur extérieur : Panneau CLT (160mm), pare vapeur, fibre de bois (340mm) pare pluie, parement (brique 210x100x65mm)

Cloison en plâtre

Stratégie de modélisation :

Les murs pignon et les cloisons ne sont pas génériques pour le moment et ne sont donc pas préfabriqués en usine bien que ces premiers aient la même composition que les murs de façade (à la seule différence que ceux-ci ne sont pas porteurs).

Ils ont donc été modélisés en tant que mur générique car ne doivent pas être comptabilisés pour être préfabriqués en usine. Cela rend le processus de modélisation plus fluide.

Le mobilier

La *Figure 24* illustre la modélisation des meubles dans Revit. Le modèle comprend trois types de mobilier, à savoir, le mobilier bureau/rangement, le mobilier armoire et le mobilier armoire/rangement.

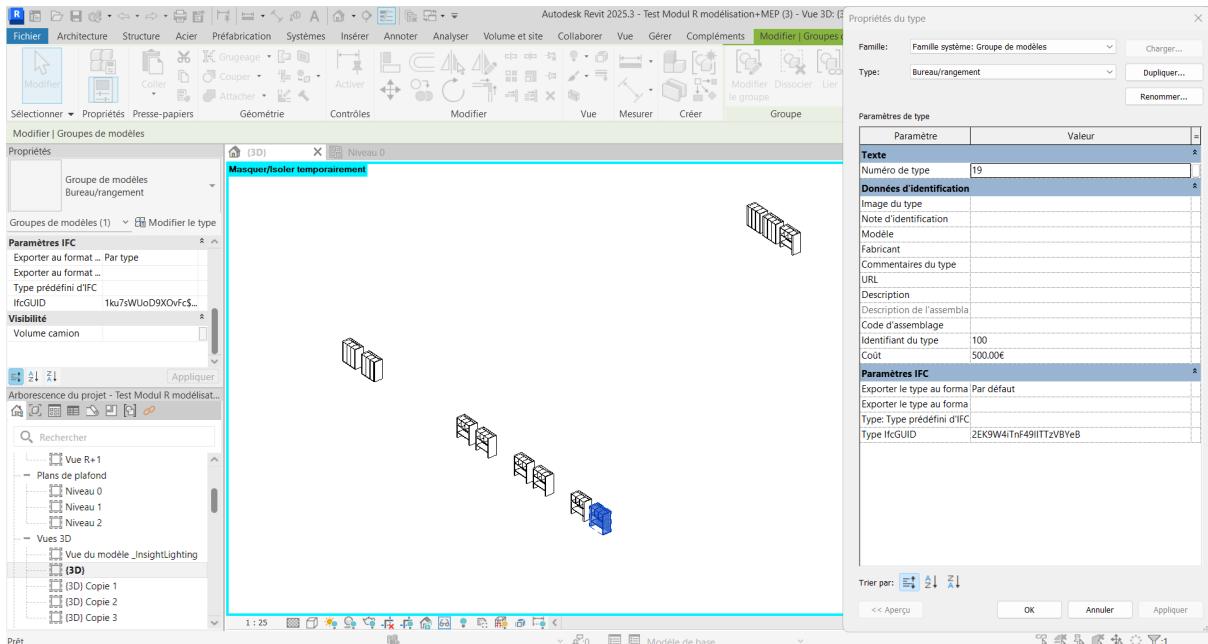


Figure 24 : Modélisation du mobilier par le chercheur dans Revit.

Informations intégrées :

Information d'identification :

- Numéro de type
- Numéro d'occurrence
- Quantité
- Localisation in situ
- Coût

Matériaux et finitions :

- Bois

Stratégie de modélisation :

Le mobilier dans le projet est modélisé pour remplir les espaces définis entre les poteaux. Les dimensions sont standardisées afin d'assurer une adaptation facile aux modules de construction. Trois exemples de mobilier (bureau, armoire, rangement) ont été créés dans Revit pour démontrer la simplicité et la rapidité de placement dans les pièces.

Les dalles de sol

La *Figure 25* illustre la modélisation des dalles de sol dans Revit. Le modèle comprend un type de dalle, à savoir, la dalle de sol Modul R.

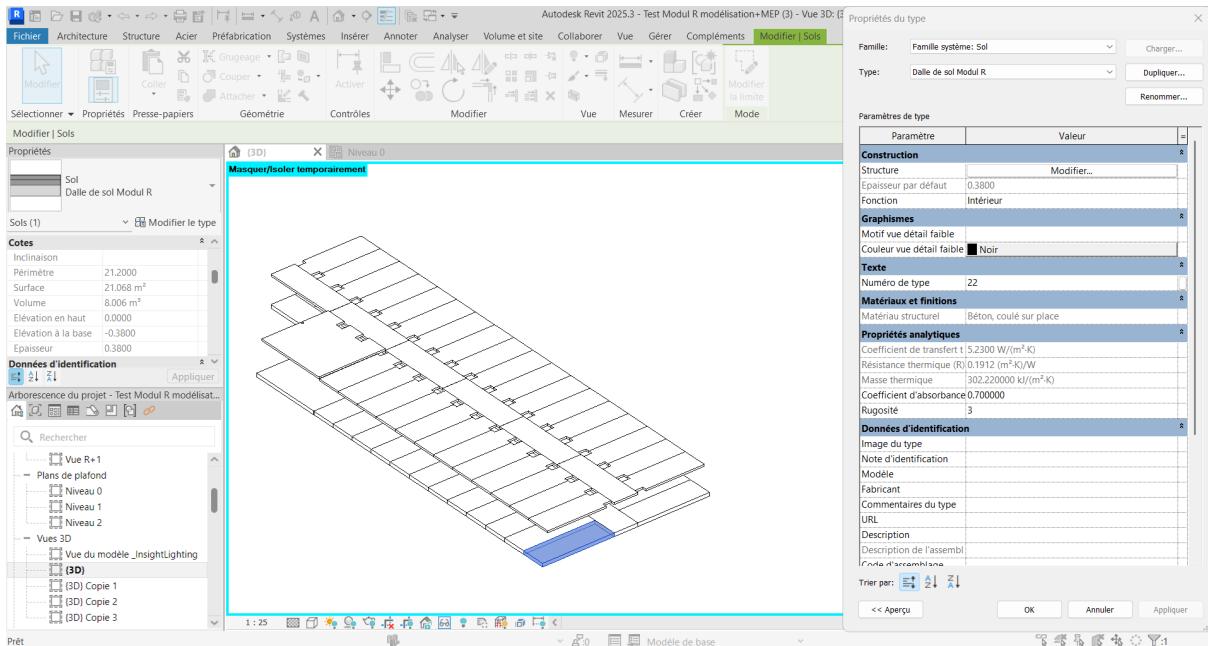


Figure 25 : Modélisation des dalles de sol par le chercheur dans Revit.

Informations intégrées :

Information d'identification :

- Numéro de type
- Numéro d'occurrence
- Quantité
- Localisation in situ

Information géométrique :

- Périmètre
- Volume
- Surface
- Épaisseur

Matériaux et finitions :

Linoleum (4mm), Egaline (3mm), Chape (73mm), Laine minérale (100mm), Radier béton (200mm)

Stratégie de modélisation :

La dalle de sol spécifique au projet Modul R a été modélisée dans Revit comme un simple sol contenant les matériaux et finitions décrits dans le Vade-Mecum (Matador & KIS Studio, 2024).

Les planchers

La *Figure 26* illustre la modélisation des planchers dans Revit. Le modèle comprend un type de plancher, à savoir, le plancher Modul R.

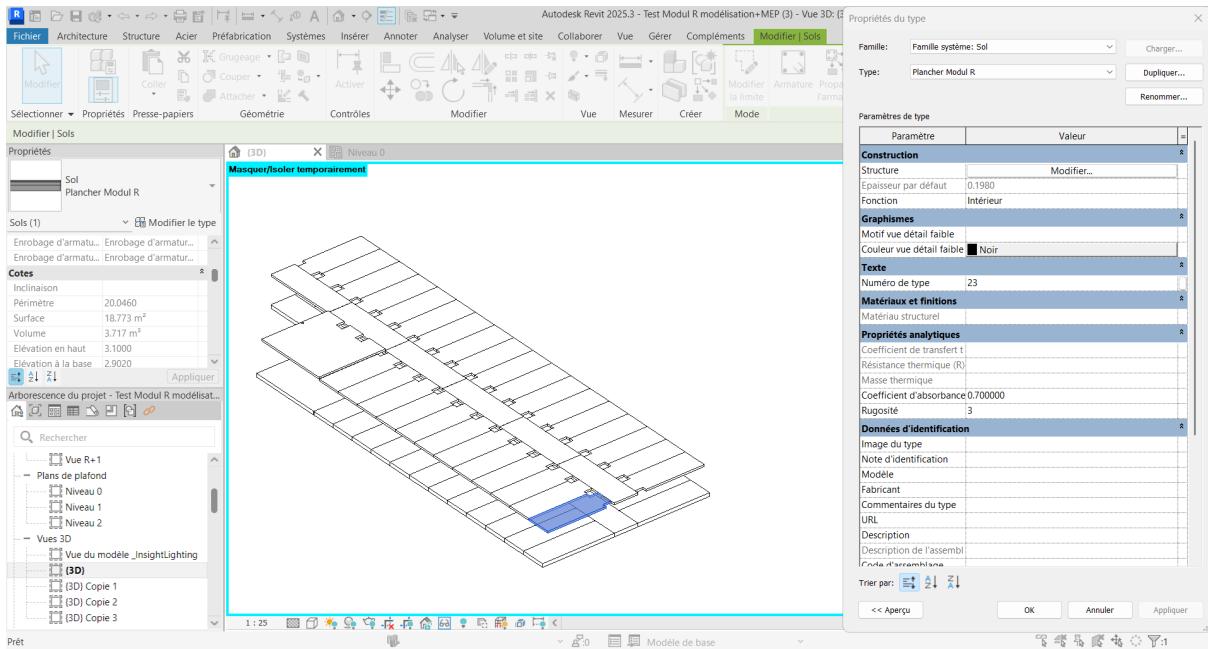


Figure 26 : Modélisation des planchers par le chercheur dans Revit.

Informations intégrées :

Information d'identification :

- Numéro de type
- Numéro d'occurrence
- Quantité
- Localisation in situ

Information géométrique :

- Périmètre
- Volume
- Surface
- Épaisseur

Matériaux et finitions :

Fermacell, OSB (18mm), laine minérale (60mm), CLT (100mm), poutres CLT (500mm), entre les poutres laine minérale (500mm), plafond perforé

Stratégie de modélisation :

Le plancher spécifique au projet Modul R a été modélisé dans Revit comme un simple plancher contenant les matériaux et finitions décrits dans le Vade-Mecum (Matador & KIS Studio, 2024).

Les toitures

La *Figure 27* illustre la modélisation des toitures dans Revit. Le modèle comprend un type de toiture, à savoir, la toiture Modul R.

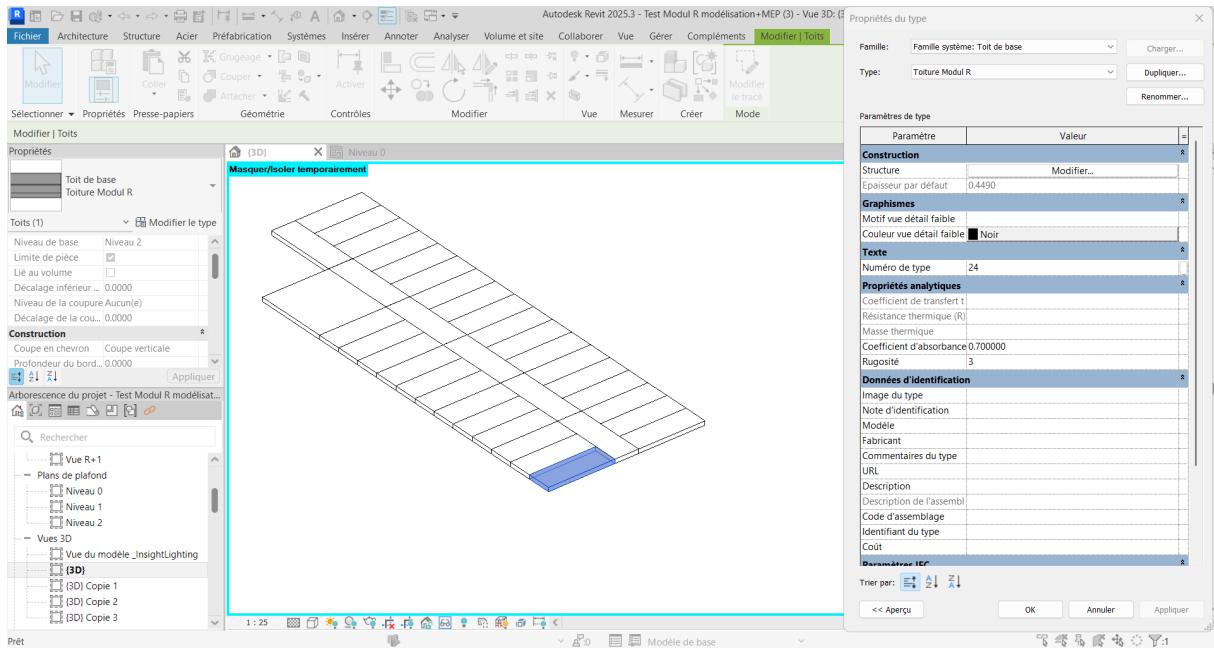


Figure 27 : Modélisation des toitures par le chercheur dans Revit.

Informations intégrées :

Information d'identification :

- Numéro de type
- Numéro d'occurrence
- Quantité
- Image
- Localisation in situ

Information géométrique :

- Épaisseur
- Volume
- Surface
- Périmètre

Matériaux et finitions :

EPDM, Laine minérale (200mm), OSB (18mm), Pente et remplissage laine minérale (+/- 140mm), CLT (90mm), Poutre LC (340x140mm), laine minérale (50mm), Panneau acoustique suspendu (12,5mm)

Stratégie de modélisation :

La toiture spécifique au projet Modul R a été modélisée dans Revit comme une simple toiture contenant les matériaux et finitions décrits dans le Vade-Mecum (Matador & KIS Studio, 2024).

4.2.2 Nomenclature

Simplification du respect des surfaces demandées dans le cahier des charges

Dans le secteur de la construction, plusieurs défis peuvent survenir lors de la conception d'un projet. L'un d'eux est de garantir que les espaces respectent les surfaces spécifiées dans le cahier des charges tout en répondant aux exigences fonctionnelles. Dans le cadre de la construction modulaire, cette tâche peut être particulièrement complexe et rébarbative en raison de la répétition des modules et de la diversité des usages. Cependant, les outils intégrés de Revit permettent de simplifier la gestion des surfaces, offrant une solution efficace pour vérifier et ajouter des modules de pièces afin de respecter les attentes du projet.

Les surfaces indiquées dans le cahier des charges jouent un rôle essentiel pour s'assurer que chaque espace remplit sa fonction. Par exemple, une salle de classe doit disposer d'une surface minimale pour accueillir un certain nombre d'élèves dans le respect des normes d'accessibilité et de confort, tandis que les espaces communs, comme les circulations ou les salles de réunion, doivent être suffisamment dimensionnés pour faciliter les flux. Les pièces techniques, telles que les locaux sanitaires, doivent également répondre à des contraintes spécifiques pour intégrer les équipements nécessaires. Respecter ces exigences garantit que le bâtiment répond à ses objectifs fonctionnels tout en respectant les normes en vigueur.

Revit permet d'associer une surface spécifique directement liée à la géométrie de la pièce ce qui permet d'obtenir des mesures précises (*Figure 28*). Les concepteurs peuvent également créer des nomenclatures qui listent toutes les pièces du projet avec leurs surfaces réelles, leur type et leur fonction, facilitant ainsi la comparaison entre les surfaces réelles et les surfaces demandées dans le cahier des charges (*Figure 29*). Revit ne propose pas d'outil de validation automatique. Il faut donc que le concepteur du projet vérifie les données par lui-même. Cela se fait assez facilement. Lorsqu'un élément est ajouté ou retiré, les informations se mettent automatiquement à jour dans la nomenclature. Cela permet d'avoir un retour direct entre les informations du projet et le modèle Revit.

Dans un projet de construction modulaire, ces outils offrent des avantages significatifs. En intégrant les surfaces directement à la géométrie, il devient possible de standardiser les dimensions tout en respectant les exigences fonctionnelles. Les nomenclatures de surfaces permettent de vérifier rapidement si le projet respecte les besoins définis dans le cahier des charges, ce qui est particulièrement utile en cas de modifications. En outre, la nomenclature des surfaces permet d'ajuster les dimensions des pièces ou des modules tout en conservant une vue d'ensemble sur l'impact global des modifications. Ce retour direct permet de créer des modules spécifiques supplémentaires en fonction de la demande dans le cahier des charges.

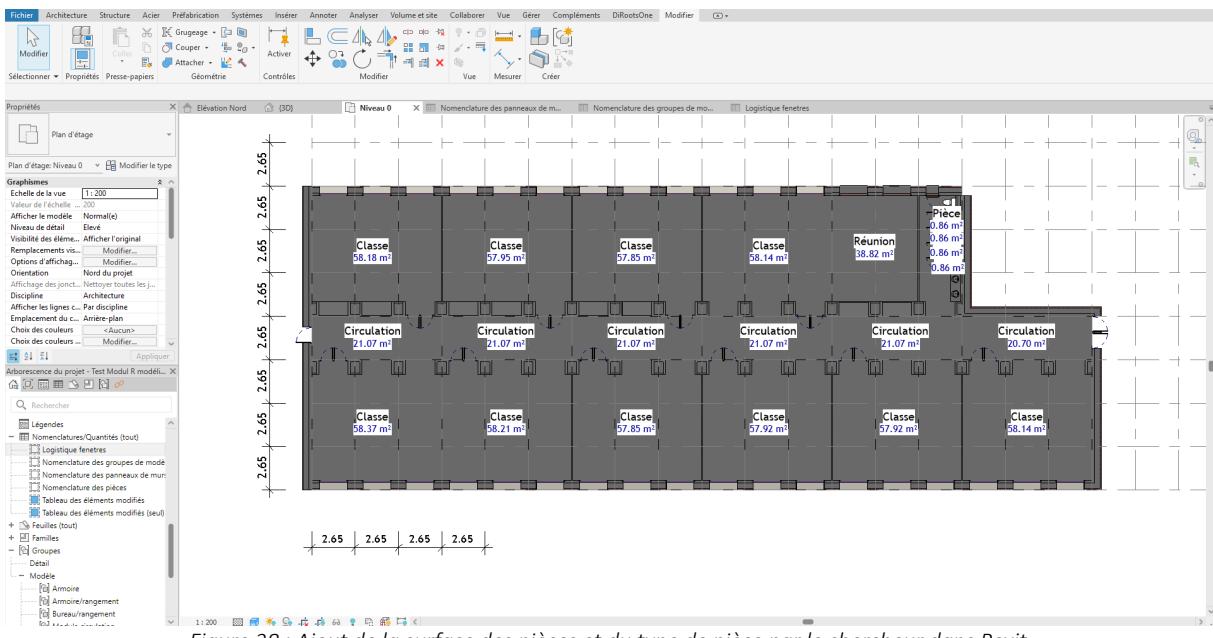


Figure 28 : Ajout de la surface des pièces et du type de pièce par le chercheur dans Revit.

< Nomenclature des pièces >		
A	B	C
Type de pièce	Surface	Surface cible
Circulation	126.03 m ²	125.00 m ²
Classe	580.52 m ²	550.00 m ²
Salle de réunion	38.82 m ²	25.00 m ²
Sanitaire	15.91 m ²	12.00 m ²
Total général:	761.29 m²	

Figure 29 : Nomenclature du type de pièce, de la surface total des types de pièces et des surface demandées dans le cahier des charges conçu par le chercheur dans Revit.

Cependant, certaines difficultés peuvent se présenter. Par exemple, certains modules préfabriqués peuvent ne pas correspondre exactement aux surfaces demandées, nécessitant la création de variantes. De plus, dans des projets complexes comportant de nombreuses pièces similaires, il peut devenir difficile de repérer les écarts lorsqu'une nomenclature est mal triée. Pour surmonter cela, Revit permet de créer des filtres dans les nomenclatures, rendant le tri et la visualisation plus efficaces. Enfin, les espaces partagés, comme les circulations ou les halls, doivent être inclus dans les calculs de surfaces globales, pour cela, ces espaces sont considérés comme des pièces dans Revit.

L'automatisation et la simplification du respect des surfaces spécifiées dans le cahier des charges apportent des bénéfices considérables au projet. Elles garantissent une précision accrue en éliminant les erreurs de calcul, permettent de gagner un temps précieux grâce à l'automatisation des vérifications et sont d'une aide non négligeable pour la prise de décision.

Estimation des coûts en temps réel à partir du modèle

Revit permet d'estimer les coûts en temps réel grâce à l'intégration des données du modèle dans des nomenclatures dynamiques. Ces nomenclatures compilent automatiquement les informations sur les éléments du projet, comme les matériaux, les modules, le mobilier et d'autres composants, pour produire une estimation financière globale. Bien que ces estimations soient approximatives, elles constituent une base pour la planification budgétaire, particulièrement dans les premières phases de conception.

Le processus d'estimation repose sur les données associées aux familles et aux types d'éléments dans le modèle. Chaque composant peut inclure des informations détaillées, telles que les quantités (longueur, surface, volume, nombre d'unités), les matériaux utilisés, ainsi que des paramètres personnalisés comme les coûts unitaires. Les nomenclatures extraites du modèle permettent de regrouper et de trier ces informations pour calculer automatiquement les coûts. Par exemple, une nomenclature peut estimer le coût total des murs en multipliant leur surface par leur prix unitaire, ou calculer les coûts des fenêtres en fonction de leur quantité et de leur tarif. L'un des principaux avantages de cette méthode est la mise à jour automatique des estimations. Toute modification dans le modèle, comme l'ajout, la suppression ou l'ajustement d'un élément, entraîne une mise à jour immédiate des calculs. Cette approche offre également une vision globale des implications financières des décisions architecturales dès les premières étapes du projet.

