

BIM : DEUX ECOLES

ETUDE DES DIFFERENCES DE MODELISATION PARAMETRIQUE DANS REVIT

ENTRE ETUDIANTS ARCHITECTES ET INGENIEURS



LOUISE MATHES

MÉMOIRE DE MASTER

par Louise MATHES

Etude des différences de modélisation paramétrique
dans revit entre étudiants architectes et ingénieurs

Dans quelles mesure les ingénieurs et les architectes modélisent-ils
différemment une famille paramétrée dans Revit ?

Savoir des Activités de Projets Instrumentés

Encadré par Joaquim Silvestre et Anne Tüscher

ENSA Paris la Villette,
Janvier 2025

Je tiens d'abord à remercier les enseignants qui ont dirigé mes recherches

Anne Tüscher, Joaquim Silvestre, François Guéna et Léa Sattler

Je suis également grandement reconnaissante envers Riccardo Raimondo architecte et BIM manager, qui m'a introduit au BIM et m'a donné envie d'explorer ce sujet. Je le remercie aussi pour sa disponibilité tout au long de la rédaction de ce mémoire et ses bons conseils.

Enfin je tiens à remercier les dix élèves de mes deux écoles, l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris La Villette (ENSAPLV) et l'Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris (EIVP) qui ont participé à cette recherche. Sans eux ce mémoire n'aurait pas été possible.

Page de couverture : Photo personnelle de la façade de l'UFO, Paris II, Sentier

Résumé

Ce mémoire explore les différences de modélisation paramétrique dans Revit entre étudiants ingénieurs et architectes, avec pour objectif d'identifier comment ces deux groupes, formés dans des contextes académiques différents, abordent la création d'une famille paramétrée, en l'occurrence une fenêtre. Cette étude s'inscrit dans le cadre de la collaboration interdisciplinaire requise par le Building Information Modeling (BIM), un outil central dans les projets de construction de nos jours. Comprendre s'il existe des divergences de méthodes entre ingénieurs et architectes est un bras de levier pour optimiser les processus BIM, où l'intégration et la coordination entre les disciplines jouent un rôle déterminant.

Pour répondre à cette problématique, j'ai mis en place une expérimentation comparative, impliquant deux groupes de cinq étudiants chacun, issus de l'École des Ingénieurs de la Ville de Paris (EIVP) et de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris La Villette (ENSAPLV). Après avoir renseigné un questionnaire initial, les participants ont réalisé un exercice de modélisation paramétrique consistant à concevoir une fenêtre dans Revit. L'analyse des données obtenues, comprenant les fichiers Revit, les enregistrements vidéo et l'intégration des familles au sein d'une maquette numérique, permet d'identifier les tendances dans leurs approches de modélisation, ainsi que les points de convergence et de divergence.

Les résultats mettent en lumière quelques différences entre les ingénieurs, plutôt orientés vers la précision technique, et les architectes, privilégiant la flexibilité. Ces conclusions soulignent l'importance de l'adaptation des formations Revit au sein des écoles d'ingénierie et d'architecture pour faciliter la collaboration interdisciplinaire dans le monde professionnel.

Mots clés : Modélisation paramétrique • Revit • Ingénieurs • Architectes
• Collaboration interdisciplinaire • Building Information Modeling (BIM)

Abstract

This thesis explores the differences in parametric modeling in Revit between engineering students and architects, with the aim of identifying how these two groups, trained in different academic contexts, approach the creation of a parameterized family, in this case a window. This study is part of the interdisciplinary collaboration required by Building Information Modeling (BIM), a central tool in today's construction projects. Understanding whether there are differences in methods between engineers and architects is a lever for optimizing BIM processes, where integration and coordination between disciplines play a decisive role.