Cependant, l'estimation des coûts en temps réel dans Revit présente certaines limites. Le logiciel ne gère pas une base de données intégrée des prix actualisés pour les matériaux et les composants, ce qui nécessite une mise à jour manuelle des informations. Cela peut entraîner des erreurs si les données ne sont pas régulièrement actualisées. Par ailleurs, le calcul des prix de chaque matériau et leur quantité utilisée dans le projet est possible mais un calcul global du prix du projet est impossible sans utiliser d'autres outils de calcul comme un tableau Excel. Dans le cadre de cette recherche, l'objectif étant de calculer un maximum dans les nomenclatures de Revit, cela a obligé le chercheur à trouver une solution adaptée. Le calcul global des coûts est une estimation car elle se base sur le prix d'un type de module générique et non sur le prix de chaque matériau et leur quantité utilisé dans le projet (*Figure 30* et *Figure 31*). Les avantages de l'utilisation des groupes Revit pour l'architecture modulaire sera vu plus précisément dans le chapitre : « [Organisation modulaire : Groupement, duplication et mises à jour rapides](#) ». Enfin, bien que les estimations fournies par Revit soient rapides et utiles, elles ne remplacent pas l'analyse détaillée d'un économiste de la construction ou d'un logiciel spécialisé.

<Nomenclature des groupes de modèles>

A	B	C
Type	Total	Coût
Module circulation	5	40,000€
Module classe droite	1	35,000€
Module classe gauche	2	70,000€
Module classe milieu	7	245,000€
		390,000€

Figure 30 : Nomenclature d'estimation des couts introduite par le chercheur dans Revit.

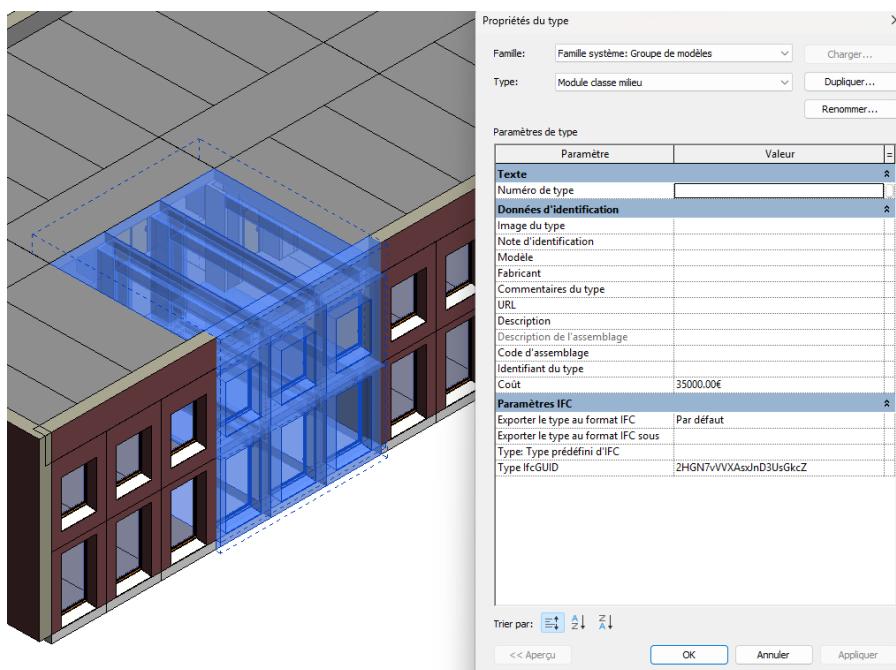


Figure 31 : Exemple de paramètre du coût d'un module de classe introduit par le chercheur dans Revit.

Optimisation du transport des éléments préfabriqués : Approche du problème tridimensionnel

L'optimisation du transport des éléments préfabriqués est un enjeu crucial dans la construction modulaire, où la logistique joue un rôle central dans l'efficacité et les coûts du projet. Revit constitue un outil permettant la modélisation précise des éléments préfabriqués et permet d'analyser leurs dimensions dans une perspective tridimensionnelle. Cette modélisation permet de calculer le volume total des composants et d'estimer le nombre de camions nécessaires pour leur acheminement vers le chantier. Toutefois, bien que ces informations soient utiles, ils ne suffisent pas à résoudre pleinement les problématiques complexes liées à l'organisation et à l'agencement des éléments dans les camions.

Grâce à Revit, chaque élément préfabriqué peut être modélisé avec ses dimensions réelles, ce qui permet d'établir des nomenclatures regroupant les informations nécessaires, comme les volumes, les poids ou les quantités. En ajoutant une marge supplémentaire pour tenir compte de l'espace vide requis pour le calage ou la manutention, ces données pourraient permettre une première évaluation efficace de la logistique globale. La *Figure 32* montre un exemple des informations logistiques disponibles pour les fenêtres.

Cependant, une fois le volume total du transport calculé, se pose le problème du "sac à dos" en logistique. Ce problème consiste à optimiser l'utilisation de l'espace limité d'un camion en respectant plusieurs contraintes, comme les dimensions intérieures du véhicule, le poids maximal autorisé et l'ordre de déchargement des éléments sur le chantier. Par exemple, il peut arriver que deux panneaux légers mais volumineux occupent tout l'espace d'un camion, bien que le poids total transporté soit loin d'atteindre la limite autorisée. Cette situation met en évidence l'importance d'un agencement optimisé pour réduire le nombre de trajets nécessaires et minimiser les coûts logistiques.

Malgré les capacités de modélisation avancées de Revit, le logiciel présente des limites dans ce domaine. Revit ne dispose pas de fonctionnalités directement intégrées pour simuler l'agencement tridimensionnel des éléments dans un camion, ni pour résoudre automatiquement des problématiques d'optimisation comme le problème du sac à dos. Les calculs d'organisation des éléments et l'évaluation des configurations les plus efficaces doivent donc être réalisés manuellement ou avec l'aide d'outils complémentaires.

Néanmoins, une nomenclature donne accès à toutes les données permettant une optimisation logistique.

<Logistique fenetres>						
A	B	C	D	E	F	G
Famille et type	Total	Largeur	Hauteur	Epaisseur fenetre	Volume fenetre	Volume (avec espace de protection)
1 Vantail - Droit: 0.75 m x 2.16 m - Appui en aluminium 4	3	0.75	2.16	0.10	0.162	0.972
1 Vantail - Droit: 0.75 m x 3.07 m - Appui en aluminium 3	3	0.76	3.07	0.10	0.23332	1.39992
1 Vantail - Droit: 1.8 m x 2.16 m - Appui en aluminium 3	43	1.70	2.16	0.10	0.3672	31.5792
1 Vantail - Droit: 1.8 m x 3.0 m - Appui en aluminium 2	42	1.70	3.00	0.10	0.51	42.84
1 Vantail - Imposte basse: 2.16m x 1.7m 2	1	1.70	2.16	0.10	0.3672	0.7344
1 Vantail - Imposte basse: 3m x 1.7m	2	1.70	3.00	0.10	0.51	2.04
1 Vantail: 2.16 x 1.7 m	1	1.70	2.16	0.10	0.3672	0.7344
1 Vantail: 3 x 1.7 m	1	1.70	3.00	0.10	0.51	1.02
2 Vantaux coulissants - Droits: 2.16m x 1.7m	1	1.70	2.16	0.10	0.3672	0.7344
2 Vantaux coulissants - Droits: 3m x 1.7m	1	1.70	3.00	0.10	0.51	1.02
WT-1 panneau: 2.16 x 1.7 m	1	1.70	2.16	0.10	0.3672	0.7344
WT-1 panneau: 3 x 1.7m	1	1.70	3.00	0.10	0.51	1.02
Total général: 100						84.82872

Figure 32 : Nomenclature de fenêtre contenant le volume des fenêtres et le volume total des fenêtres comprenant les protections pour le transport conçu par le chercheur dans Revit.

Calcul et suivi des éléments génériques et spécifiques dans une nomenclature

Pour organiser et visualiser les résultats, une nomenclature des éléments génériques et modifiés a été générée dans Revit. Cette nomenclature regroupe les informations suivantes pour chaque élément modélisé (Figure 33) :

- **Catégorie** : par exemple, fenêtre
- **État de modification** : coché ou non.
- **Total** : le nombre total d'éléments.
- **Image** : une image associée montrant les modifications apportées.

Une expérience sur le projet Modul R par le chercheur a permis d'identifier clairement les éléments modifiés et d'évaluer l'ampleur des ajustements nécessaires. Sur un total de 124 éléments modélisés, 13 ont été modifiés, soit environ **12 % des éléments initiaux**. La majorité des modifications concernent les murs (67 %), les sols (13 %), les fenêtres (13 %) et la toiture (7 %).

L'analyse de la nomenclature a également révélé des points d'amélioration pour les futures phases de conception. Par exemple, il serait utile d'intégrer dès le départ des réservations génériques dans les murs et les planchers, afin de réduire le nombre de modifications manuelles nécessaires en phase de détection des conflits.

Tableau des éléments modifiés			
Catégorie	Type	Etat de modification	Total
Appareils sanitaires			
Appareils sanitaires	Toilette	Non	10
Fenêtres			
Fenêtres	Fenêtre 1 vantail (droit) 0.75x2.16m	Oui	1
Fenêtres	Fenêtre 1 vantail (droit) 0.75x3m	Oui	1
Fenêtres	Fenêtre 1 vantail (droit) 1.8x2.16m		32
Fenêtres	Fenêtre 1 vantail (droit) 1.8x3m		32
Mobilier			
Mobilier	Mobilier casier armoire		1
Mobilier	Mobilier casier armoire		1
Mobilier	Mobilier casier armoire		1
Mobilier	Mobilier casier armoire		1
Mobilier	Mobilier casier armoire		1
Mobilier	Mobilier casier armoire		1
Mobilier	Mobilier casier armoire		1
Mobilier	Mobilier casier armoire		1
Modèles génériques			
Modèles génériques	poutre U	Non	2
Modèles génériques	poutre U	Non	1
Murs			
Murs	Acrotère	Non	12
Murs	Cloison intérieur plâtre		10
Murs	Cloison intérieure	Non	106
Murs	Mur ext Modul R		4
Murs	Mur rideau extérieur r+1		10
Murs	Mur rideau extérieur rdc		10
Ossature			
Ossature	Poutre 50x10mm	Non	132
Panneaux de murs-rideaux			
Panneaux de murs-rideaux	Acrotère		30
Panneaux de murs-rideaux	Mur ext Modul R - r+1		30
Portes			
Portes	Porte extérieure simple 0.93x2.1m		3
Portes	Porte intérieur simple 0.73x2.04m		50
Poteaux porteurs			
Poteaux porteurs	Colonne U		14
Poteaux porteurs	Poteau « L » droite		1
Poteaux porteurs	Poteau « L » gauche		2
Poteaux porteurs	Poteau « U »		15
Sols			
Sols	Dalle de sol		37
Sols	Plancher	<multiples>	47
Toits			
Toits	Toiture		37
Total général: 637			

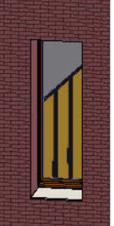
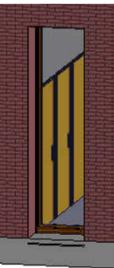
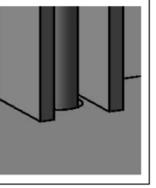
Tableau des éléments modifiés (seul)				
Catégorie	Etat de modification	Type	Total	Image
Fenêtres				
Fenêtres	Oui	Fenêtre 1 vantail (droit) 0.75x2.16m	1	
Fenêtres	Oui	Fenêtre 1 vantail (droit) 0.75x3m	1	
Sols				
Sols	Oui	Plancher	1	

Figure 33 : Tableau des éléments modélisés (à gauche) et tableau de éléments modifiés (à droite).

4.2.3 Fabrication d'une grille structurelle 2.65x2.65m pour la conception modulaire

La grille structurelle de 2.65x2.65 mètres joue un rôle central dans la conception modulaire en assurant une standardisation et une coordination efficaces des éléments préfabriqués. Cette grille constitue un cadre géométrique régulier, facilitant la conception, le positionnement et l'assemblage des différents composants d'un projet. Elle sert également de grille structurelle car les poteaux sont placés à intervalle régulier de 2,65m (*Figure 34*). Ces dimensions spécifiques ont été choisies pour répondre à des contraintes pratiques, comme l'optimisation des modules préfabriqués, l'adaptation au transport en camions standards, et la simplification de l'assemblage sur le chantier.

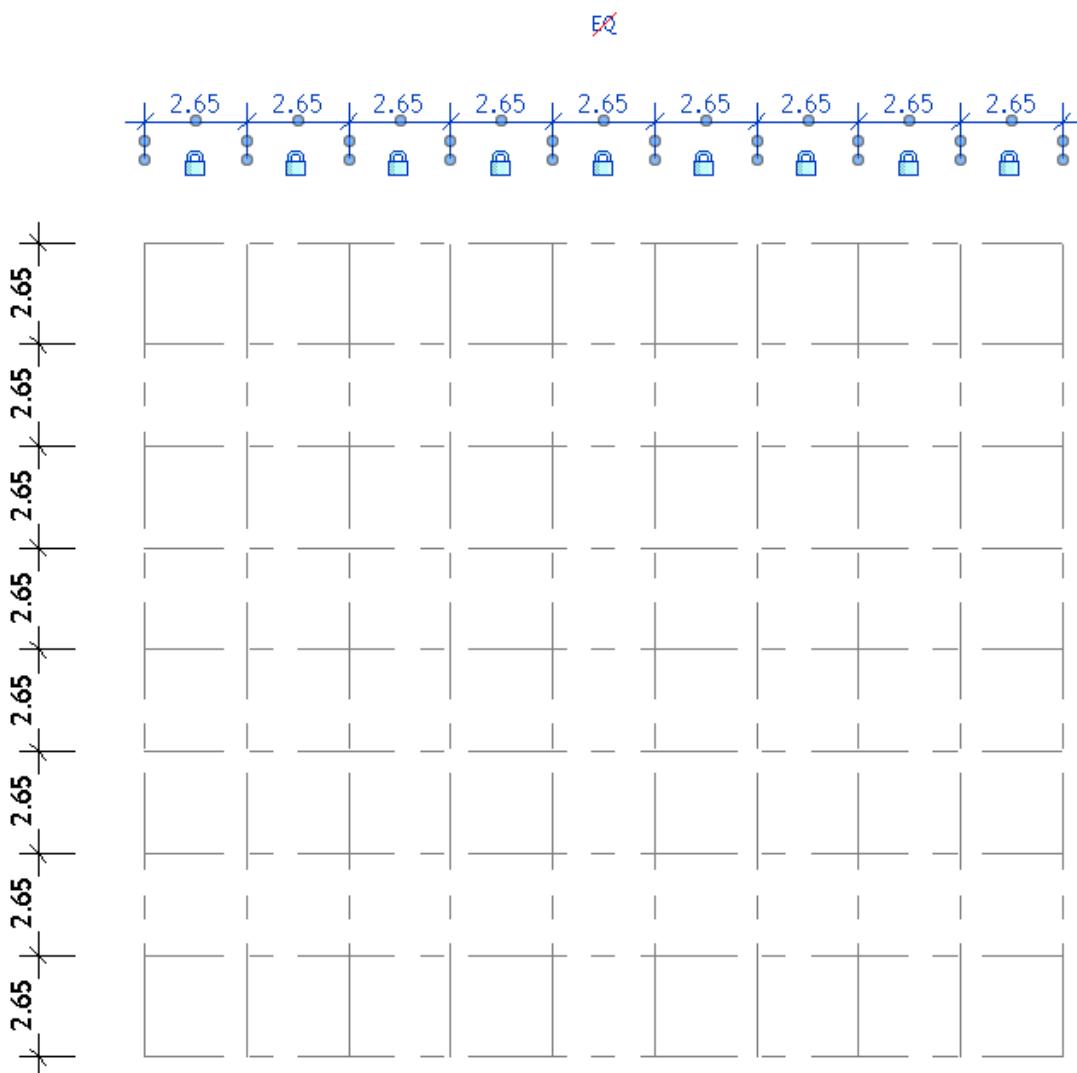


Figure 34 : Création d'une grille de 2,65x2,65m par le chercheur dans Revit.

L'un des principaux avantages de cette grille est la réduction significative du temps de modélisation. En effet, les concepteurs peuvent utiliser la grille comme repère pour placer rapidement les composants. Par exemple, un module de classe peut être conçu en moins de 30 minutes grâce à cette méthode standardisée (*Figure 35*). De plus, cette uniformité garantit une cohérence des projets, particulièrement pour des constructions répétitives ou nécessitant une préfabrication importante. Cette grille favorise également une collaboration efficace entre les équipes de conception, d'ingénierie et de construction, en fournissant un cadre commun et clair. Dans Revit, la mise en œuvre d'une telle grille est intuitive. Elle peut être créée en utilisant l'outil de grilles pour définir des lignes espacées de 2.65 mètres dans les directions X et Y.

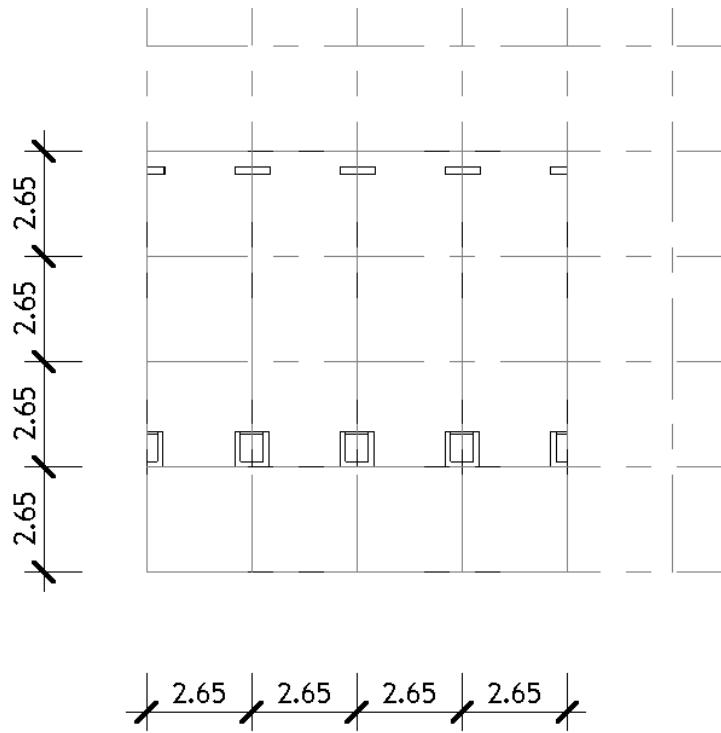


Figure 35 : Modélisation du plan de base d'une école Modul R par le chercheur dans Revit.

Cependant, malgré ses nombreux avantages, cette approche présente certaines limitations. Par exemple, dans des contextes où les espaces sont restreints ou les terrains irréguliers, les dimensions fixes de la grille peuvent entraîner une perte d'espace ou nécessiter des ajustements. Par ailleurs, bien que la standardisation simplifie les processus, elle peut restreindre la flexibilité architecturale. Des solutions comme l'introduction de sous-modules ou de grilles secondaires permettent de contourner ces problèmes en offrant une meilleure adaptabilité.

4.2.4 Organisation modulaire : Groupement, duplication et mises à jour rapides

L'organisation modulaire repose sur des principes de flexibilité et de réutilisation qui permettent de concevoir rapidement des bâtiments complexes à partir de modules standardisés. Dans Revit, cette approche est facilitée par des outils de groupement, de duplication et de mise à jour simultanée des éléments, optimisant ainsi la conception et la gestion des projets. Ces outils permettent non seulement de gagner du temps, mais aussi de garantir une cohérence et une uniformité dans l'ensemble des modules utilisés.

Le groupement des éléments est une base essentielle pour organiser efficacement les modules (*Figure 36*). Dans Revit, cette fonctionnalité permet de rassembler plusieurs composants, comme les murs, les planchers ou les cloisons, en une seule entité appelée "groupe". Une fois le groupe créé, il peut être réutilisé dans différents projets sans nécessiter de recréer les éléments individuellement. Par exemple, des modules types tels qu'une salle de classe, une circulation ou des sanitaires peuvent être enregistrés en tant que groupes standard et insérés rapidement dans d'autres conceptions. En plus de garantir la cohérence des dimensions, des matériaux et des propriétés des éléments, le groupement facilite également les modifications. Toute mise à jour effectuée sur un type dans un groupe est automatiquement appliquée à toutes ses instances dans le projet.

La duplication des groupes est un autre outil clé qui accélère considérablement la conception modulaire. Une fois un groupe défini, il peut être dupliqué et repositionné dans le modèle pour composer rapidement un bâtiment complet. Par exemple, un module de salle de réunion peut être dupliqué plusieurs fois pour former un ensemble de bureaux ou un espace collaboratif. Cette méthode permet non seulement de gagner du temps, mais aussi d'offrir une grande adaptabilité : chaque instance d'un groupe peut être déplacée, orientée ou ajustée pour s'adapter aux contraintes spécifiques du projet, sans affecter les autres instances (*Figure 37*).

Les mises à jour rapides des groupes constituent un atout majeur dans l'organisation modulaire. Lorsqu'un changement est nécessaire, comme l'adaptation d'un mur à de nouvelles normes ou la modification d'un matériau, il suffit de mettre à jour le type dans le groupe concerné, et ces modifications sont automatiquement répercutées sur toutes les instances du groupe dans le modèle. Ce processus est particulièrement utile pour intégrer des évolutions techniques ou des retours clients, sans perdre de temps à modifier chaque instance individuellement.

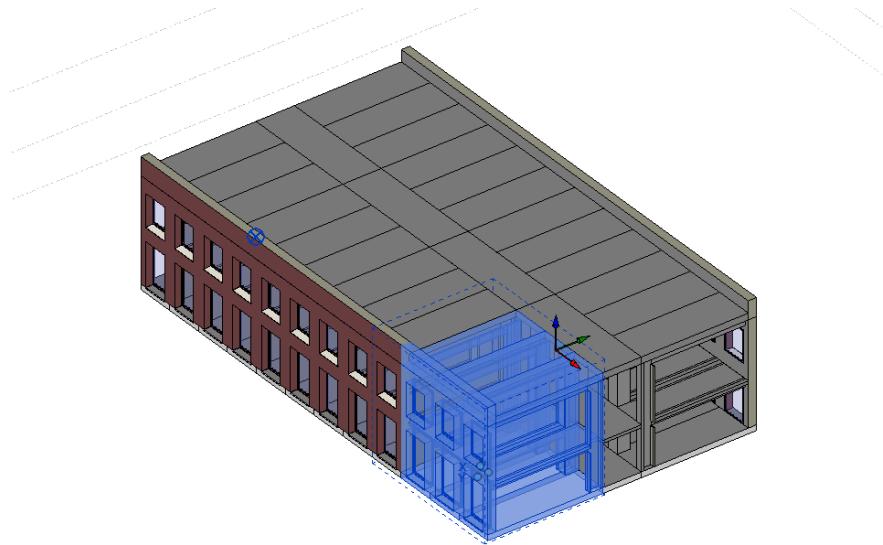


Figure 36 : Modélisation d'un groupe contenant un module de classe générique introduite par le chercheur dans Revit.

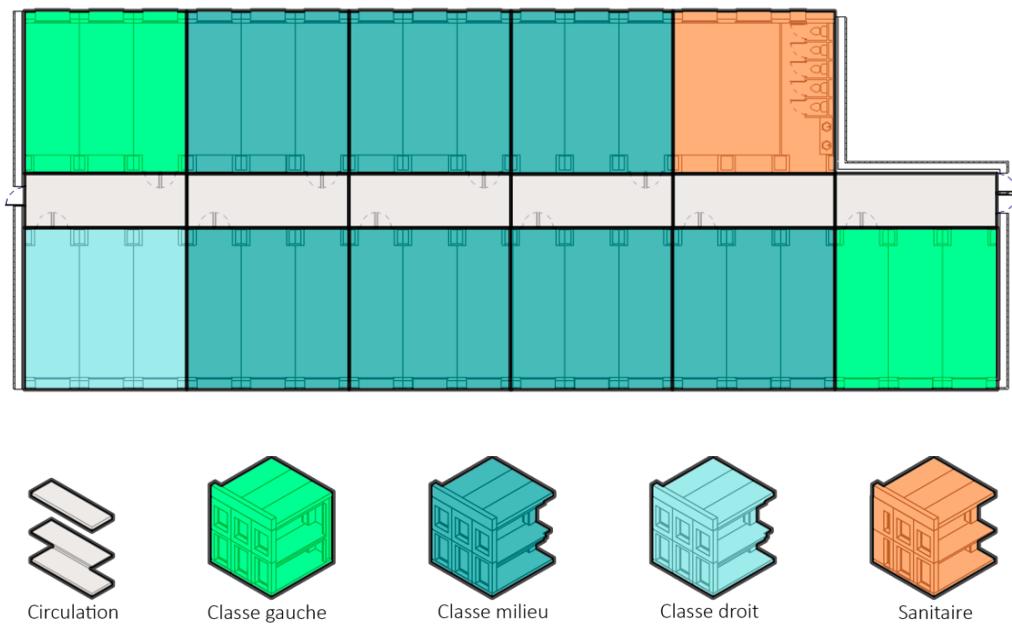


Figure 37 : Schéma des différents modules conçu par le chercheur.

Cependant, malgré leurs nombreux avantages, les outils de groupement et de duplication présentent certaines limites. Les raccords entre deux groupes peuvent poser des problèmes complexes, notamment lorsque Revit ne reconnaît pas correctement l'interconnexion de certains éléments (Figure 38).

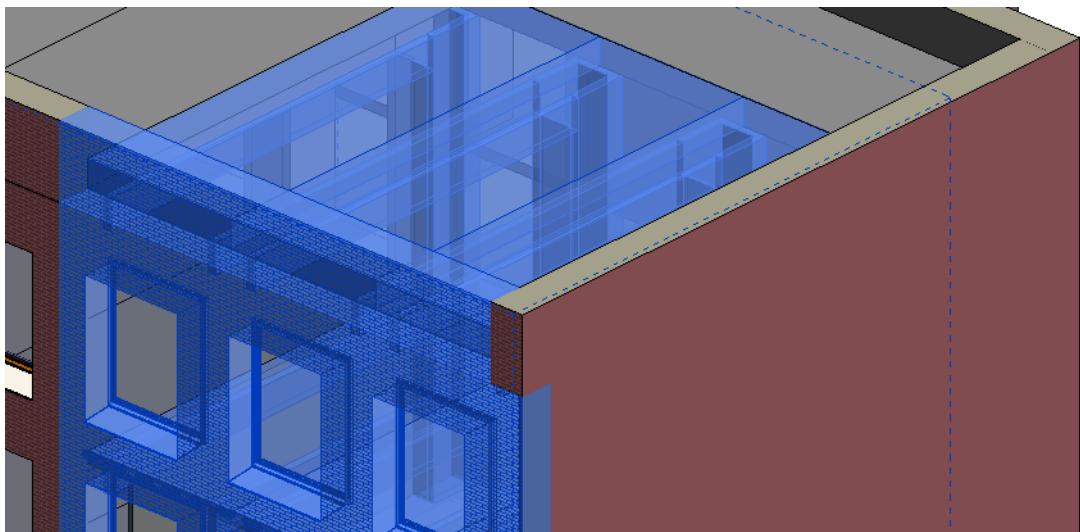


Figure 38 : Exemple d'intersection entre un groupe et un élément "mur" ajouté par le chercheur dans Revit.

De plus, bien que les mises à jour globales soient pratiques, elles peuvent devenir contraignantes si une seule instance doit être modifiée sans impacter les autres. Enfin, dans des projets de grande envergure, l'utilisation intensive de groupes peut ralentir les performances de Revit, en particulier si les groupes contiennent des éléments complexes.

Malgré ces défis, l'organisation modulaire par groupement, duplication et mises à jour rapides a un impact significatif sur la modélisation des bâtiments modulaires. Elle permet d'itérer rapidement sur différentes configurations tout en garantissant une standardisation des éléments, ce qui facilite les calculs de coûts, les analyses de surfaces. Cette méthode améliore également la collaboration entre les équipes, car elle repose sur des références communes et des standards facilement compréhensibles.

4.2.5 Détection des conflits et modification des éléments modélisés

Une expérience a été effectuée sur deux modules modélisés, une détection de conflits a été réalisée à l'aide de l'outil de détection des conflits intégré dans Revit. Ce processus a mis en évidence plusieurs collisions entre les éléments structurels et les éléments techniques, notamment :

Les canalisations traversent le plancher car celui-ci est générique et ne prend pas en compte le passage des canalisations dans les pièces sanitaires (*Figure 39* et *Figure 40*).

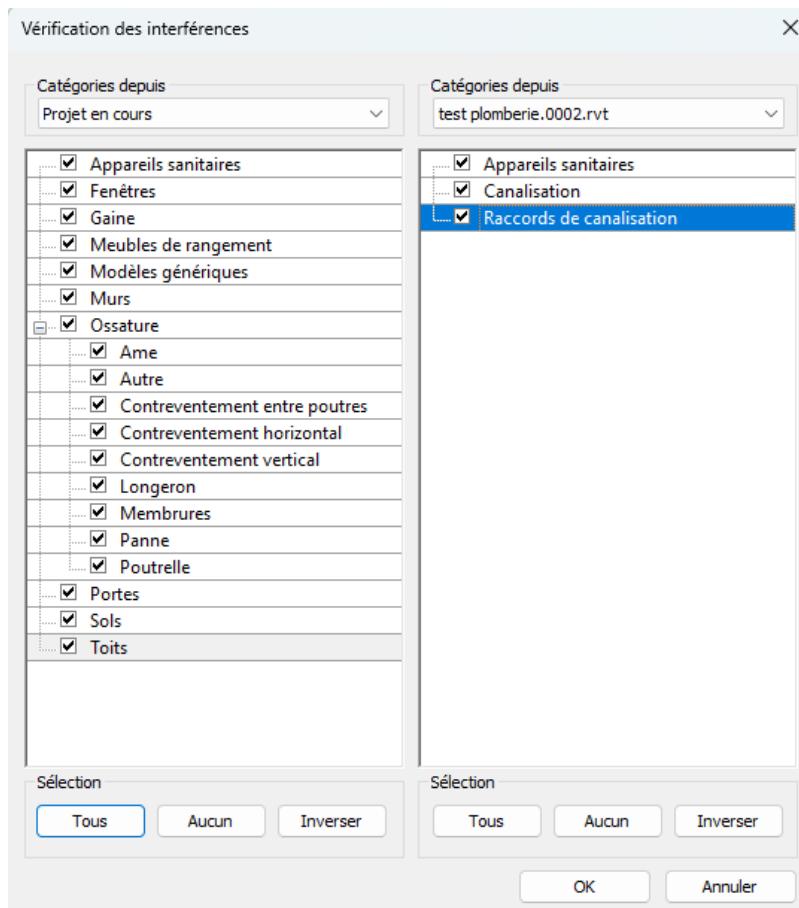


Figure 39 : Tableau des conflits entre le modèle et les gaines sanitaires.

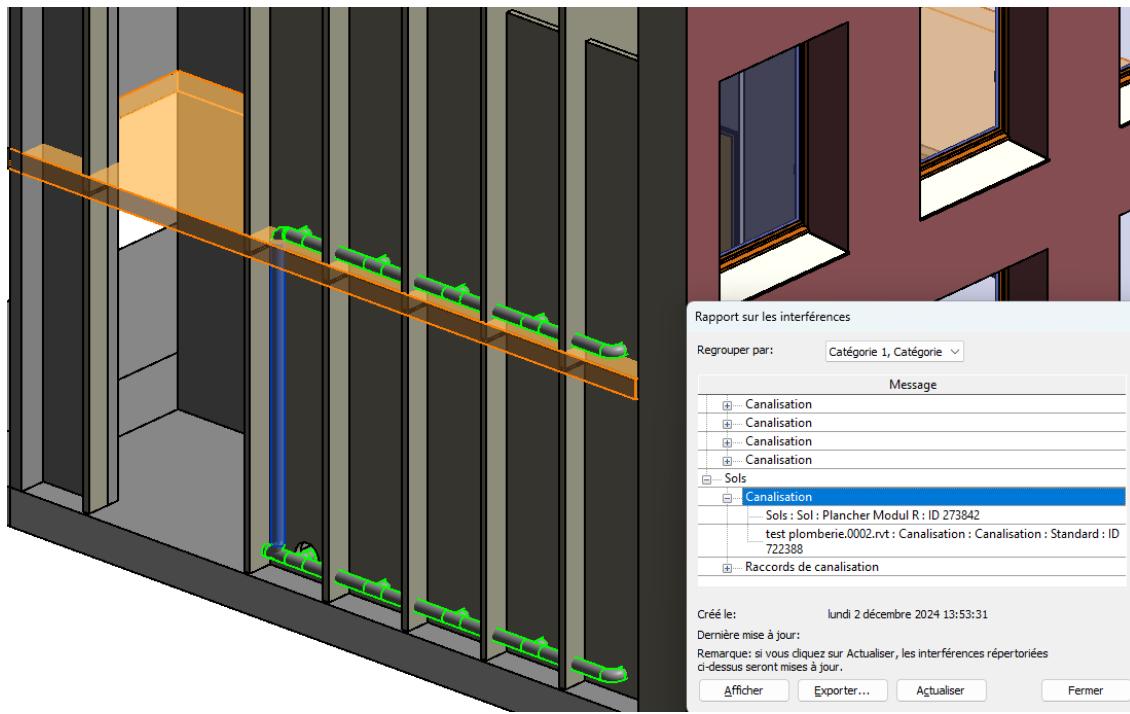


Figure 40 : Collision entre un plancher et les canalisations dans le modèle dans Revit par le chercheur.

Nous pouvons aussi voir des collisions entre des parois légères et les canalisations dans les sanitaires. Les éléments de cloisonnement léger dans les sanitaires ne sont pas compris comme des éléments standardisés selon le Vade-Mecum, mais ceux-ci pourraient le devenir grâce à cette méthode (Figure 41) (Matador & KIS Studio, 2024).

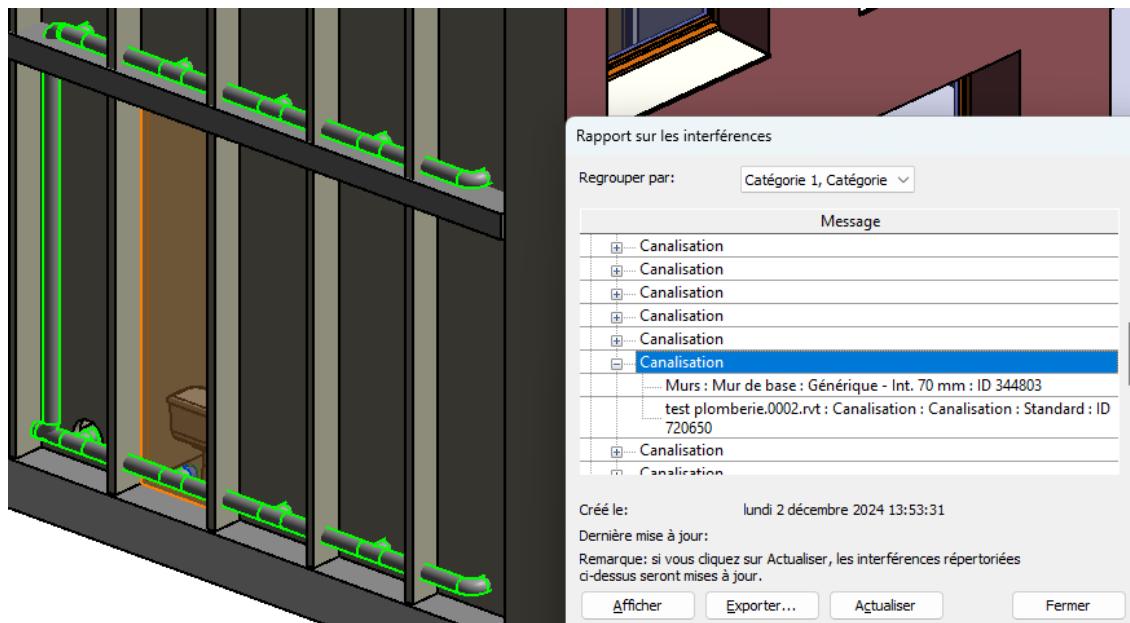


Figure 41 : Détection de collision entre une cloison légère et les canalisations dans le modèle Revit.

Nous pouvons également trouver des conflits entre le plancher d'une classe et les gaines de ventilation, le même conflit se situe entre la toiture et ces mêmes gaines de ventilation. Cette collision peut également devenir générique car elle est répétée partout dans le projet (*Figure 42*, *Figure 43* et *Figure 44*).

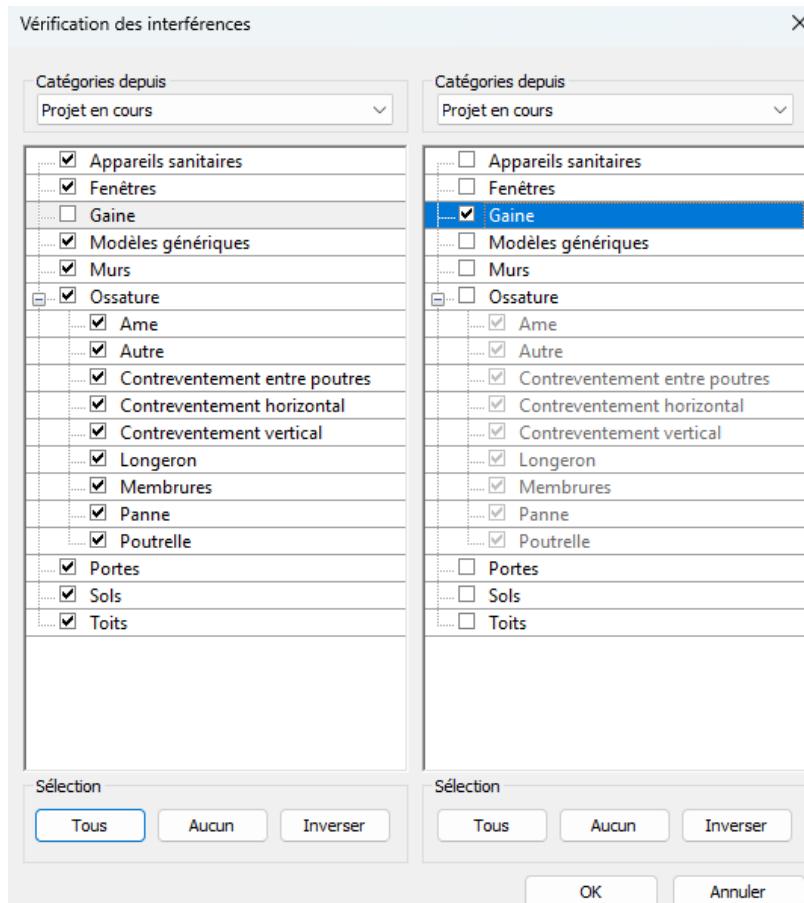


Figure 42 : Tableau des conflits entre le modèle et les gaines de ventilation dans Revit.

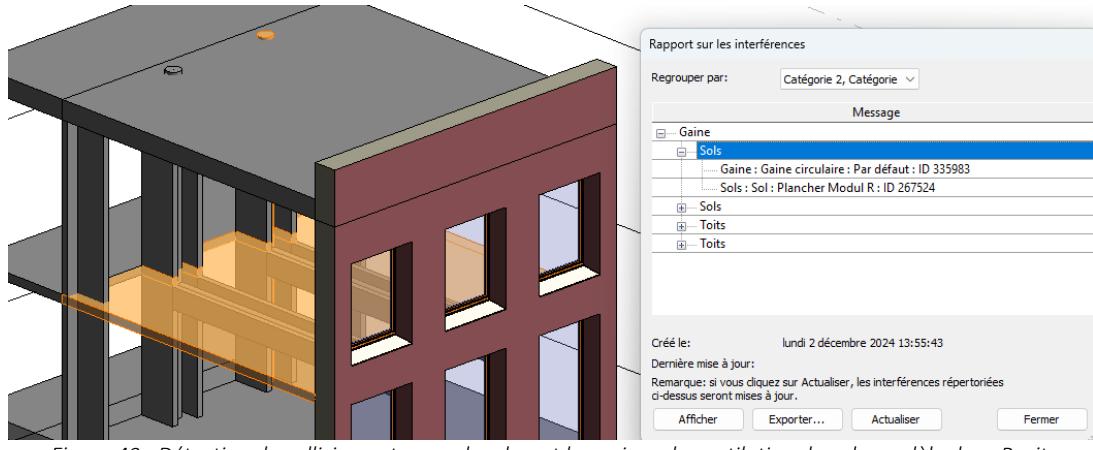


Figure 43 : Détection de collision entre un plancher et les gaines de ventilation dans le modèle dans Revit.

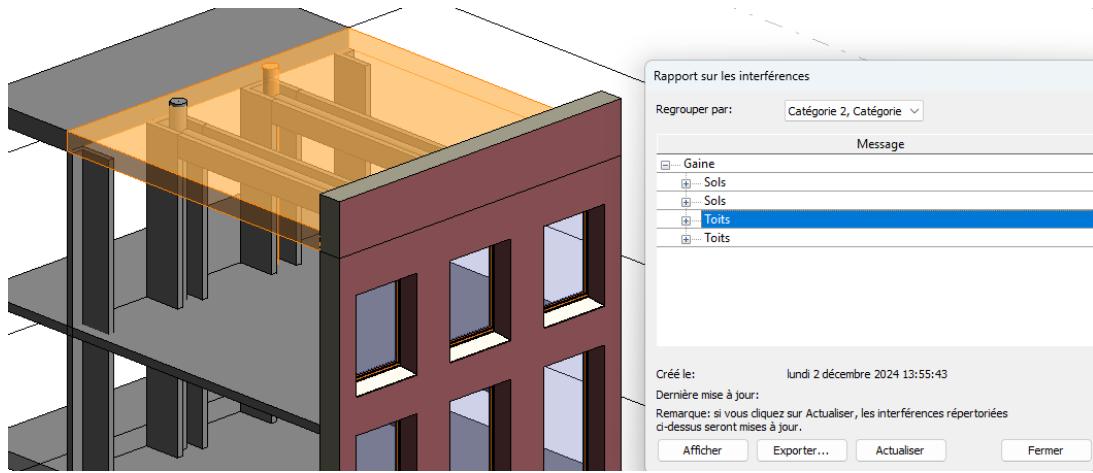


Figure 44 : Détection de collision entre la toiture légère et les gaines de ventilation dans le modèle dans Revit.

Ces conflits reflètent des problèmes courants dans la préconception des projets modulaires, où l’interaction entre les systèmes structurels et techniques n’est pas toujours anticipée dans les modèles standardisés.

Cependant, un point à noter est que l’outil de détection des conflits n’identifie pas certains problèmes liés aux incohérences géométriques ou esthétiques. Par exemple, une fenêtre partiellement coupée par un mur n’apparaît pas comme un conflit, bien qu’il s’agisse d’une erreur à corriger (Figure 45). Ce constat souligne les limites du BIM et l’importance de combiner l’analyse logicielle avec une revue manuelle des modèles.



Figure 45 : Problème esthétique non détecté par l'outil dans Revit.

Pour résoudre les conflits identifiés, les éléments standardisés ont été transformés en éléments spécifiques. Cela a impliqué une modification manuelle des objets dans le modèle BIM pour intégrer les contraintes détectées :

- Les **réseaux techniques** ont été reconfigurés pour éviter les collisions. Des réservations ont été ajoutées aux murs et planchers pour intégrer les passages de canalisations (*Figure 46*).
- Les **sols** ont été perforés en tenant compte de la ventilation (*Figure 47*).
- Les **ouvertures** (portes et fenêtres) ont été repositionnées ou redimensionnées pour garantir leur cohérence avec la structure et les fonctionnalités prévues (*Figure 48*).