To address this issue, I set up a comparative experiment, involving two groups of five students each, from the École des Ingénieurs de la Ville de Paris (EIVP) and the École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris La Villette (ENSAPLV). After completing an initial questionnaire, participants completed a parametric modeling exercise consisting of designing a window in Revit. The analysis of the collected data, including Revit files, video recordings and the integration of families within a digital model, makes it possible to identify trends in their modeling approaches, as well as points of convergence and divergence.

The results highlight some differences between engineers, who are more oriented towards technical precision, and architects, who favour flexibility. These findings underline the importance of adapting Revit training within engineering and architecture schools to facilitate interdisciplinary collaboration in the professional world.

Keywords: Parametric Modeling • Revit • Engineers • Architects • Interdisciplinary Collaboration • Building Information Modeling (BIM)

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| Glossaire | 0 |
| Avant-Propos | 1 |
| Introduction | 3 |
| 1. Comprendre le BIM et ses enjeux | 5 |
| 1.1 Cadre conceptuel et terminologique du BIM | 7 |
| 1.2 La révolution du BIM dans le secteur de la construction | 15 |
| 1.3 Conflits préexistants entre architectes et ingénieurs | 25 |
| 2. Enonciation de la problématique | 33 |
| 3. Méthodologie | 35 |
| 3.1 Définition de l'hypothèse de recherche et du cadre experimental | 36 |
| 3.2 Détermination des axes de comparaison | 44 |
| 3.3 Conception de la grille d'observation | 49 |
| 3.4 Méthode d'analyse des resultats par axe | 53 |
| 3.5 Configurations de résultats envisagées et interprétations possibles | 54 |
| 4. Analyse des resultats | 56 |
| 4.1 Présentation des resultats | 57 |
| 4.2 Analyse comparative des trois axes | 64 |
| 4.3 Bilan global | 70 |
| 5. Validation de l'hypothèse principale | 71 |
| 5.1 Rappel de l'hypothèse et des configurations attendues | 72 |
| 5.2 Confrontation avec les résultats observés | 73 |
| 5.3 Limites et perspectives | 75 |
| 6. Conclusion | 78 |
| Liste des figures | 81 |
| Références | 83 |

Glossaire

BIM (Building Information Modeling) : Processus basé sur des modèles 3D offrant une représentation numérique des caractéristiques physiques et fonctionnelles d'un bâtiment, intégrant données et informations tout au long du cycle de vie d'un projet.

BIM Manager : Professionnel chargé de coordonner l'implémentation et l'utilisation du BIM au sein d'un projet ou d'une organisation, assurant la cohérence des processus et des échanges de données.

Catégorie : Groupe général d'éléments dans Revit (murs, fenêtres, portes, etc.) définissant leurs caractéristiques communes et leur comportement de base.

Extrusion : Opération consistant à créer un volume 3D en projetant une forme 2D selon une direction et une distance donnée.

Famille : Groupe d'éléments partageant des paramètres et des utilisations communes, permettant de créer des variations d'un même objet. (Porte simple, Porte double, Porte tierce)

Famille paramétrique : Famille dont les caractéristiques peuvent être modifiées dynamiquement grâce à des paramètres définis.

Formation : se réfère à l'apprentissage de Revit en particulier

Formation initiale : se réfère spécifiquement au cursus suivi par l'étudiant : à l'EIVP ou à l'ENSAPLV

Gabarit : Modèle de base définissant les paramètres initiaux et les règles de création pour une famille.

IFC (Industry Foundation Classes) : Format d'échange standardisé permettant l'interopérabilité entre différents logiciels BIM, basé sur un modèle sémantique d'objets.

Interopérabilité : Capacité des différents logiciels et systèmes BIM à échanger et utiliser des informations de manière cohérente.

Maquette centrale : Fichier principal d'un projet Revit partagé entre plusieurs utilisateurs, permettant le travail collaboratif.

Maquette numérique : Représentation digitale complète d'un projet de construction, incluant géométrie et données.

Paramètre : Variable contrôlant une caractéristique spécifique d'un élément (dimension, matériau, visibilité, etc.).