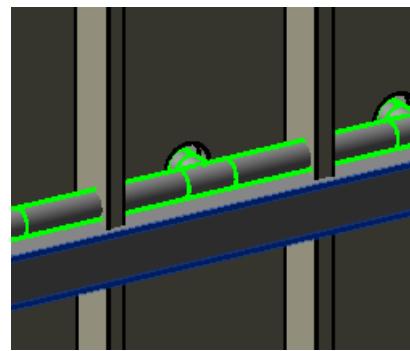


Figure 46 : Résolution d'un conflit entre une cloison légère et les canalisations.

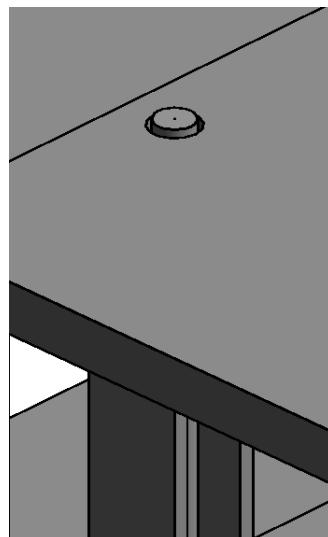


Figure 47 : Résolution d'un conflit entre la toiture et les gaines de ventilation.

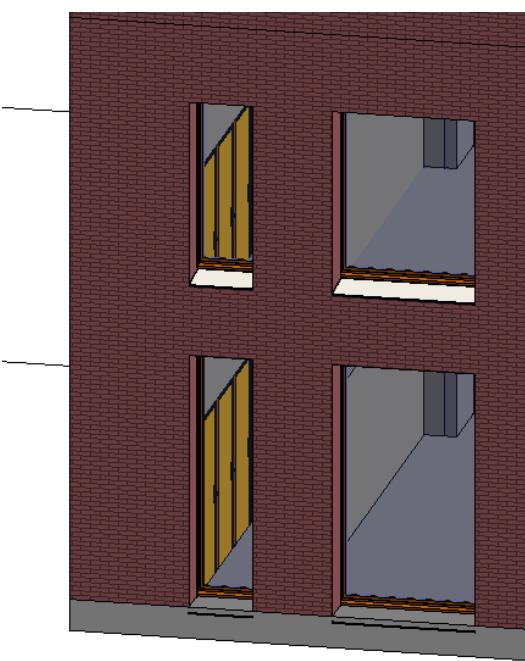


Figure 48 : Résolution d'un conflit esthétique entre une fenêtre donnant sur un sanitaire et une cloison intérieure.

Une innovation importante dans ce processus a été la création d'un **paramètre d'état de modification**. Ce paramètre ajouté manuellement à chaque élément après sa modification, permet de distinguer les éléments standardisés des éléments modifiés dans le modèle. Ce suivi est essentiel pour évaluer l'impact des modifications sur l'ensemble du projet.

Par exemple, après modification, une fenêtre repositionnée dans les sanitaires a été marquée avec le paramètre "état de modification". Cette fenêtre a été déplacée pour éviter une obstruction par une paroi intérieure, ce qui a également impliqué un ajustement des dimensions de la paroi adjacente. Cela va permettre la création d'une nomenclature pour visualiser facilement les éléments qui ont été modifiés.

4.2.6 Utilisation de la technologie RFID pour l'identification et le montage des éléments

L'intégration de la technologie RFID (Radio Frequency Identification) dans la gestion des éléments préfabriqués constitue une avancée significative pour l'industrie de la construction, en particulier pour les projets utilisant des méthodes modulaires ou préfabriquées. En attribuant à chaque composant une puce RFID contenant un numéro d'identification unique (appelé « Numéro occurrence » dans le modèle Revit), il devient possible de localiser précisément les éléments, de suivre leur parcours depuis la fabrication jusqu'à leur montage, et d'améliorer considérablement la coordination sur le chantier.

Le processus commence par l'utilisation de Revit, où chaque élément préfabriqué est modélisé et reçoit un numéro d'identification de type (appelé « Numéro de type » dans le modèle Revit), permettant le calcul du nombre d'éléments semblables à préfabriquer ainsi qu'un numéro d'identification unique. Dans le modèle Revit, les informations sont structurées comme suivant : « Numéro de type ». « Numéro occurrence » par exemple : « 3.105 » signifie que l'élément fait partie du type 3 (donc les fenêtres ont un vantail droit de 1.8x3m) et son numéro unique attribué est le 105. Le numéro unique est lié à des données spécifiques, telles que le type d'élément (par exemple, une poutre, un panneau ou une colonne), ses dimensions, ses spécifications techniques et sa position prévue sur le chantier. Les plans et élévations générés annotés dans Revit servent de base pour organiser le montage des éléments, en permettant aux équipes de retrouver facilement les types et les positions de chaque composant (*Figure 49* et *Figure 50*). Ces informations peuvent ensuite être associées aux puces RFID intégrées dans les éléments physiques, permettant une traçabilité précise et un accès direct aux données essentielles.

Sur le chantier, l'utilisation de scanners RFID facilite la localisation rapide des éléments. Par exemple, un opérateur peut scanner une pile d'éléments pour identifier instantanément celui dont il a besoin, plutôt que de chercher manuellement parmi plusieurs pièces similaires. Cette capacité réduit les erreurs de montage, limite les confusions entre les différents types d'éléments et améliore l'efficacité globale du processus. Les équipes disposent ainsi d'un outil adapté pour organiser et accélérer le montage tout en minimisant les risques d'erreurs coûteuses.

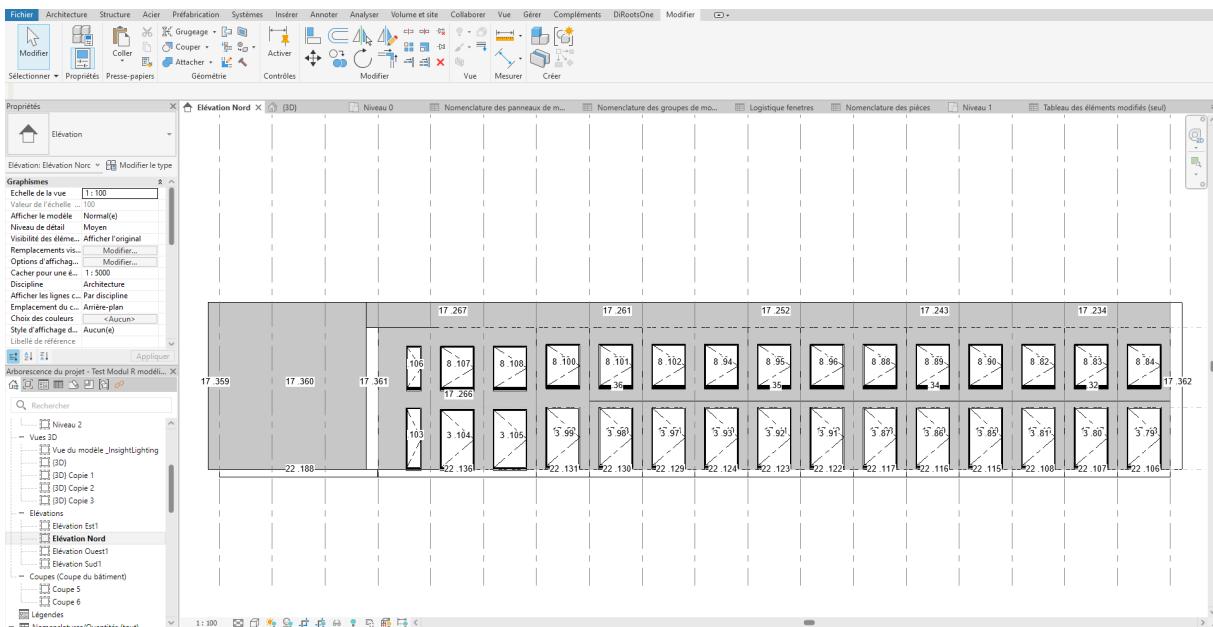


Figure 49 : Élévation avec numérotation des éléments.

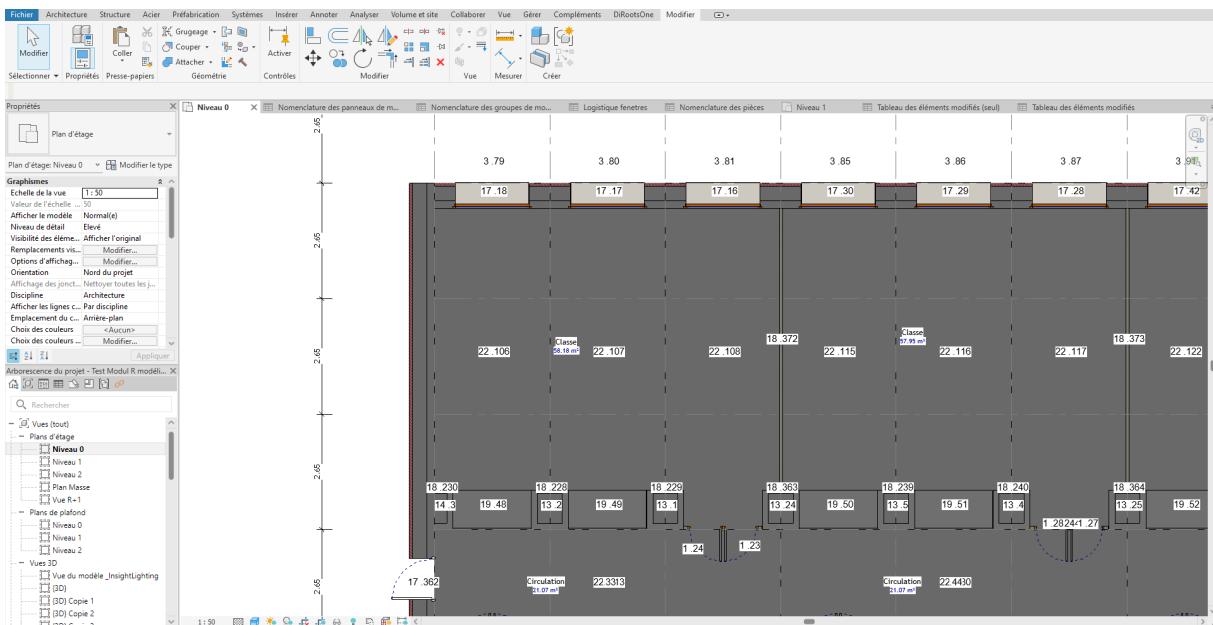


Figure 50 : Plan avec numérotation des éléments.

Cependant, la mise en place d'une numérotation unique et automatique de chaque élément requiert une connaissance de base dans le logiciel Dynamo. Une chaîne a donc été créée et peut être réutilisée dans plusieurs projets afin de ne pas avoir à numérotter chaque occurrence du projet manuellement. La chaîne montrée en exemple permet de numérotter la catégorie fenêtre (*Figure 51*). Cette chaîne doit être dupliquée pour être utilisée pour d'autres catégories (*Figure 52*).

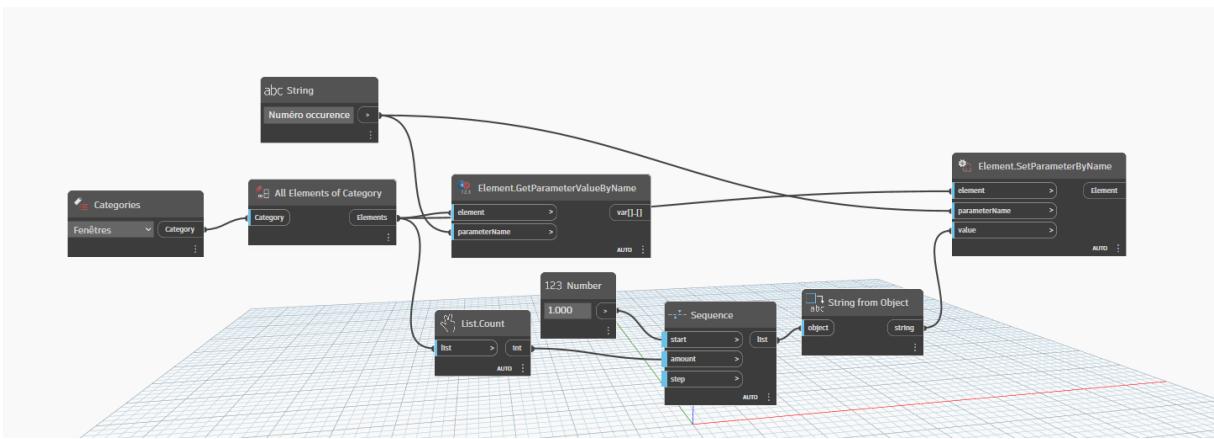


Figure 51 : Chaine Dynamo permettant la numérotation unique et automatique des fenêtres établie par le chercheur.

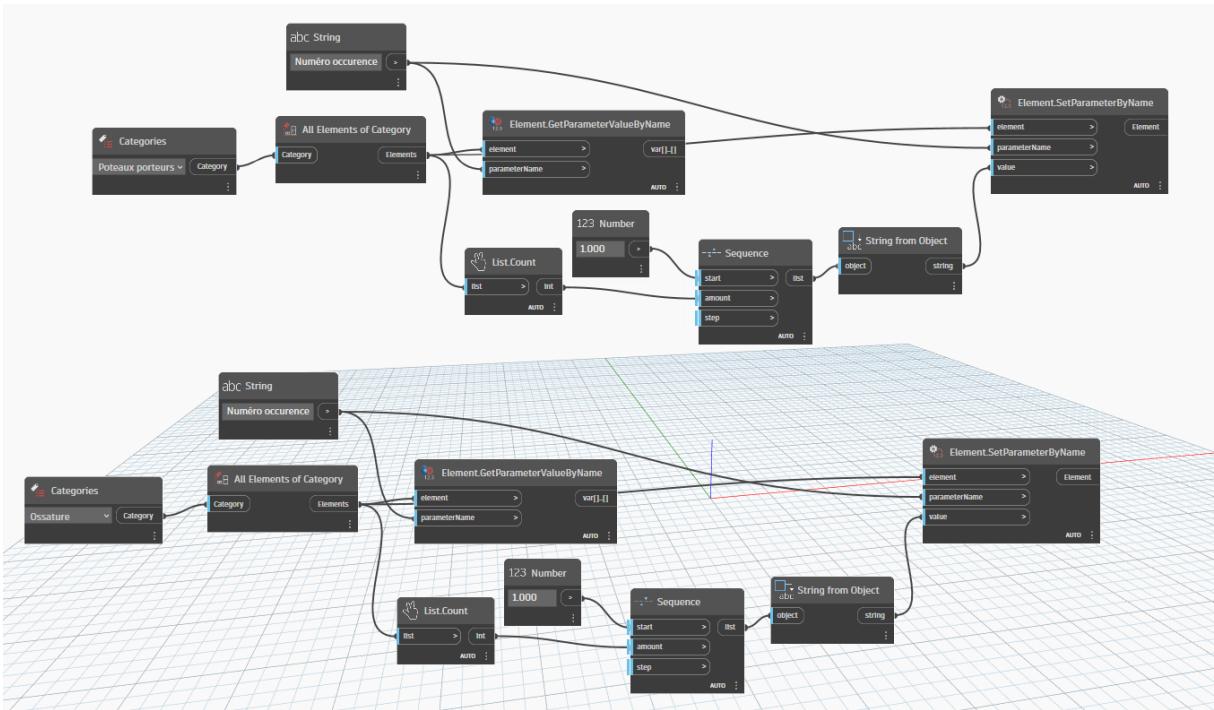


Figure 52 : Chaine Dynamo permettant la numérotation unique et automatique d'autres catégories introduite par le chercheur.

4.2.7 Analyse et modélisation des flux de chantier : chemins, stockage et utilisation de la grue

Dans le contexte des projets d'architecture modulaire, la planification des accès et l'utilisation des grues représentent des aspects critiques pour assurer la fluidité et l'efficacité des opérations de chantier. Les modules préfabriqués, souvent volumineux et lourds, nécessitent des itinéraires de transport adaptés, ainsi qu'une logistique rigoureuse pour leur manipulation sur site. L'intégration de ces éléments dès les premières phases de conception est essentielle pour anticiper les contraintes et éviter les retards.

La modélisation des flux de chantier, notamment à l'aide de logiciels tels que Revit, permet d'analyser en détail les chemins d'accès aux sites de construction. Les dimensions des camions et des remorques, ainsi que celles des modules eux-mêmes, doivent être prises en compte pour vérifier si les routes existantes sont adaptées. Les concepteurs peuvent ainsi simuler le passage des véhicules en identifiant les éventuels obstacles, comme les virages trop serrés, les restrictions de hauteur sous les ponts ou encore les limitations de poids sur certaines infrastructures (*Figure 53*). Cette étape est particulièrement importante dans des environnements urbains, où les contraintes d'espace sont nombreuses, mais également en milieu rural, où les routes peuvent être étroites ou non stabilisées.



Figure 53 : Modélisation de la topographie et des routes par le chercheur dans Revit.

Une fois sur le site, les modules doivent être manipulés avec précision pour être positionnés correctement. C'est ici que le rôle des grues devient primordial. La sélection de l'emplacement des grues et l'évaluation de leur rayon d'action sont des tâches qui nécessitent une planification minutieuse. En simulant la position des grues dans la maquette numérique, il est possible de s'assurer qu'elles pourront atteindre tous les points nécessaires sans devoir être déplacées fréquemment, ce qui limiterait les pertes de temps et les coûts supplémentaires.

De plus, les capacités techniques des grues, comme leur charge maximale ou leur hauteur de levage, doivent être confrontées aux exigences spécifiques du projet. Certains modules, particulièrement imposants, peuvent nécessiter des grues à forte capacité ou des configurations spécifiques pour garantir un levage sécurisé. La simulation numérique permet également de vérifier que les zones prévues pour l'installation des grues sont adaptées : elles doivent offrir une stabilité suffisante pour supporter les charges importantes générées par ces équipements (Figure 54).

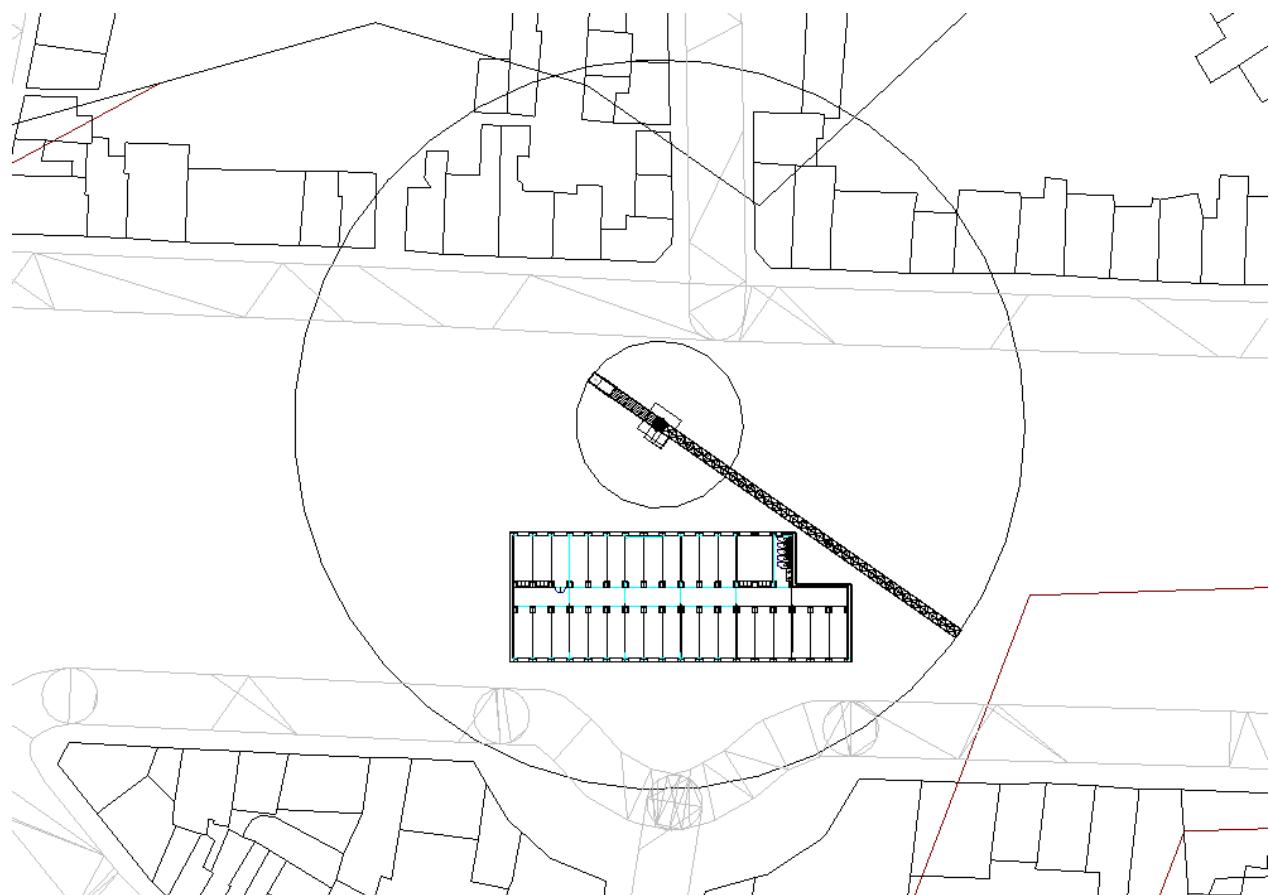


Figure 54 : Ajout d'une grue pour aider la logistique du projet Modul R.

4.2.8 Guide d'utilisation rapide dans Revit.

1. Utiliser la grille créée sur Revit faisant les dimensions standards du projet Modul R. Cette grille est verrouillée et ne peut donc pas être déplacée par inadvertance (*Figure 55*).

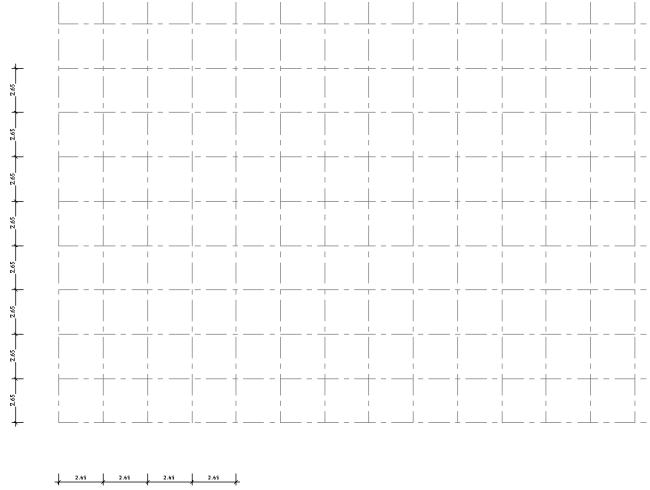


Figure 55 : Grille modélisée par le chercheur dans Revit.

2. Si les groupes dont vous avez besoin pour le projet ne sont pas encore créés (seuls les groupes de classe, circulation et sanitaire ont été modélisés dans l'exemple). L'utilisation des types déjà créés dans le modèle permet de construire les modules rapidement (*Figure 56*).

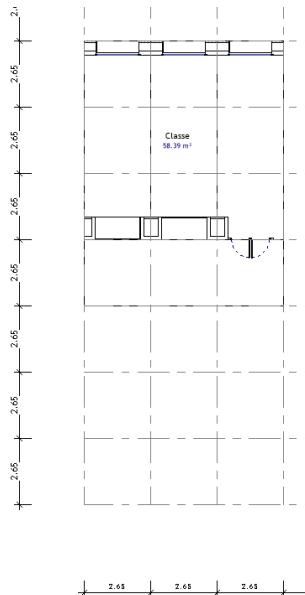


Figure 56 : Modélisation d'un module de classe par le chercheur dans Revit.

3. Afin de réutiliser les modules, il faut en faire un groupe afin que les éléments soient dupliquables (*Figure 57*).

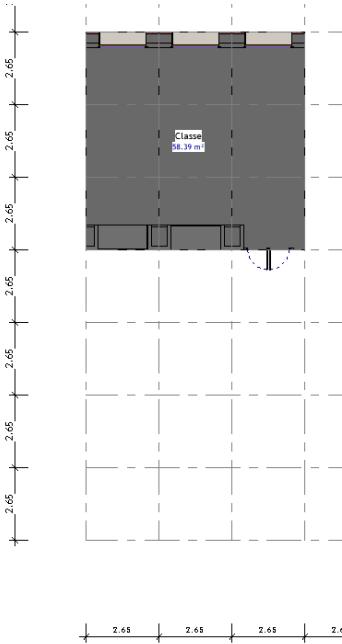


Figure 57 : Exemple d'un groupe de classe importé par le chercheur dans Revit.

4. Il faut ensuite ajouter les modules supplémentaires, comme les circulations (*Figure 58*).

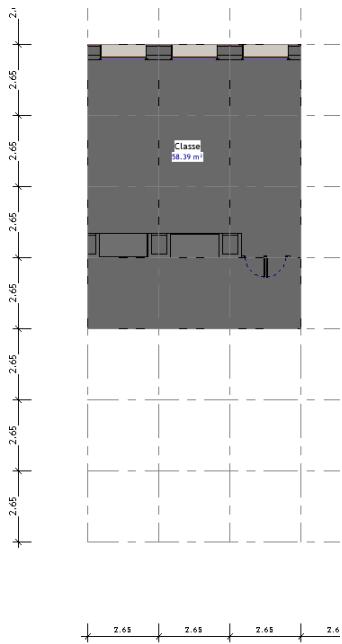


Figure 58 : Exemple d'un groupe de circulation importé par le chercheur dans Revit.

5. Une fois tous les modules assemblés, vous aurez un modèle complet comprenant tous les modules génériques (*Figure 59*).

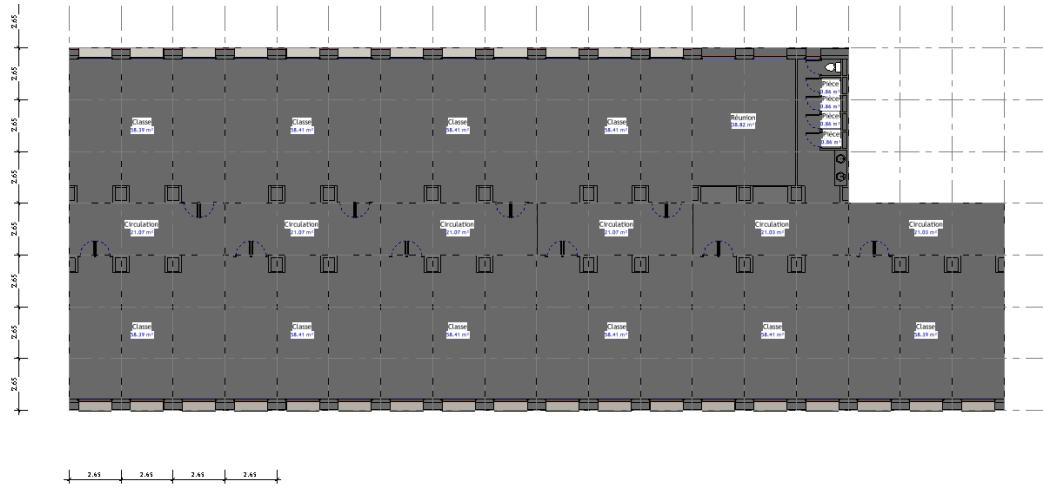


Figure 59 : Exemple d'ajout de groupes pour former la base d'une école modulaire par le chercheur dans Revit.

6. La dernière étape consiste en l'addition des éléments ne faisant pas partie des groupes dupliquables comme certains poteaux se situant entre deux modules, les murs pignon, ajouter des portes extérieures, ... (*Figure 60*).

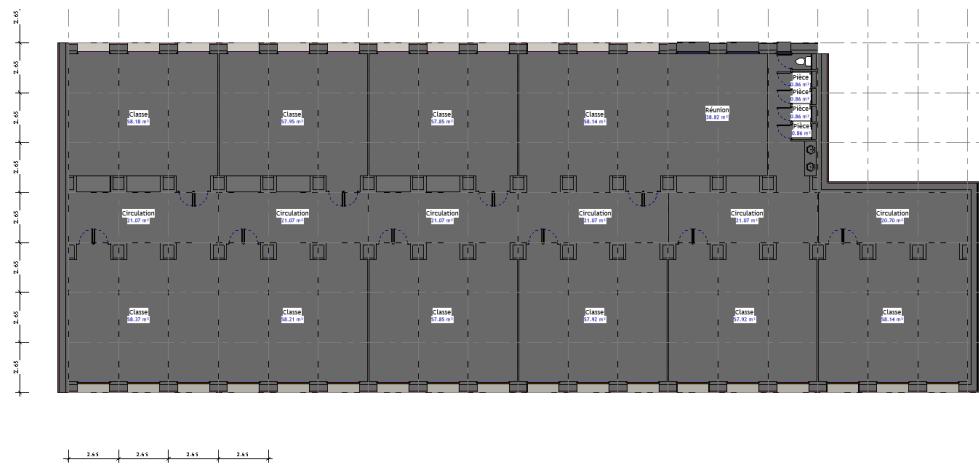


Figure 60 : Exemple d'ajout des éléments spécifiques (dans cet exemple : cloisons, murs pignon, poteaux entre deux modules) par le chercheur dans Revit.

4.2.9 Exemples de modélisation grâce à cette méthode

Voici deux exemples de feuilles sorties avec cette méthode contenant un plan de rez-de-chaussée, une élévation, une vue 3D, les tableaux de prix et celui des surfaces (Figure 61 et Figure 62).

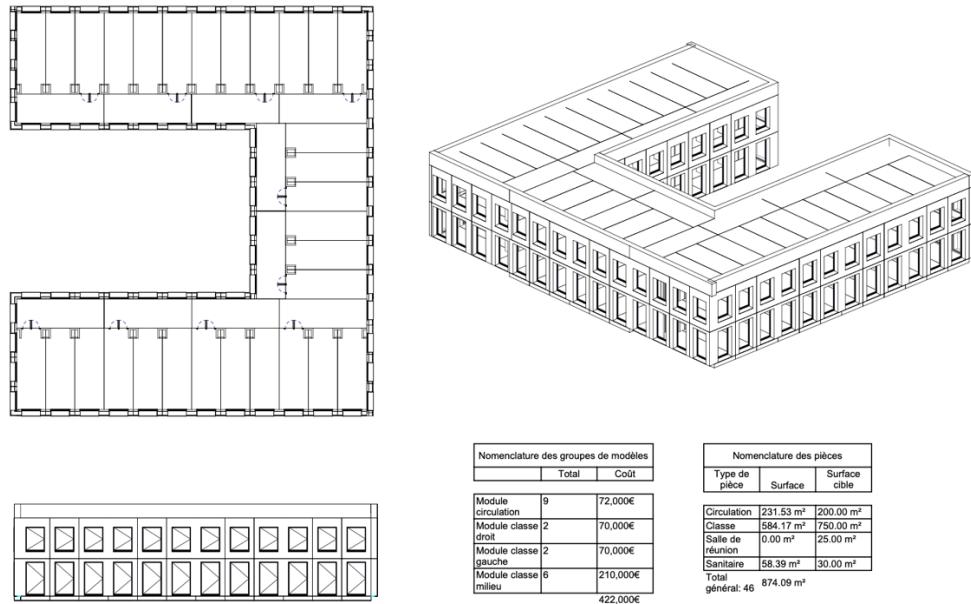


Figure 61 : Exemple d'école contenant 20 modules modélisé par le chercheur dans Revit.

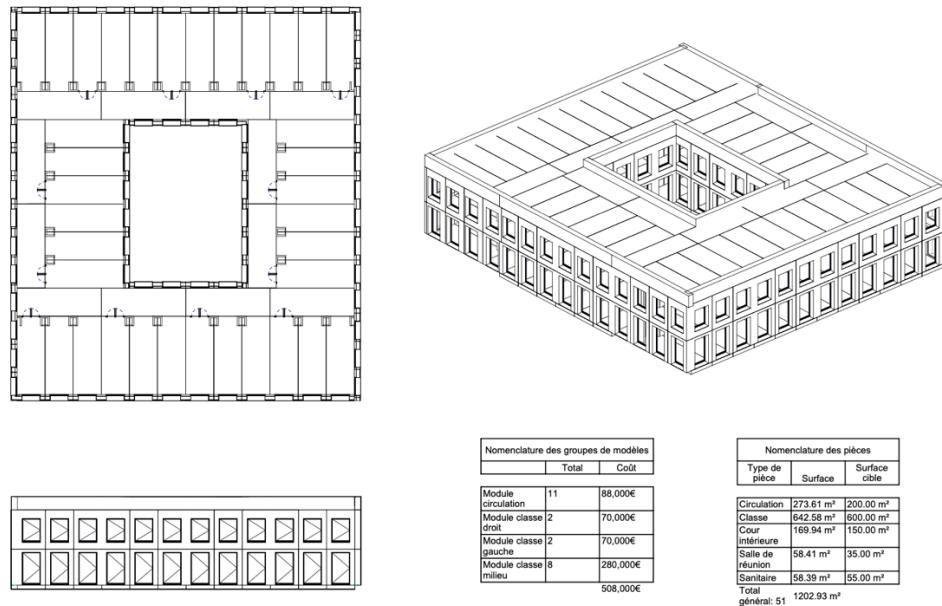


Figure 62 : Exemple d'école contenant 24 modules modélisé par le chercheur dans Revit.

Lors de l'élaboration des exemples, le chercheur a identifié plusieurs limites liées à la conception d'une école modulaire avec Revit. Tout d'abord, les façades présentent une uniformité qui restreint les possibilités de variation pour l'architecte, en dehors du choix des matériaux. De plus, la duplication des modules entraîne parfois une perte d'espace. Par exemple, la *Figure 63* et la *Figure 64* montrent que dans une école composée de 24 modules, les classes 1, 2, 3 et 4 pourraient être mieux réparties le long des façades extérieures, de chaque côté du bâtiment. Enfin, la contrainte des éléments préfabriqués limite l'ajustement des dimensions des modules.

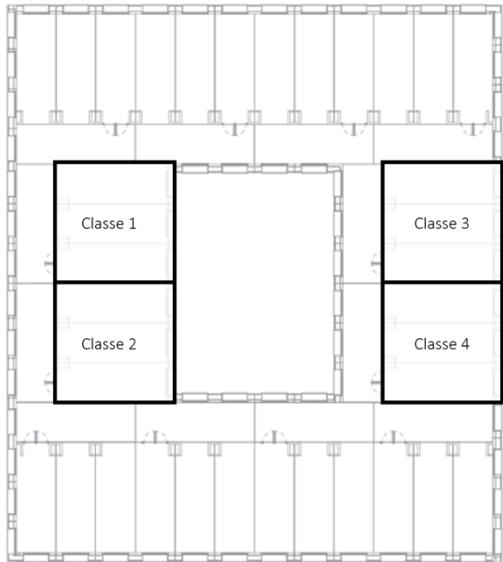


Figure 63 : Classes modélisées sur base des groupes de modules.

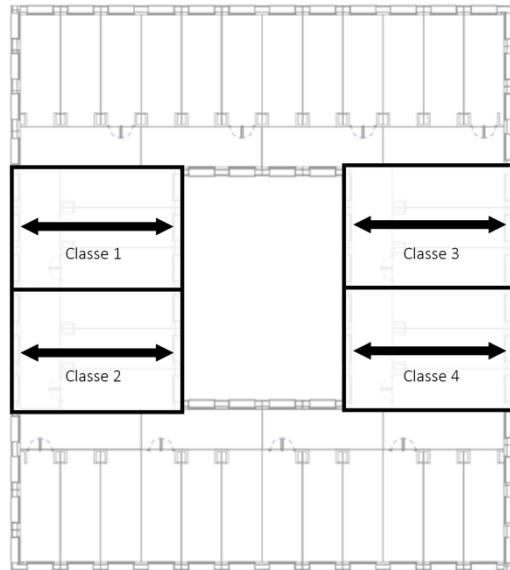


Figure 64 : Classes optimisées impossible à modéliser sur base des groupes de modules.

5 Discussions des résultats

La confrontation entre les avantages et limites tirés de l'expérimentation du projet Modul R et les résultats de l'entretien semi-dirigé met en évidence les rôles clés joués par le BIM dans la conception d'écoles modulaires. Tout en révélant les perspectives d'amélioration à travers une intégration plus approfondie du BIM, cette discussion examine les points de convergence et de divergence entre ces deux sources d'analyse.

Le BIM pour la centralisation et de la prise de décision

Le BIM se distingue dans le projet Modul R par sa capacité à centraliser les données et à offrir des outils d'analyse en temps réel. Lors de l'expérimentation, les fonctionnalités de Revit, comme la nomenclature des surfaces, ont permis une mise à jour instantanée des données globales en fonction des modifications apportées. Cet avantage démontre comment le BIM simplifie l'évaluation des conformités aux cahiers des charges. Cependant, il a également été constaté que l'absence de calcul automatique des écarts entre le modèle et les exigences préétablies limite son efficacité. Cette lacune appelle au développement d'algorithmes avancés pour étendre les capacités analytiques du BIM.

Les entretiens semi-dirigés ont souligné que le BIM, utilisé de manière optimale, pourrait fournir les informations nécessaires à un dossier d'exécution presque finalisé dès la fin de la phase de modélisation. Comme l'explique un architecte participant : « Avec un système bien structuré, tout le monde peut travailler sur la même base, sans risque de perte d'informations ». Cette centralisation réduit les malentendus et favorise une meilleure répartition des tâches.

Les modules de base, bien que similaires, doivent souvent être ajustés pour répondre à des contraintes spécifiques. Par exemple, le module destiné aux sanitaires nécessite le percement des planchers pour le passage des descentes d'eau, tandis qu'un module de classe, constitué de trois modules assemblés, devra être ajusté pour intégrer un système de ventilation double flux, avec un percement pour l'air entrant et un autre pour l'air sortant.

Grâce au BIM, ces ajustements peuvent être anticipés et réalisés efficacement dès la phase de conception. Les outils de modélisation permettent de visualiser ces modifications et d'assurer leur intégration harmonieuse dans le design global, ce qui minimise les erreurs ou les imprévus sur site. Les ajustements tels que le redimensionnement des fenêtres dans les toilettes (pour répondre aux exigences de luminosité ou d'intimité) sont également facilités par le BIM, les impacts étant automatiquement pris en compte dans l'inventaire des modifications.

Standardisation et flexibilité architecturale : un équilibre délicat

L'architecture modulaire repose sur une tension fondamentale entre la standardisation, indispensable à l'efficacité de la préfabrication, et la flexibilité, essentielle pour répondre aux besoins spécifiques des usagers. Le BIM, notamment à travers les groupes Revit, simplifie la création de modules standardisés tout en permettant des variations adaptées aux contraintes locales ou esthétiques.

Cette double capacité est particulièrement précieuse pour répondre aux critiques fréquentes sur la monotonie des bâtiments modulaires. Les entretiens révèlent que le BIM permet de varier matériaux, tailles et configurations, offrant ainsi une identité architecturale unique à chaque projet tout en conservant une base modulaire. Comme l'a expliqué un chef de projet, « c'est une tentative d'optimiser tout ce qui est optimisable et de laisser spécifique tout ce qui est spécifique. » Cette philosophie reflète une utilisation équilibrée du BIM, combinant rationalité et créativité.

Gestion des coûts et anticipation

Le BIM s'avère également d'une aide précieuse pour la gestion financière des projets modulaires. Dans le projet Modul R, l'attribution de prix unitaires aux éléments du modèle a permis d'estimer les coûts préliminaires. Toutefois, cette méthode repose sur des données manuelles devant être régulièrement actualisées, limitant la précision des projections.

L'état de l'art a souligné que les marges d'erreur dans les estimations actuelles peuvent atteindre 10 à 15 %, un chiffre problématique pour des projets à budget restreint. L'utilisation combinée de logiciels comme CostX et de bases de données dynamiques pourrait considérablement réduire ces écarts. En parallèle, le suivi des modifications dans le BIM facilite une gestion plus précise des stocks, permettant aux fabricants d'adapter leur production en temps réel et d'éviter les retards ou erreurs coûteuses.

Optimisation de la logistique et de la planification

La logistique est un autre domaine clé où le BIM pourrait apporter des améliorations significatives. Les données fournies par Revit (quantité, dimensions, poids) permettent une meilleure planification des transports et du stockage des modules sur site. Cependant, les limitations actuelles, notamment l'absence de fonctionnalités de simulation logistique, nécessitent des compléments logiciels ou le développement de nouveaux outils.

Les entretiens ont mis en lumière l'utilité de la modélisation 3D des étapes de montage. Par exemple, la simulation des zones d'installation et des parcours des grues a permis d'identifier des conflits potentiels bien avant la mise en œuvre, économisant ainsi temps et ressources. Toutefois, pour aller plus loin, il serait bénéfique d'intégrer des outils interactifs simulant en temps réel les

contraintes logistiques, notamment pour des sites urbains complexes ou des modules de grande dimension.

Simplification des travaux sur site

Un des avantages souvent sous-estimés du BIM réside dans sa capacité à réduire la durée et la complexité des travaux sur site. Dans le cadre du projet Modul R, les ajustements réalisés en amont ont permis d'acheminer des modules quasi-finalisés, nécessitant peu de modifications supplémentaires. Les équipes sur site bénéficient également de la clarté des informations fournies par le modèle BIM, notamment la localisation précise des éléments modifiés.

L'ajout d'images issues du modèle BIM dans les tableaux d'inventaire constitue une avancée significative. Ces visualisations permettent une compréhension rapide des ajustements à réaliser et facilitent la communication entre les différents corps de métier. Par exemple, un détail technique ou une capture d'écran du modèle peut éviter des erreurs d'interprétation coûteuses lors de l'installation.

Limites et rôle persistant de l'architecte

Malgré ses nombreux atouts, le BIM présente des limites, notamment en matière de supervision et de créativité. Bien qu'il facilite la détection de conflits techniques, certaines incohérences, comme des dimensions incorrectes de fenêtres, échappent aux systèmes automatisés et nécessitent l'intervention humaine. Ces défis soulignent l'importance du rôle de l'architecte, non seulement comme concepteur, mais aussi comme garant de la cohérence globale du projet.

Par ailleurs, une utilisation excessive du BIM centrée sur l'efficacité et la réduction des coûts pourrait conduire à une uniformisation des bâtiments modulaires, au détriment de leur qualité esthétique. Cette tension, mise en avant lors des entretiens, appelle à un équilibre entre les capacités techniques du BIM et la liberté créative des architectes.

6 Conclusion générale

Le projet Modul R s'appuie sur une approche en deux dimensions, caractérisée par un assemblage de modules de second degré de préfabrication. Cette recherche a permis de tester l'intégration du BIM, notamment via Revit, dans la conception modulaire et donc de répondre à la question : **Dans quelle mesure le BIM peut accompagner la préconception des bâtiments modulaires ? L'étude portera sur le projet pilote Modul R de la FW-B pour évaluer sa faisabilité grâce au BIM** et à l'hypothèse suivante : Le BIM facilite-t-il la prise de décision en faveur de l'architecture modulaire ? Les résultats obtenus démontrent que l'utilisation du BIM améliore la gestion des nomenclatures, des modifications et des collisions, tout en apportant des outils d'automatisation et de gestion. Ces aspects aident à la prise de décision. Cependant, certaines limites subsistent, comme l'impossibilité de calculer automatiquement les écarts entre le programme du modèle et les exigences du cahier des charges, ou encore la gestion logistique limitée.

Un inventaire complet a été créé dans Revit pour faciliter la conception de nouveaux modules. Cet inventaire est enrichi par différentes nomenclatures (des surfaces, des couts, des éléments génériques et modifiés et une nomenclature reprenant les informations intéressantes pour une étude logistique). Chaque ajout de module met automatiquement à jour ces nomenclatures, offrant un retour immédiat.

Toutefois, le calcul des surfaces présente une limite importante : Revit ne permet pas de calculer les différences entre les surfaces prévues et celles spécifiées dans le cahier des charges.

La gestion des coûts est également intégrée au modèle Revit. Les estimations sont basées sur des prix actuels saisis manuellement, ce qui implique une mise à jour régulière pour garantir leur fiabilité.

Sur le plan logistique, bien que Revit permette d'attribuer des informations clés (quantité, dimensions, poids), il n'offre pas d'outil pour optimiser les étapes de transport ou d'installation. Néanmoins, ces informations restent accessibles dans une nomenclature dédiée, utile pour une planification logistique externe.

Une avancée majeure repose sur l'utilisation des nomenclatures pour distinguer les éléments modifiés des éléments génériques. Cela permet de créer un tableau des ajustements nécessaires en usine, facilitant la fabrication et réduisant les imprévus. Par ailleurs, l'emploi de grilles standardisées et de groupes dans Revit simplifie la duplication et l'organisation des modules. Cette approche optimise le temps de conception, mais présente des contraintes, comme la lourdeur des groupements et les problèmes d'accrochage entre eux.

Les fonctionnalités avancées de Revit, comme la détection de conflits, ont également démontré leur utilité. Elles permettent d'identifier et de résoudre des collisions potentielles entre différents éléments, assurant une préparation minutieuse avant l'arrivée des modules sur site. Une chaîne Dynamo développée par le chercheur a renforcé cette efficacité en attribuant

automatiquement des numéros d'occurrence uniques à chaque élément. Cette numérotation, associée à des puces RFID, simplifie leur identification et suivi.

Enfin, la modélisation du site avec Revit offre une vue d'ensemble essentielle pour organiser les chantiers. Elle permet d'anticiper l'accessibilité des chemins, de planifier les emplacements pour les grues et les zones de stockage, et de choisir les équipements adaptés en fonction des contraintes spécifiques au projet.

Perspectives d'évolution

À l'avenir, plusieurs pistes peuvent être envisagées pour approfondir et améliorer l'utilisation du BIM dans le cadre du projet Modul R. Un deuxième entretien avec le bureau Matador pourrait être organisé pour partager les résultats obtenus, recueillir leurs retours et discuter ensemble des perspectives. De plus, une expérimentation pédagogique pourrait consister à initier un groupe d'étudiants aux bases de Revit, afin d'évaluer si ce logiciel facilite la conception d'un bâtiment Modul R. Tester une autre application BIM pourrait également offrir un point de comparaison et ouvrir de nouvelles opportunités d'amélioration.

Les résultats obtenus montrent que le BIM, bien qu'encore perfectible, est intéressant pour soutenir l'architecture modulaire. En intégrant des fonctions supplémentaires, comme des simulations logistiques ou des outils d'analyse prédictive, et en renforçant la formation des acteurs, son impact pourrait être encore amplifié. Par exemple, des solutions automatisées pour mettre à jour les coûts et des scripts pour ajuster les modèles en temps réel seraient des avancées significatives.

7 Tableau des Figures

Figure 1 : Coût unitaire et la répétition des unités (standardisation) pour les panneaux préfabriqué (Gibb, 1999).	13
Figure 2 : Coût d'un projet traditionnel et modulaire et évolution potentielle en % (McKinsey, 2019).	14
Figure 3: Calendrier de projet typique pour une approche de construction « DfMA » (Building and Construction Authority, 2016).	15
Figure 4: Émission de CO ₂ selon le mode de construction (Quale et al., 2012)....	17
Figure 5 : Comparaison du taux d'accident et du taux de décès dans le secteur de la construction et de l'industrie (Beddiar et al., 2021).	19
Figure 6: La préfabrication peut être classée selon le degré de complétude des éléments avant leur assemblage sur site. De gauche à droite : matériaux, composants, panneaux et module (Smith, 2010).	20
Figure 7: Émissions de Gaz à effet de serre liées à la fabrication calculées avec Gestimat (Cecobois, s. d.).	25
Figure 8 : Types de composants en bois massif (Rochat, 2024).	26
Figure 9: Histoire de l'industrialisation dans la construction (Smith, 2010).	28
Figure 10: Nombre de publications annuelles sur les technologies numériques impliquées et nombre total d'articles sur la construction hors-site de 2010 à 2020 (Wang et al., 2020).	31
Figure 11: Les bénéfices du BIM qui réduisent les limites de l'architecture modulaire (Isikdag, 2013).	32
Figure 12: Composants de bâtiment avec étiquettes RFID (Chen et al., 2015)....	36
Figure 13 : Systèmes de panneaux de bois explorés par Anderson Anderson Architecture (Smith, 2010).	38
Figure 14 : « Unity House » fabriquée par Bensonwood. La conception de la maison a été faite sur base de 50 éléments de préfabriqués (Smith, 2010).....	39
Figure 15: Schéma méthodologique conçu par le chercheur.	45
Figure 16: Schéma de la hiérarchie des informations dans Revit conçu par le chercheur.....	56
Figure 17 : Inventaire des éléments génériques modélisés par le chercheur dans Revit.....	57
Figure 18 : Modélisation des portes par le chercheur dans Revit.	58
Figure 19 : Modélisation des fenêtres par le chercheur dans Revit.	59
Figure 20 : Modélisation des poteaux par le chercheur dans Revit.	61
Figure 21 : Modélisation des poutres par le chercheur dans Revit.	62
Figure 22 : Modélisation des mur-rideau par le chercheur dans Revit.	63
Figure 23 : Modélisation des murs par le chercheur dans Revit.	64
Figure 24 : Modélisation du mobilier par le chercheur dans Revit.	65
Figure 25 : Modélisation des dalles de sol par le chercheur dans Revit.....	66
Figure 26 : Modélisation des planchers par le chercheur dans Revit.....	68
Figure 27 : Modélisation des toitures par le chercheur dans Revit.....	69
Figure 28 : Ajout de la surface des pièces et du type de pièce par le chercheur dans Revit.....	72

Figure 29 : Nomenclature du type de pièce, de la surface total des types de pièces et des surface demandées dans le cahier des charges conçu par le chercheur dans Revit.	72
Figure 30 : Nomenclature d'estimation des couts introduite par le chercheur dans Revit.	74
Figure 31 : Exemple de paramètre du coût d'un module de classe introduit par le chercheur dans Revit.	74
Figure 32 : Nomenclature de fenêtre contenant le volume des fenêtres et le volume total des fenêtres comprenant les protections pour le transport conçu par le chercheur dans Revit.....	76
Figure 33 : Tableau des éléments modélisés (à gauche) et tableau de éléments modifiés (à droite).	77
Figure 34 : Création d'une grille de 2,65x2,65m par le chercheur dans Revit.	78
Figure 35 : Modélisation du plan de base d'une école Modul R par le chercheur dans Revit.....	79
Figure 36 : Modélisation d'un groupe contenant un module de classe générique introduite par le chercheur dans Revit.	81
Figure 37 : Schéma des différents modules conçu par le chercheur.	81
Figure 38 : Exemple d'intersection entre un groupe et un élément "mur" ajouté par le chercheur dans Revit.....	82
Figure 39 : Tableau des conflits entre le modèle et les gaines sanitaires.....	83
Figure 40 : Collision entre un plancher et les canalisations dans le modèle dans Revit par le chercheur.	84
Figure 41 : Détection de collision entre une cloison légère et les canalisations dans le modèle Revit.	84
Figure 42 : Tableau des conflits entre le modèle et les gaines de ventilation dans Revit.	85
Figure 43 : Détection de collision entre un plancher et les gaines de ventilation dans le modèle dans Revit.	86
Figure 44 : Détection de collision entre la toiture légère et les gaines de ventilation dans le modèle dans Revit.....	86
Figure 45 : Problème esthétique non détecté par l'outil dans Revit.	87
Figure 46 : Résolution d'un conflit entre une cloison légère et les canalisations.	88
Figure 47 : Résolution d'un conflit entre la toiture et les gaines de ventilation.....	88
Figure 48 : Résolution d'un conflit esthétique entre une fenêtre donnant sur un sanitaire et une cloison intérieure.....	88
Figure 49 : Élévation avec numérotation des éléments.....	91
Figure 50 : Plan avec numérotation des éléments.....	91
Figure 51 : Chaine Dynamo permettant la numérotation unique et automatique des fenêtres établie par le chercheur.	92
Figure 52 : Chaine Dynamo permettant la numérotation unique et automatique d'autres catégories introduite par le chercheur.....	92
Figure 53 : Modélisation de la topographie et des routes par le chercheur dans Revit.	93
Figure 54 : Ajout d'une grue pour aider la logistique du projet Modul R.	94
Figure 55 : Grille modélisée par le chercheur dans Revit.	95
Figure 56 : Modélisation d'un module de classe par le chercheur dans Revit.....	95
Figure 57 : Exemple d'un groupe de classe importé par le chercheur dans Revit.	96
Figure 58 : Exemple d'un groupe de circulation importé par le chercheur dans Revit.....	96

Figure 59 : Exemple d'ajout de groupes pour former la base d'une école modulaire par le chercheur dans Revit.....	97
Figure 60 : Exemple d'ajout des éléments spécifiques (dans cet exemple : cloisons, murs pignon, poteaux entre deux modules) par le chercheur dans Revit.....	97
Figure 61 : Exemple d'école contenant 20 modules modélisé par le chercheur dans Revit.	98
Figure 62 : Exemple d'école contenant 24 modules modélisé par le chercheur dans Revit.	98
Figure 63 : Classes modélisées sur base des groupes de modules.	99
Figure 64 : Classes optimisées impossible à modéliser sur base des groupes de modules.....	99

8 Bibliographie

Abanda, F. H., Tah, J. H. M., & Cheung, F. K. T. (2017). BIM in off-site manufacturing for buildings. *Journal of Building Engineering*, 14, 89-102. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.10.002>

Autodesk. (s. d.-a). *3 approches de conception pour réussir vos projets.*

Autodesk. (s. d.-b). *Revit pour l'architecture et la conception de bâtiments.* Consulté 8 novembre 2024, à l'adresse <https://www.autodesk.com/be-fr/products/revit/architecture>

Azhar, S., Carlton, W. A., Olsen, D., & Ahmad, I. (2011). Building information modeling for sustainable design and LEED® rating analysis. *Automation in Construction*, 20(2), 217-224. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.019>

Beddiar, K., Cléraux, A., & Chazal, P. (2021). *Construction hors-site : DfMA, modulaire, BIM : l'industrialisation du bâtiment* (Illustrated edition). Dunod.

Benjamin. (2019, juin 10). Le principe de la nomenclature sur Revit? *F3DF - Intégrateur Autodesk.* <https://www.f3df.com/le-principe-de-la-nomenclature-sur-revit/>

Bourez, O., & Stache, A. (2024, novembre 20). *Le projet Modul R et l'intégration du BIM* [Communication personnelle].

Building and Construction Authority. (2016, octobre). *BIM for DfMA (Design for Manufacturing and Assembly) Essential Guide.*

Buildwise. (2023). *Qu'est-ce que le BIM, pourquoi s'y intéresser?* Buildwise. <https://www.buildwise.be/fr/themes/le-numerique-dans-la-construction/bim/comprendre-le-bim/quest-ce-que-le-bim-pourquoi-s-y-interesser/>

Cecobois. (s. d.). *Pourquoi construire en bois.* Cecobois. Consulté 7 novembre 2024, à l'adresse <https://cecobois.com/pourquoi-construire-en-bois/>

Chen, K., Lu, W., Peng, Y., Rowlinson, S., & Huang, G. Q. (2015). Bridging BIM and building : From a literature review to an integrated conceptual framework. *International Journal of Project Management*, 33(6), 1405-1416. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2015.03.006>

Claude, G. (2019a, octobre 14). *Étude qualitative et quantitative : Définitions et différences.* Scribbr. <https://www.scribbr.fr/methodologie/etude-qualitative-et-quantitative/>

Claude, G. (2019b, octobre 25). *L'entretien de recherche : Définition, utilisation, types et exemples.* Scribbr. <https://www.scribbr.fr/methodologie/entretien-recherche/>

Compilatio. (2024, juillet 24). *Étude qualitative : Définition, objectifs, méthodes et conception.* Compilatio. <https://www.compilatio.net/blog/etude-qualitative>

Debret, J. (2020, mars 6). *Tout savoir sur la partie “méthodologie” de l’article scientifique.* Scribbr. <https://www.scribbr.fr/article-scientifique/methodologie-article-scientifique/>

Delcambre, B. (2014). *Mission Numérique Bâtiment.*

Eastman, C., Fisher, D., Lafue, G., Lividini, J., Stoker, D., & Yessios, C. (1974). *An Outline of the Building Description System.*

Elmualim, A., & Gilder, J. (2014). BIM : Innovation in design management, influence and challenges of implementation. *Architectural Engineering and Design Management*, 10(3-4), 183-199. <https://doi.org/10.1080/17452007.2013.821399>

Fernández, J. (2012). Material architecture : Emergent materials for innovative buildings and ecological construction. *Material Architecture: Emergent Materials for Innovative Buildings and Ecological Construction*. <https://doi.org/10.4324/9780080940441>

Gan, V. J. L. (2022). BIM-based graph data model for automatic generative design of modular buildings. *Automation in Construction*, 134, 104062. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104062>

Gibb, A. G. F. (1999). *Off-site fabrication : Prefabrication, pre-assembly and modularisation.* Whittles.

Groat, L. N., & Wang, D. (2013). *Architectural Research Methods.*

Haas, C. T., O'Connor, J. T., & Tucker, R. L. (2000). *Prefabrication and reassembly trends and effects on the construction workforce.*

Huang, G. Q., Zhang, Y., & Jiang, P. (2008). RFID-based wireless manufacturing for real-time management of job shop WIP inventories. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36(7), 752-764. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0897-4>

Hunt, A. A. (2018). *Wood and Evolving Codes : The 2018 IBC and Emerging Wood Technologies.*

Hurtado, K., & Sullivan, K. (2012). How to measure the benefits of BIM — A case study approach. *Automation in Construction*, 24, 149-159. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.02.008>

Isikdag, U. (2013). *BIM and Off-Site Manufacturing : Recent Research and Opportunities.*

Jang, J., Ahn, S., Cha, S. H., Cho, K., Koo, C., & Kim, T. W. (2020, novembre 6). *Toward productivity in future construction : Mapping knowledge and finding insights for achieving successful offsite construction projects.* <https://academic.oup.com/jcde/article/8/1/1/5959726>

Jin, R., Hancock, C. M., Tang, L., & Wanatowski, D. (2017). BIM Investment, Returns, and Risks in China’s AEC Industries. *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(12), 04017089. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001408](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001408)

Johnny, W., & Kuan, K. L. (2014). Implementing ‘BEAM Plus’ for BIM-based sustainability analysis. *Automation in Construction*, 44, 163-175. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.04.003>

Kasim, T., Li, H., Rezgui, Y., & Beach, T. (2012). BREEAM : Based dynamic sustainable building design assessment: 19th EG-ICE International Workshop on Intelligent Computing in Engineering 2012. *19th EG-ICE International Workshop on Intelligent Computing in Engineering 2012*.

Khosrowshahi, F., & Arayici, Y. (2012). Roadmap for implementation of BIM in the UK construction industry. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 19(6), 610-635. <https://doi.org/10.1108/09699981211277531>

Lebègue, E., & Celnik, O. (2014). *BIM & maquette numérique : Pour l'architecture, le bâtiment et la construction*. EYROLLES.

Lee, H. W., Oh, H., Kim, Y., & Choi, K. (2015). Quantitative analysis of warnings in building information modeling (BIM). *Automation in Construction*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.12.007>

Li, X., Shen, G. Q., Wu, P., & Yue, T. (2019). Integrating Building Information Modeling and Prefabrication Housing Production. *Automation in Construction*, 100, 46-60. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.12.024>

Lu, N. (2007). *Investigation of Designers’ and General Contractors’ Perceptions of Offsite Construction Techniques in the United States Construction Industry*.

Lu, N., & Korman, T. (2010a). Implementation of Building Information Modeling (BIM) in Modular Construction : Benefits and Challenges. *Construction Research Congress 2010*, 1136-1145. [https://doi.org/10.1061/41109\(373\)114](https://doi.org/10.1061/41109(373)114)

Lu, N., & Korman, T. (2010b). Implementation of Building Information Modeling (BIM) in Modular Construction : Benefits and Challenges. *Construction Research Congress 2010*, 1136-1145. [https://doi.org/10.1061/41109\(373\)114](https://doi.org/10.1061/41109(373)114)

Matador, & KIS Studio. (2024). *Vade-mecum Modul R.* https://cellule.archi/sites/default/files/modulr_vademecum_230418.pdf

McKinsey. (2019, juin 18). *Modular construction : From projects to products*. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/modular-construction-from-projects-to-products>

Michon, N. H. (2023, septembre 13). *The future of sustainable building is wood | UNECE*. <https://unece.org/climate-change/news/future-sustainable-building-wood>

Moses, T., Heesom, D., & Oloke, D. (2015). *The Impact of Building Information Modelling (BIM) for Contractor Costing in Offsite Construction Projects in the UK*.

Nawari, N. (2012). BIM Standard in Off-Site Construction. *Journal of Architectural Engineering*, 18, 107-113. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000056](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000056)

Pai Raikar, S. (2024, octobre 23). *Radio-frequency identification (RFID) | Technology, History, & Applications*. <https://www.britannica.com/technology/RFID>

Pan, W., Dainty, A. R. J., & Gibb, A. G. F. (s. d.). MANAGING INNOVATION: A FOCUS ON OFF-SITE PRODUCTION (OSP) IN THE UK HOUSEBUILDING INDUSTRY. *Managing Innovation*.

Panuwatwanich, K., & Peansupap, V. (2013). *Factors affecting the current diffusion of bim : A qualitative study of online professional network*.

Pasquire, C. (2002, janvier). *Considerations for assessing the benefits of standardisation and preassembly in construction*.

Patlakas, P., Livingstone, A., & Hairstans, R. (2015). *A BIM Platform for Offsite Timber Construction*. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2015.1.597>

Quale, J., Eckelman, M. J., Williams, K. W., Sloditskie, G., & Zimmerman, J. B. (2012, mars 5). *Construction Matters : Comparing Environmental Impacts of Building Modular and Conventional Homes in the United States*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1530-9290.2011.00424.x>

Ramaji, I. J., & Memari, A. M. (2016). Product Architecture Model for Multistory Modular Buildings. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(10), 04016047. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001159](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001159)

Ramaji, I. J., Memari, A. M., & Messner, J. I. (2017). Product-Oriented Information Delivery Framework for Multistory Modular Building Projects. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 31(4), 04017001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000649](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000649)

Razkenari, M., Bing, Q., Fenner, A., Hakim, H., Costin, A., & Kibert, C. J. (2019). *Industrialized Construction : Emerging Methods and Technologies*. 352-359. <https://doi.org/10.1061/9780784482438.045>

Rochat, M. (2024). *Cadre conceptuel pour l'intégration du principe DfMA dans une plateforme numérique pour la construction modulaire en bois*.

Saliu, L. O., Monko, R., Zulu, S., & Maro, G. (2024). Barriers to the Integration of Building Information Modeling (BIM) in Modular Construction in Sub-Saharan Africa. *Buildings*, 14(8), 2448. <https://doi.org/10.3390/buildings14082448>

Samarasinghe, T., Mendis, P., & Ngo, T. (2015). *BIM Software Framework for Prefabricated Construction : Case Study Demonstrating BIM Implementation on a Modular House*.

Schade, J., Olofsson, T., & Schreyer, M. (2011). Decision-making in a model-based design process. *Construction Management and Economics*, 29. <https://doi.org/10.1080/01446193.2011.552510>

Scribbr. (s. d.). Méthodologie. Scribbr. Consulté 8 novembre 2024, à l'adresse <https://www.scribbr.fr/category/methodologie/>

Smith, R. E. (2010). *Prefab Architecture : A Guide to Modular Design and Construction.*

Suermann, P., & Issa, R. (2009). Evaluating industry perceptions of building information modeling (BIM) impact on construction. *Electronic Journal of Information Technology in Construction*, 14.

Tan, T., Chen, K., Xue, F., & Lu, W. (2019). Barriers to Building Information Modeling (BIM) implementation in China's prefabricated construction : An interpretive structural modeling (ISM) approach. *Journal of Cleaner Production*, 219, 949-959. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.141>

Thurnell, D., & Stanley, R. (2014, mars). *The Benefits of, and Barriers to, Implementation of 5D BIM for Quantity Surveying in New Zealand.* https://www.researchgate.net/publication/273755303_The_Benefits_of_and_Barriers_to_Implementation_of_5D_BIM_for_Quantity_Surveying_in_New_Zealand

U.N. Environment. (2023, décembre 9). *Building Materials And The Climate : Constructing A New Future | UNEP - UN Environment Programme.* <https://www.unep.org/resources/report/building-materials-and-climate-constructing-new-future>

Vaz-Serra, P., Marfella, G., & Egglestone, S. (2020). *Implications of flat-pack plumbing systems for high-rise construction efficiency.*

Vrijders, J., Morgane, D., de Roissart, E., Denis, F., De Back, T., & Dubois, S. (2023, décembre). *Digital tools for Reuse Linking reuse and contemporary trends in the construction industry.*

Wang, M., Wang, C. C., Sepasgozar, S., & Zlatanova, S. (2020). A Systematic Review of Digital Technology Adoption in Off-Site Construction : Current Status and Future Direction towards Industry 4.0. *Buildings*, 10(11), 204. <https://doi.org/10.3390/buildings10110204>

Warner, P., & Cowles, E. (2013). *Prefabrication and Modularization in Construction.* Studylib.Net. <https://studylib.net/doc/12039226/prefabrication-and-modularization-in-construction-2013-su>

Wasim, M., Vaz Serra, P., & Ngo, T. D. (2022). Design for manufacturing and assembly for sustainable, quick and cost-effective prefabricated construction – a review. *International Journal of Construction Management*, 22(15), 3014-3022. <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1837720>

Won, J., Cheng, J. C. P., & Lee, G. (2016). Quantification of construction waste prevented by BIM-based design validation : Case studies in South Korea. *Waste Management*, 49, 170-180. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.026>

Wong, K., & Fan, Q. (2013). Building information modelling (BIM) for sustainable building design. *Facilities*, 31(3/4), 138-157. <https://doi.org/10.1108/02632771311299412>

Yan, H., & Damian, P. (2008). *Benefits and Barriers of Building Information Modelling*.

Zanni, M., Soetanto, R., & Ruikar, K. (2014). Defining the sustainable building design process : Methods for BIM execution planning in the UK. *International Journal of Energy Sector Management*, 8, 562-587. <https://doi.org/10.1108/IJESM-04-2014-0005>

Zhang, J., Long, Y., Lv, S., & Xiang, Y. (2016). BIM-enabled Modular and Industrialized Construction in China. *Procedia Engineering*, 145, 1456-1461. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.183>

Zhang, L., Wang, G., Chen, T., & He, G. (2014). *Survey of BIM Application Status and Characteristics in China* (p. 969-979). https://doi.org/10.1007/978-3-642-35548-6_100

Zhang, W., Zhang, B., Li, Z., Qiping Shen, G., & Jingke, H. (2018, janvier 20). *Barriers to Promoting Prefabricated Construction in China : A Cost–Benefit Analysis*. *Journal of Cleaner Production*.

9 Annexe

9.1 Le guide d'entretien semi-dirigé

Question de recherche : **Comment le BIM peut-il accompagner la préconception des bâtiments modulaires ?**

Résumé : Mon MÉMOIRE explore la modularité dans la construction en soulignant comment le BIM pourrait optimiser la conception de bâtiments modulaires. Mes lectures révèlent plusieurs obstacles à la diffusion de l'architecture modulaire (délais et coûts dus à la complexité des détails, contraintes de conception, etc.). Mon hypothèse est que le BIM peut répondre à certains de ces défis.

Hypothèses : Le BIM, appliqué aux projets modulaires, pourrait améliorer la conception. Par exemple, grâce à des fonctionnalités comme la « Clash Detection », la modélisation de modules préfabriqués et les simulations d'assemblage.

Méthodologie : Mon approche expérimentale se base sur un projet pilote, « Modul R », de la Fédération Wallonie-Bruxelles. Elle s'appuie sur l'usage du logiciel Revit pour développer une maquette numérique BIM qui servira à tester mes hypothèses.

Objectifs de cet entretien semi-dirigé

- Contexte de base dans lequel grandit le projet Modul R.
- Est-ce que vous aviez déjà fait des projets modulaires avant ?
- Quelle a été la demande de la FW-B ?
- Quelle stratégie de modularité a été utilisée ? Utilisation de modules préfabriqués par composants (mur, toiture, ...). Pourquoi ne pas avoir fait des modules directement assemblés complètement en usine ?
- Enjeux de l'architecture modulaire dans un projet comme le projet Modul R.
 - Quels sont les avantages de développer des projets modulaires comme le projet pilote ?
 - Quelles sont les difficultés d'un projet modulaire lors de la conception ?
 - Quels sont les inconvénients de l'architecture modulaire ?
- Utilisation des logiciels BIM au sein du bureau Matador.
 - Quelles sont les habitudes d'utilisation du BIM dans le bureau ?
 - Pour quelles tâches le BIM est-il utilisé ?

- Enjeux de l'utilisation du BIM dans le projet Modul R.
 - Est-ce que le BIM a été utilisé lors de la réalisation du projet Modul R ?
 - Quels sont les avantages de l'utilisation du BIM dans les projets pilotes ? (Rapidité, gestion de l'information, détection des conflits, ...)
 - Quelles sont les limites de l'utilisation du BIM dans un projet modulaire ? (Manque de personnalisation, difficulté d'utilisation, ...)

9.2 Retranscription de l'entretien avec Matador

Temps total de l'entretien : 00:48:35

Mr. Bourez: { 0:00 }

Ce projet ne nous appartient pas exclusivement, il appartient à tous les partenaires de la recherche. Donc il y a des copyright donc ça se diffuse pas aussi librement. Sinon on te file les informations, tu dois les garder pour toi, ok ?

Dans ton mémoire, on verra ce qui...

Le chercheur: { 0:23 }

Bah de toute façon ça je resélectionnerai les informations que j'ai envie d'y intégrer. Je vous enverrai la liste et comme ça on est sûr que tout est bon.

Mr. Bourez: { 0:32 }

Et après je sais pas, je dois dire c'est quand même assez. Ca a l'air simple mais c'est complexe. Plus complexe qu'il n'y paraît.

Le chercheur: { 0:50 }

Ouais je pense bien voilà. Mais le fait de m'y plonger déjà pas mal. Je m'en rends compte. Et puis législativement parlant, j'ose même pas imaginer.

Mr. Bourez: { 1:00 }

Ouais mais je sais pas si vous euh bah je sais pas c'est quoi le but de ton travail.

Le chercheur: { 1:05 }

En fait c'est de réussir à comprendre les **enjeux de l'intégration du BIM dans le projet modulaire**. Et pour ça il me fallait un cas d'étude. Pour pouvoir justement moi expérimenter et moi essayer d'implémenter ce truc-là dans une application et de voir quels sont les avantages de cette démarche-là. Ouais. J'ai fait une petite liste de questions, s'il faut on peut passer par là.

Mr. Bourez: { 1:28 }

Là moi je maîtrise pas le BIM. Arthur, tu maîtrises le BIM, on maîtrise pas trop le BIM.

Mr. Stache: { 1:32 }

Bah surtout, **ce projet n'est pas du tout pensé avec du BIM**.

Le chercheur: { 1:36 }

C'est ce que je me suis dit en fait on ouvrant justement le vade-mecum là et donc c'est c'était justement là que je trouvais assez intéressant de voir comment par l'œil du BIM ça peut être facilité ou pas, ou est-ce que c'est un frein ?

Mr. Bourez: { 1:48 }

Donc tu vas faire un travail critique peut-être ?

Le chercheur: { 1:50 }

C'est ça, c'est ça.

Mr. Stache: { 1:55 }

C'est parce que **le projet est entièrement dessiné en 2D sur Autocad**.

Mr. Bourez: { 2:02 }

C'est un projet qu'on a commencé il y a 11 ans. Il y a 11 ans, c'était pas aussi développé, c'était les prémisses.

Et encore aujourd'hui, **on entend beaucoup parler mais on voit pas grand-chose**.

Le chercheur: { 2:18 }

C'est sûr.

Le chercheur: { 2:21 }

Bah justement la plupart de ma recherche et la revue de la littérature dit que l'intérêt pour l'architecture modulaire a monté énormément, qui est utilisé de plus en plus. Contrairement au BIM. Bah on voit qu'il y a aucune recherche qui monte aussi. Il n'y a pas autant de recherche au niveau du BIM qu'au niveau de la modularité. Et donc c'est pour ça que justement il y a une porte d'entrée. L'architecture modulaire n'arrête pas d'augmenter au niveau de la recherche et qu'il y a plein de recherches qui se font ou on cite les avantages. Mais il y a presque aucune recherche qui lie justement la modularité avec le BIM.

Mr. Bourez: { 3:03 }

Le BIM c'est : je contrôle tout en 3D ?

Le chercheur: { 3:05 }

Ouais en gros c'est ça toutes les informations et tout ça. Voilà, et c'est ça qui est assez facile. Et moi le petit point que je vais aller chercher dans le BIM parce que c'est super vaste. Il y a plein de choses qu'on peut faire avec. C'est les **détections de conflits**. Et donc c'est par exemple quand

on commence à dessiner en 3D, si on rajoute les tuyauteries, on se rend compte que même si c'est une architecture modulaire et qu'elle est fabriquée en usine, y a quand même des pièces qui seront un peu différentes. Enfin dans le vade-mecum justement, ils en parlent. Enfin vous en parlez avec les salles de sport ,par exemple, qui sont un peu différentes. Mais y a quand même une part dans cette architecture modulaire qui est modifiable et à modifier. J'ai envie de dire avant de l'apporter sur ce site.

Mr. Bourez: { 3:47 }

C'est plus complexe que ça, c'est à dire que **le modulaire trouve des limites**.

Le chercheur: { 3:55 }

Oui, c'est ça.

Mr. Bourez: { 3:56 }

Je peux pas tout faire en modulaire parce que tout ne se met pas et donc c'est il y a pas d'absolu. En fait, quand on fait à la Louvière, il y a pas de salle de sport, mais c'est volontaire. Au départ on a eu dans le programme et puis on s'est dit c'est pas tout à fait une salle de sport dont on a besoin, c'est une salle de psychomotricité, donc c'est une salle de psychomotricité, ça n'a pas besoin d'avoir les attributs d'une salle de sport. Donc c'est devenu, en cumulant une série de classe ça fait une belle salle de psychomotricité, tu vois ? Mais si on avait fait une salle de sport on aurait pas été en modulaire.

Le chercheur: { 4:29 }

Oui, c'est ça.

Mr. Bourez: { 4:31 }

Donc c'est un changement complet.

Mr. Stache: { 4:34 }

Le modulaire est une base et puis y a une quantité de choses qui sont spécifiques à chaque école. Le parement, par exemple.

Le chercheur: { 4:39 }

Oui, c'est ça qui était chouette, c'est pour ça aussi. J'ai repris ce projet là parce qu'il y a beaucoup de projets modulaires en fait ils viennent avec un module entre guillemets qui est répété, il y a moins de place pour d'architecture parce que il y a plus de modification, il y a plus d'ajustement, on peut pas choisir les matériaux, ... On pose un bloc qui est le même partout. C'est la qualité de ce projet-ci qui laisse la place à des petits réglages qu'on peut faire en fonction du projet. Donc ça c'est très intéressant.

Mr. Bourez: { 5:08 }

C'est peut-être pas ton sujet de mémoire en fait mais si à un moment donné **on digitalise ça en 3D, ce qui est quand même intéressant c'est de concevoir avec, directement dans un modèle 3D**

et de pouvoir les assembler et de les mettre en 3D. Donc c'est pas tout à fait le BIM. Parce que le BIM c'est tout en 3D. La moindre vis, le moindre joint, ...

Le chercheur: { 5:35 }

On peut choisir les niveaux justement de détail et tout ça c'est souvent stipulé. Quand on commence une maquette BIM justement, on dit qu'on veut tout modéliser jusqu'à la poignée de porte ou pas spécialement ou juste les modules. On choisit un peu le degré de finition qu'on a envie d'apporter.

Donc, dans ma liste de questions. ***Est-ce que c'est le premier projet modulaire que vous avez fait, celui-ci où il y en avait déjà eu avant ?***

Mr. Bourez: { 5:57 }

Non non. Il ne faut juste pas se tromper. Ça s'appelle Module R, c'est le nom qu'on lui a donné. Moi je trouve que c'est un beau nom mais en même temps Module R c'est modulaire, oui parce qu'on utilise des modules. C'est une recherche. Alors à l'origine le projet c'est quoi ? Comment optimiser toutes les phases d'élaboration d'une école depuis sa conception ? Même depuis son lancement ? Depuis le lancement du marché ou l'étude de faisabilité jusqu'à la livraison du bâtiment ? Comment raccourcir le temps, rationaliser l'argent ? Performer par rapport à tous les niveaux d'exigence aujourd'hui, performance énergétique, ...

Donc c'est une espèce de recherche très spéculative. Et le modulaire est une hypothèse de travail qui est de dire : si on préfabrique une partie des éléments, peut-être que là-dessus **on va augmenter toutes les performances. Donc peut-être que avant tout une école il faut essayer de l'optimiser en terme de module.** Voilà tu vois c'est une espèce de démarche.

Il faudra peut-être qu'on t'explique le projet d'ailleurs, comment on a procédé. Que tu comprennes sa philosophie.

Le chercheur: { 7:27 }

C'est ce que je veux dire au niveau de la demande. ***Est-ce que c'était demandé d'avoir un projet modulaire ? Ou préfabriqué ?***

Mr. Bourez: { 7:40 }

Préfabrication.

Il faudrait relire le cahier des charges. On peut te donner des pièces ? On peut te donner toutes les pièces d'ailleurs. Mais on pourrait te donner peut-être faire une petite liste, Arthur. Comme ça tu peux lire la demande très précisément.

Le chercheur: { 7:59 }

Je cherchais à comprendre si c'était une demande d'avoir un projet modulaire ou alors si c'était un peu la réponse, la meilleure réponse.

Mr. Bourez: { 8:08 }

C'est pas la demande, mais c'est quand même l'intuition. Ouais donc en fait ça vient aussi des années 1960, 1970. Ils ont construit des écoles préfabriquées, ils appelaient ça les RTG et ils en ont construit plein en Wallonie et à Bruxelles. Il y en a énormément et aujourd'hui tous ces

bâtiments sont obsolètes donc ils doivent presque tout renouveler d'un coup toutes les écoles, enfin plein d'écoles.

C'est un marché public, c'est différent du marché privé, ce sont des procédures longues. Ils essaient de trouver une façon de raccourcir toutes ces procédures ? Donc il faut essayer de faire ces écoles. Comment on va dire... pas bon marché parce que c'est pas le but, mais il faut que les dépenses soient justes.

Et en plus, **il faut que les performances soient optimales**. La performance engage des dépenses. Si les écoles sont mal foutues, c'est lourd en entretien. Il y a des questions de bien être des élèves, la lumière, les questions de ventilation.

Tu sais que si on dort en classe, ce n'est pas parce que le prof nous fait chier mais parce qu'on a pas assez de renouvellement d'air.

Tu pourrais lire le cahier de charges et tu pigerais globalement, quels sont tous les enjeux ?

Donc c'est essayer de les faire. Sans devoir réinventer la poudre à chaque projet. Alors c'est un peu contradictoire avec l'architecture. Parce que l'architecture en principe, elle est toujours très spécifique, mais entre le spécifique et le générique, il y a parfois un entre deux. On voit bien qu'on peut répéter une typologie à Bruxelles dans 12 communes et que ça se fabrique quand même.

Nous on a fabriqué quelque chose qui est générique mais qui s'habille de spécificités en fonction du site, de l'orientation, du concepteur, ce qu'il en fait, des demandes complémentaires, du maître d'ouvrage, des exigences urbanistiques, ...

Il y a des régions où il faut construire en bois ou en pierre, il faut construire ceci et tout ça.

Donc c'est une espèce de tentative d'optimiser tout ce qui est optimisable et de laisser spécifique tout ce qui est spécifique, on pourrait dire ça.

Mr. Stache: { 11:09 }

Mais qui permet quand même que **dans sa conception, le module reste un élément de composition. Il y a quand même encore une notion de fabriquer des espaces particuliers.**

Le chercheur: { 11:21 }

C'est ça, c'est ce qu'on sentait justement dans tous les exemples qu'il y avait dans le Vade-Mecum justement que c'est pas parce que c'est le modulaire qu'il y a plus d'architecture, parce qu'on peut créer plein de formes, plein de choses différentes.

Mr. Bourez: { 11:31 }

Il reste un espace pour l'architecte, le concepteur, pas juste pour lui laisser de l'espace et que simplement après, **il y a des choses qui ne se solutionnent pas dans un protocole industrialisés**, préfabriqués. Si on veut que ce soit de qualité, il faut accepter certaines règles du jeu. On en a joué le jeu, on s'est amusé à en dessiner d'autres pour voir si effectivement c'était opérant. Et on voit bien que quand on en dessine d'autres, en fonction de la personne qui la dessine, en fonction du site, en fonction de tas de trucs, bah l'école change fondamentalement. Ça ne change pas vraiment fondamentalement justement l'école change sur toute une série d'aspects.

Le chercheur: { 12:17 }

Pendant la conception, vous avez pensé à faire des modules ? J'allais dire justement qui sont préfabriqués de A à Z de manière volumétrique, et non de manière planaire ?

Mr. Bourez: { 12:25 }

Donc c'est comme c'est une recherche. Ouais, on énonce des hypothèses. Puis on essaye chaque fois de resserrer à telle possibilité, telle possibilité. On les étudie et puis on dit bah nous on a opté pour telle possibilité. Alors nous, notre conviction sur l'élément ici, c'est que si on construit un élément en **3 dimensions, on transporte beaucoup de vides**. Et donc on a plutôt privilégié cette méthode **pour des questions éthiques, minimiser les transports. On fait du 2D et on assemble sur place, ça c'est une prise de position.** C'est aussi lié au fait qu'une école c'est quand même essentiellement des classes et qu'on sait pas transporter un volume de classe. Donc tu vois à supporter c'est un mobile home ou un container de chantier. Et dès qu'on commence à essayer d'assembler 2 containers, ça commence à devenir assez ambigu. Il faut changer toute la façon de penser le container. C'est très bizarre en fait. Et donc nous du coup on a opté pour la préfabrication en 2 dimensions.

Le chercheur: { 13:55 }

Oui, c'est ça.

Mr. Bourez: { 13:56 }

Ouais, et donc c'est tous des éléments qu'on amène. Ca minimise les transports, on assemble sur place et l'autre chose qui nous semblait bizarre, c'est que les efforts dans les éléments, si c'est transportable, ça veut dire il faut pouvoir déplacer un élément et qu'il reste intègre, ça veut dire qu'il est conçu avec des efforts importants. Alors que ces efforts-là ne sont plus nécessaires une fois que c'est sur place, ça c'est un truc bizarre. Et puis il y avait encore un autre truc dans le même débat, si vous faites du modulaire pour fabriquer tout ça, c'est démontable ? Alors non, c'est pas du démontable parce que du démontable, ça suppose plein de précautions qui rendent le projet très sophistiqué, beaucoup plus difficile.

Le but c'est pas de le démonter même si on vise l'économie circulaire plus tard. Le but à priori c'est pas de le démonter donc il vaut mieux faire les choses plus costaud que de faire des choses qui sont assemblées, démontables, qui du coup sont moins costauds.

Il y a tous des débats qu'on a essayé d'approcher. C'est pas de la certitude absolument, c'est de se dire bon, il me semble que ce serait plus cohérent. **On a aussi décidé de travailler avec du bois. Donc si tu travailles en métal, tu es vite plus costaud. Mais comme c'est pas très durable, et cetera, ou c'est pas très écologique, le métal tu l'élimines et donc allons faire du bois.** T'as pas envie de surdimensionner ton bois pour qu'il résiste à des tas d'efforts qui n'ont pas lieu d'être ? Et donc le 2D permettait peut être de ne pas rentrer dans toutes ces questions.

Mr. Stache: { 15:46 }

Il y a aussi une dimension qu'on a peut-être pas anticipée mais qui est l'accès de chantier sur lequel on se questionne beaucoup pendant le chantier maintenant et qui a été absolument impossible avec des volumes.

Le chercheur: { 15:56 }

Oui.

Mr. Stache: { 15:56 }

Alors que même les éléments qui sont long et planaires sont compliqués à amener sur site quand ils pas directement un accès et que dans le cas d'un volume ça doit être absolument inenvisageable. Et donc là ça nous sauve aussi je pense en termes de mise en œuvre.

Le chercheur: { 16:14 }

Mais même au niveau de l'architecture, je pense que ça laisse plus de place justement de faire des éléments 2D que des modules 3D qui à chaque fois sont plus contraints. Si on vient les répéter, ça devient plus standardisé encore et plus optimisé, mais peut-être moins intéressant aussi.

Mr. Bourez: { 16:30 }

3D, c'est vrai, c'est de l'acier souvent. Il faudrait aller voir. C'est souvent de l'acier. On est en train de faire un autre projet. Ils font du 3D, ils font de l'acier.

Mr. Stache: { 16:46 }

Je pense que ***** fait du 3D aussi.

Mr. Bourez: { 16:52 }

Oui, mais ils font des petites maisons.

Mr. Stache: { 16:54 }

Ouais mais c'est pas des programmes publiques.

Mr. Bourez: { 16:57 }

Et donc il se dit : ils font la maison coupée en 2 (je caricature). Et après ils amènent sur site et ils ont la même, ils ont les façades, ils ont tout d'un coup, mais ici pour avoir tout d'un coup... il y a des couloirs, des distributions, il y a une portion de façade, c'est pas la même cohérence. Tant que c'est un petit objet circonscrit, tu peux essayer de le faire et de le transporter. Mais dès que c'est une grande chose, à mon avis, il y a tout ça qui rentre en ligne.

Le chercheur: { 17:33 }

Dans les questions d'après, on a déjà un peu répondu à ça, **quels sont les avantages de développer un projet modulaire comme celui-ci ? Le fait d'optimiser, par exemple, est ce qu'il y en a d'autres ?**

Mr. Bourez: { 17:48 }

C'est de gagner du temps, donc si tu gagnes du temps, **tu gagnes de l'argent. Tu répètes beaucoup de choses donc tu réinventes pas tout et donc tu valorises ce que tu as utilisé.** Si tu mets en place un protocole industriel, tu peux multiplier. C'est un peu comme une voiture quoi. Je caricature mais c'est un peu ça. **On cherche quand même à faire tout ce qu'on pourrait faire dans l'industrie de façon mécanique et puis après on fera de façon artisanale tout ce qui est plus très spécifique. Donc oui, tu utilises des économies d'échelle.**

Je vais quand même mettre un petit bémol, l'idée est pas tout à fait de faire des économies. **C'est pas que des économies, c'est à dire c'est à la fois à la fois tu peux venir à la fois upgrader les écoles dans leur performance.** Parce qu'aujourd'hui si tu vas voir un RTG, ça vaut le coup d'aller voir, c'est juste un il y a de l'amiante partout.

Mr. Stache: { 19:33 }

Tu as eu ce document ? Il est disponible en ligne.

Le chercheur: { 19:34 }

Oui, je l'ai déjà lu en long et en large.

Mr. Bourez: { 19:41 }

Voilà et donc c'est pas simplement de faire des économies.

Si c'est le cas, on peut dégrader la qualité architecturale. C'est comment garder la qualité architecturale dans des prix raisonnables ? Voilà, il y a de ça aussi, mais c'est pas simplement des économies pour des économies, c'est que c'est jouer sur tous les tableaux sans avoir une forme d'équilibre. **Si au moins on a le même prix qu'un projet classique avec des bien meilleures performances. Ça c'est parce que en fait de toute façon on gagne sur le temps d'étude, sur le temps de chantier, sur le temps de location.** Parce que quand on change les écoles y a aussi : Tu dois déménager l'école, donc il faut louer pendant le temps du chantier. Un an, un an et demi, deux ans dans des locaux provisoires, ça coûte très cher tout ça.

C'est des conditions de vie qui sont pas terribles. Donc voilà, ça joue sur plusieurs tableaux. Normalement ça doit être écrit dans le Vade-Mecum. Là si tu lis tout ça, tu vas piger tous les objectifs de la recherche.

Le chercheur: { 21:19 }

Est ce qu'il y a eu des complications pendant la conception à cause de d'utilisation du principe de modularité ? Il y a peut-être des choses qui sont spécifiques à ce domaine-là qui sont un peu plus compliquées peut être.

Mr. Bourez: { 21:41 }

Il y a beaucoup de paramètres supplémentaires auxquels on n'est pas habitué quand on dessine un bâtiment classique par exemple. **Quelque chose qui était très décisif, c'est la dimension des éléments** au-delà de laquelle on ne peut pas aller. Sinon tu passes par en dessous des ponts, tu dois avoir recours à des convois exceptionnels qui coûtent très cher, et cetera, et cetera.

Donc il y a plein de paramètres, la préfabrication, on dit toujours que c'est la panacée mais il y a à boire et à manger, ça dépend de nouveau, il faut tout relativiser. Il y a plein de paramètres comme ça qui sont intervenus. Les capacités de ton industriel, on n'a pas les mêmes capacités dans l'industrie en Belgique qu'en Allemagne. D'ailleurs une des motivations c'est de dire : on promeut le CLT, beaucoup dans la construction, mais aujourd'hui le CLT, on en fabrique pas ici en Belgique. On est obligé d'importer de très loin des CLT, on est obligé d'exploiter des forêts. Le fait de faire ça encourage l'industriel à construire son propre CLT. Donc il y a aussi une espèce de cercle vertueux. **C'est pour éviter justement tous des coûts écologiques qui sont idiots à priori.** Surtout qu'on a plein de forêts en Belgique et on a des menuisiers qui savent travailler le bois. Donc il y a

plein de paramètres. Si tu lis tu vas voir qu'il y a plein, plein, plein de paramètres qui interviennent dedans. Par exemple : la taille de la classe, la taille des éléments, les proportions de la classe. L'autre chose qui est probablement intéressant dans le modulaire, c'est que ça devient plus neutre. Les locaux sont neutres et donc tu les affectes peut être un peu plus librement. D'ailleurs ils sont carrés, ce qui fait que tu peux les aménager aussi de façon très diversifiée. Tu fais une salle en longueur, rectangulaire, orientée avec un tableau, il y a une moins grande souplesse d'appropriation. Il suffit d'enlever une paroi et on peut faire des grandes salles. Alors c'est pas aussi vrai que ce que je te le dis. Parce qu'il y a des questions d'acoustique, il y a des questions, il y a plein de petites astuces comme ça qui à un moment donné, entre le rêve qu'on a et la réalité c'est quand même plus nuancé.

Et donc par exemple, ce qui est chouette, c'est on fait ça et puis on se dit : non ça va pas là. On change et c'est très vite fait. Et souvent le projet est mieux parce qu'on trouve des qualités et tout ça, on réinvente pas tout, on sait qu'on doit jouer là-dedans. **Et donc il y a une fermeté des modules qui donne aussi finalement une forme de liberté ou une forme de souplesse, c'est un paradoxe en fait. Donc ça a des valeurs plutôt architecturales.**

Mr. Stache: { 25:27 }

En fait, **mais c'est ça tout l'enjeu du de créer le bon module, c'est qu'il arrive à garder des ouvertures dans la composition qui soient augmentées différemment, qu'ils puissent être rassemblés les uns avec les autres, qu'ils puissent fonctionner indépendamment dans ce qui est stable structurellement. Donc, c'est d'essayer de faire en sorte que sa composition soit au service d'une composition plus large.**

Mr. Bourez: { 25:48 }

Oui.

Mr. Stache: { 25:50 }

Et peut-être dans les contraintes qu'on a eues qu'on a pas évoquées. On peut pas aller en R+2 parce que si on passait en R+2, ça demandait des conceptions différentes qui engageaient beaucoup trop de matières et qui étaient plus chères pour des modules qui n'étaient pas nécessairement mis en R+2 partout.

Mr. Bourez: { 26:17 }

C'est ça ? Donc c'est ça, mais c'est plus que ça. Comme on sait qu'on doit remplacer des écoles qui sont la plupart du temps, des RTG. Ces RTG sont de plein pied. On sait à priori qu'on a des grands terrains. Si on fait du R +1, on optimise de moitié l'empreinte au sol, alors on pourrait être encore plus exigeant vers R +2 mais R +2 est problématique, comme dans le cas des écoles. À la fois, ils demandent des efforts plus importants dans les structures. C'est ce qu'Arthur disait donc. Un surdimensionnement des structures. Mais pour gagner quoi...? Donc c'est vraiment une équation, un équilibre. Et donc nous avons estimé que le jeu n'en valait pas la chandelle. D'autant plus que dans les écoles, ils sont réticents à faire monter les petits. On peut le faire, on le fait en ville. Si on a la possibilité que ce soit plus spontanément, c'est mieux. Donc le R +3, ouais, dans toutes nos équations, ne n'était pas le plus pertinent. Alors c'est vrai que tu fais du R +3, tu fais moins de fondations, tu fais moins de toitures, ... Alors c'est aussi lié au fait que nous, on a pris

une autre option de ce qui est lié à ça, c'est que en fait, ce qui est difficile à un moment donné dans le bâtiment, on peut rêver tout modulaire, mais à un moment donné, y a des choses qui lient les éléments, les fluides. Tu vois, et donc dès que tu mets de la ventilation, tu es obligé de passer à travers tout. Et donc on a plutôt imaginé que c'était pas un chauffage central, c'était pas une chaudière dédicacée pour toutes l'école. On a fabriqué des modules au-dessus, une série de pompes à chaleur qui alimente 4 ou 8 classes.

Il y a le poids de ça qui doit aller là au-dessus. Et donc si à un moment donné on fait tout ça sur 3 niveaux, ça devient aussi d'une complexité. Ça évite d'avoir des longues gaines, ça évite de devoir réguler de façon complexe, ça veut dire là on peut réguler. Donc notre absolue c'était de faire un appareil, une chaudière par local, mais ça c'était trop, c'était pas performant. Et donc voilà je sais pas ça c'était peut-être pas très bien expliqué. Il y a une série de d'éléments de chauffe. Si à un moment donné il y en a un qui tombe en panne, toute l'école ne tombe pas en panne comme ce sont des éléments qui chauffent. Grosso modo, 4 classes ou 8 classes, c'est quoi ?

Mr. Stache: { 29:24 }

C'est 4 modules.

Mr. Bourez: { 29:26 }

C'est 4 modules, on en a que 4.

Mr. Stache: { 29:49 }

Tu as un circuit chaud et un circuit froid. Elle est ici en toiture. Il y a 2 gaines qui descendent. Ouais bah je peux regarder le plan toiture.

Mr. Bourez: { 29:58 }

Pour voir le nombre de modules qu'on a mis dans l'exécution. Mais voilà, je veux dire c'est il y a aussi tous ces aspects-là qui ont été pris en compte. Après c'est une recherche donc on doit, on va devoir le vérifier une fois que l'école sera construite. On va vérifier, voir si tout ce qu'on a mis en place est effectif. On a aussi éliminé du protocole...

Mr. Stache: { 30:40 }

C'est 4 modules ouais c'est ça ouais.

Mr. Bourez: { 30:43 }

Tu vois il y a 5 corps de chauffe pour l'école. Du coup, on a que des gaines verticales. On n'a pas de gaines horizontales. En fait, on a des gaines horizontales une fois qu'on a mis dans les classes et donc c'est tous les entre-poutres.

Là, je trouve que ça c'est pas hyper élégant pour l'instant.

Mr. Stache: { 31:05 }

Et de nouveau, ça, c'est un équilibre pour permettre de la composition un peu plus libre. Mais si c'était purement un choix économique, ça serait pas celui qu'on ferait non plus. C'est plus cher de faire une unité par 4 locaux que une unité centrale.

Mr. Stache: { 31:23 }

Parce qu'il me semble, il me semblait quand même que c'était une question que ***** avait soumise.

Mr. Bourez: { 31:28 }

Ils disaient que c'était beaucoup plus cher.

Mr. Stache: { 31:31 }

Ça, le sous-traitant disait, c'est beaucoup plus cher de faire ça que.

Mr. Bourez: { 31:35 }

Ouais ouais, il faudrait oui ça, il faudrait chiffrer la chaudière, la ventilation, chiffrer les gaines, les gaines horizontales. Ce n'est pas qu'un coût de l'installation en soi, c'est aussi l'impact que ça a sur le bâtiment en fait.

Mr. Stache: { 31:54 }

Et probablement local aussi, qui peut être dédié à cette chose-là ?

Mr. Bourez: { 32:02 }

Oui et puis c'est une usine à gaz, on est obligé de tout chauffer tout le temps. On va construire et on va évaluer par après. Et **pendant un an d'usage on va être évalué**.

A éliminé aussi tout ce qui était site complexe.

Le chercheur: { 32:45 }

Ok.

Mr. Bourez: { 32:46 }

Parce que comme c'est marginal, si on fait peser cette marginalité là sur un protocole qui se veut simple, il va devenir trop compliqué. Et donc nous, on a d'emblée séparé les sites de RTG plats et simples, sans difficultés d'accès. Et si elle vous donnait un site spécifique, l'architecture reprend ses droits classiques, on fait un projet classique, c'est très bien comme ça et parfois on peut faire un truc mixte.

Mr. Stache: { 33:16 }

Ouais, c'est ça avec un niveau traditionnel et puis le module libre qui vient se mettre au-dessus.

Mr. Bourez: { 33:21 }

Alors l'avantage de modules, tu peux faire une extension dans un petit village de classe, tu commandes 2 classes. Tu mets un corps de chauffe pour les 2 classes parce que c'est ça aussi une idée et tu livres tes 2 classes. Une petite école de village a maintenant 2 classes supplémentaires vertueuses, bien éclairées, économique en énergie,...

Le chercheur: { 33:45 }

C'est une question que j'avais pas notée mais à laquelle je viens de penser. *Est ce qu'on pourrait envisager un justement le fait d'agrandir une école ? Par exemple, on crée une école qui a un module comme celle-ci, puis en fait la population double dans ce village-là et on vient donc rajouter des modules par la suite à côté.*

Mr. Bourez: { 34:01 }

Enfin si la population double, on va faire une 2e école. Oui, je veux dire mais oui mais donc ça alors ça c'est un truc. Par exemple, si on prend ce cas-ci, on voit pas comment on ferait quand on utilise les modules. Donc ça c'est pas nécessairement évident, mais **ça pourrait être une donnée de départ, c'est à dire on pourrait dire : il se pourrait qu'elles doivent s'agrandir. Donc ça va faire partie des critères de conception. On reste concepteur, on fait ça, c'est pas c'est pas un produit qu'on achète, c'est pas un clé sur porte.**

Le chercheur: { 34:39 }

Voilà et **dans les questions par rapport au BIM. Ça n'a vraiment pas été envisagé de de travailler avec ces logiciels-là ? Par exemple Revit pendant la conception de ce projet ?**

Mr. Bourez: { 34:49 }

Bah c'est parce que d'abord, nous on a pas de BIM. Maintenant on commence à avoir un BIM manager puisqu'on travaille sur Archicad. Comme on est dans des procédures classiques de fabrication de projet, avec un ingénieur en stabilité, des ingénieurs en technique,... Pour harmoniser les outils, c'est pas évident. Donc pour moi c'est un peu... Mon inquiétude avec le BIM, c'est tout de suite des grosses opérations. Il y a beaucoup de choses qui ont été modélisées. D'ailleurs toi tu aurais probablement intérêt à rencontrer *****. Et eux ils ont modélisé bien le truc en fait. Pour la construction à partir de nos fichiers mais c'est pas un BIM 3D dans lequel tout est parfaitement modélisé.

Mr. Stache: { 35:53 }

Mais ils ont sûrement un module.

Mr. Bourez: { 35:55 }

Mais ils ont probablement un module bien modélisé et eux ça va loin parce que ça va jusqu'aux fixations, y a tout qui rentre et qui est dedans en fait.

Le chercheur: { 36:06 }

Ok, je vais les recontacter justement. J'avais envoyé un mail pour aller visiter le projet pilote. Je sais pas s'il est toujours en place. Pas celui à la Louvière, mais le projet qu'ils ont fait au tout début.

Mr. Bourez: { 36:15 }

Oui mais le Mockup il est construit hein tu sais ? Ah oui donc tu peux aller voir 2 modules.

Le chercheur: { 36:24 }

Je les ai contacté mais j'ai pas encore eu de réponse.

Mr. Bourez: { 36:26 }

Tu peux peut-être dire que tu nous as contacté, que nous a rencontrés, tu peux nous mettre en copie, ça huilera les échanges.

Le chercheur: { 37:14 }

C'est sûr, donc ici **vous avez travaillé surtout en 2D du coup vous n'êtes pas beaucoup modélisé en 3D ?**

Mr. Stache: { 37:28 }

Uniquement en 2D, seulement des petites axométries.

Le chercheur: { 37:37 }

Voilà, je pense que j'ai plus ou moins fait le tour de toutes mes questions.

Mr. Bourez: { 37:42 }

Mais ce qui serait bien, que tu me dise ce dont tu as besoin. Qu'on puisse communiquer ?

Mr. Stache: { 37:54 }

Tu as mon mail.

Mr. Bourez: { 39:53 }

Voilà mais donc c'est un premier, je sais pas, un premier échange. Après tu peux nous solliciter à nouveau. Bah je sais pas où tu veux aller exactement.

Le chercheur: { 40:05 }

Le but ici de la discussion c'était surtout d'implémenter un peu plus de discussion justement, un truc un peu moins théorique et d'arriver à comprendre comment est-ce qu'on ressent un projet modulaire, comment est-ce qu'on le conçoit ? Donc vous avez plutôt bien répondu.

Mr. Bourez: { 40:40 }

Oui, mais c'est un écrit ?

Le chercheur: { 40:41 }

C'est un écrit, oui.

Mr. Bourez: { 40:41 }

Il n'y a pas de projet ?

Le chercheur: { 40:43 }

Non, il n'y a pas de projet.

Après, dans mon cas, il y a un peu de projet dedans comme je viens modéliser et que je viens utiliser justement l'entrevue ici, la revue de la littérature et la modélisation que je fais-moi même pour tester justement les limites.

J'ai modélisé 3 modules pour faire une classe.

Mr. Bourez: { 41:07 }

Ca peut être intéressant de le modéliser tel qu'il va être construit ?

Mr. Stache: { 41:12 }

Je peux t'envoyer les plans. Tu t'es basé sur quoi ?

Le chercheur: { 41:16 }

Sur le Vade-Mecum.

Mr. Bourez: { 41:18 }

Pas sûr que ça soit un niveau de définition, ah si quand même.

Le chercheur: { 41:23 }

Oui, ça allait. Après ça restait assez sommaire. C'était plus pour voir justement les conflits entre la structure de base et la technique.

Mr. Bourez: { 41:36 }

Mais si tu veux le modéliser, si tu te sens en attaque de le modéliser à fond, il faut qu'on t'envoie les plans.

Le chercheur: { 42:01 }

Bah pourquoi pas. Après de ça, de nouveau le niveau de définition c'est moi qui vais devoir le pré-déterminer.

Mr. Bourez: { 42:06 }

Précis, bah, on pourrait t'envoyer éventuellement.

Le chercheur: { 42:12 }

Le projet est déjà modélisé en partie mais c'est pas super précis justement parce que je m'étais basé sur le Vade-Mecum.

Mr. Bourez: { 42:18 }

Après tu peux faire un pas de côté et faire ton propre dimensionnement, assemblage et tout ça. Tu peux avoir ça comme base. Enfin tu n'es pas obligé d'avoir le même niveau de définition parce que là tout est là. Les joints, les joints de fractionnement, les éléments de façade.

Mr. Stache: { 42:51 }

À mon avis, là où ça pourrait être vraiment intéressant le BIM dans ce cas-ci c'est que ça parce que l'idée avec le Vade-mecum c'est aussi de faire un cahier des charges type. C'est que le BIM puisse lui-même choisir les postes et les quantités. Je pense que là il y a un intérêt à travailler avec le BIM. Du coup tu dessines une école, tu la modélises enfin tu la dessines avec la modélisation ou tu la modélises par après. Puis ton dossier d'exécution est déjà presque fini.

Le chercheur: { 43:18 }

Ici dans les avantages justement que je vais soulever c'était par exemple, la gestion de conflit. Et puis après ça justement d'avoir un inventaire de tous les matériaux. En sachant qu'on a besoin d'autant de sols, on a besoin d'autant de modules, de couloirs et donc de les quantifier rapidement et d'avoir une facilité de l'entreprise, de comprendre. On a besoin X modules de sols qui sont pas modifiés du tout et puis on en a X spéciaux.

Mr. Bourez: { 43:44 }

Ca c'est une plus value de la modélisation avec des petits obstacles pour le moment quand je pense notamment à la dalle de sol bah elle rentre pas dans...

Mr. Stache: { 43:53 }

Ouais, elle est spécifique.

Mr. Bourez: { 43:54 }

Elle est spécifique. Par contre le plancher du premier, il est générique. Celui de toiture, il est générique. Ouais mais ça c'est à mon avis, c'est un travail plus lourd.

Mr. Stache: { 44:07 }

Dans l'idéal du BIM.

Mr. Bourez: { 44:09 }

Dans l'idéal, c'est ça. Ah oui, ça se serait effectivement parce qu'à ce moment-là, tu prends tes modules, tu travailles. Tu vois déjà où tu es sur les éléments génériques et après tu complètes avec ce qui est spécifique. C'est un peu ça qu'on avait fait : qui est générique ça va coûter autant et c'est calculé d'une certaine manière. Et puis ce qui est spécifique, on vient avoir des procédures classiques parce que c'était pas modélisé non plus. On peut modéliser aussi tout ce qui est spécifique. Mais l'intérêt c'est effectivement plutôt le générique.

Mr. Stache: { 44:45 }

Puis ça donne une échelle directement parce que à force d'en faire, y a des ratios qui vont apparaître aussi.

On avait quantifié la part de générique, la part de spécifique. C'est des choses qui, à force d'en faire vont se stabiliser un peu.

Il y a aussi des choses qui sont pas dites génériques parce que le projet a pas été jusque-là, mais une fois qu'on les a dessiné pourrait le devenir. Un élément toilette maternelle ou primaire n'est pas un générique mais pourrait le devenir. C'est aussi le travail de jusqu'où tu vas dans le dessin du module.

Mr. Bourez: { 45:29 }

Mais c'est aussi la limite de notre commande.

Mr. Stache: { 45:33 }

Bah c'est ça ouais.

Mr. Bourez: { 45:34 }

A un moment donné, on avait une limite de commande et donc on a dit doucement. C'est beaucoup de travail, la préfabrication. Arthur est en train de suivre un chantier où il y a beaucoup de préfabriques béton. Bah c'est plus de travail la préfabrication qu'un chantier classique.

Le chercheur: { 45:54 }

À quel niveau ? Au niveau de la conception ?

Mr. Bourez: { 45:59 }

Il faut tout définir et de façon très précise. Et là c'est beaucoup plus de travail. Et d'ailleurs la préfabrication en elle-même n'est pas seulement plus économique. Elle est plus performante constructivement, elle a plein de vertus. Mais l'économie, ça reste à vérifier.

Le chercheur: { 46:17 }

J'ai un gros chapitre dans mon mémoire justement qui parle de ça moins « 50% sur vos chantiers », puis après il y en a d'autres qui disent +20 % parce que justement il y a eu des complications. Une préfabrication qui était mal menée avec des erreurs de conception. Ça sera plus sur le long terme de voir avec X projets et de faire une moyenne. Ca répond bien à mes questions.

Mr. Stache: { 46:51 }

Si tu en as d'autres, tu peux passer par écrit.

Le chercheur: { 46:55 }

Au niveau des documents, si ça vous dérange pas, je veux bien les plans pour voir si j'ai envie d'aller plus loin dans la modélisation ou pas. Et la demande de la Fédération Wallonie Bruxelles pour voir justement quelle était la demande.

Mr. Bourez: { 47:11 }

Dans le cahier des charges, tu auras deux choses, il y aura toute la procédure. Tu vas avoir toute la procédure de mise en concurrence des architectes avec les rapports et à la fin le cahier des charges. Comme ça tu auras un peu l'historique.

Mr. Stache: { 47:28 }

Le cahier des charges d'il y a dix ans.

Mr. Bourez: { 47:35 }

L'escalier pourrait être générique.

Mr. Stache: { 47:42 }

En fait les escaliers ils sont tellement contraints en les dessinant on se rend compte que les choses on a même eu du mal. On peut pas les faire remplir une fois qu'ils sont dessinés. Euh. Si on doit faire une école demain, on reprend le même et on l'injecte.

Et probablement que le dessin sera revu à la marge après le chantier, parce qu'il y aura plein de trucs qui vont être questionnées.

Le chercheur: { 48:09 }

Oui, c'est sûr.

Mr. Stache: { 48:11 }

Le détail sera peut-être pas le même ?

Mr. Bourez: { 48:16 }

Voilà, allez, je vous laisse. Je vous abandonne si tu n'as plus de questions.

Tu nous tiens au courant de la date de ton jury.

Le chercheur: { 48:34 }

Bien sûr, normalement ce sera fin Janvier.

Merci pour tout.