Plan de référence : Plan virtuel servant de guide pour la construction géométrique et le contrôle des éléments dans une famille.

Type : Variation spécifique au sein d'une famille, définie par un ensemble de valeurs de paramètres. (Porte Simple 90x210 ; Porte Simple, 80x210)

Parcours : pour décrire l'ensemble des expériences d'apprentissage de l'étudiant : comprend la formation initiale, la formation, l'apprentissage autodidacte, les expériences professionnelles

Protocole BIM : Document définissant les règles et standards de modélisation, d'échange et de collaboration dans un projet BIM.

Sous-catégorie : Subdivision d'une catégorie permettant une organisation plus fine des éléments et un contrôle précis de leur apparence. (Vitrage, Dormant, Ouvrant)

Synchronisation : Processus de mise à jour de la maquette centrale avec les modifications effectuées par les différents intervenants.

Avant-Propos

Tout au long de ce mémoire j'ai choisi d'étudier la question des relations entre ingénieurs et architectes dans la pratique du BIM.

De mon parcours en double diplôme c'est un sujet qui me tient tout particulièrement à cœur car j'ai toujours été confrontée à ces deux mondes évoluant en parallèle. Je suis à la fois « l'Architecte » pour les ingénieurs et « l'Ingénieur » pour les architectes. En effet, c'est après mes deux années en Classe Préparatoire aux Grandes Ecoles que j'ai dû apprendre à me dédoubler, être « un double JE », pour être dans deux écoles. J'étais formatée pour déterminer la couleur de la Lune totalement éclipsée, ou encore pour démontrer le théorème de Gerstenhaber, mais je n'étais pas formatée pour concevoir des projets et laisser libre cours à ma créativité en répondant à des exigences sociales, urbaines, constructives. C'est ainsi que la réalité m'a frappé, mes méthodes de travail acquises pendant ces deux années ne me seront d'aucune utilité, il faudra adapter mon rythme, adapter mes méthodes et adapter mes échanges.

Par ailleurs, au fil de mes études j'ai eu l'occasion d'effectuer des expériences professionnelles qui ont été la scène d'une rivalité entre les ingénieurs et les architectes. En effet, que ce soit sur le chantier ou en agence, l'ennemi est, paradoxalement, celui avec qui on collabore. Lorsque je suis conductrice de travaux c'est la faute de l'architecte si je ne peux pas disposer la CVC au-dessus du faux-plafond. Inversement, lorsque je suis en agence, c'est la faute de l'ingénieur si je ne peux pas réaliser le projet que j'ambitionne. Dès lors, frappée par ce double discours je me suis questionnée sur comment pourrions-nous y remédier ? D'autant plus que par mon expérience à Rome en Italie, où la formation initiale n'est pas séparée mais bien combinée, j'ai compris qu'il était possible d'allier les deux corps de métier.

Ce mémoire est donc né de l'envie de comprendre cette double dynamique et de mettre en lumière comment la collaboration pourrait être impactée par les différents parcours des étudiants. Pour cela, j'ai choisi d'analyser un outil communément utilisé dans les deux professions : Revit. Ce logiciel de modélisation 3D qui est utilisé dans une démarche de Building Information Modelling (BIM), permet d'intervenir dans chaque phase du projet et est utilisé par tous les acteurs de la construction. Analyser les modes de modélisation des deux groupes réalisant un même exercice sur ce logiciel me permet d'évaluer s'il existe des différences lors de la modélisation.

Introduction

Depuis 2010, le BIM (Building Information Modelling) s'est imposé comme un outil déterminant dans la modélisation des projets dans le monde de la construction, pour les architectes et les ingénieurs. Ce modèle numérique permet la modélisation d'un projet en 3D tout en centralisant les informations techniques et opérationnelles d'un projet.

Pourtant, bien que le BIM ambitionne de faciliter la collaboration entre tous les intervenants il se révèle encore limité. [1] En effet, la communauté scientifique s'accorde sur le manque d'interopérabilité entre les différents logiciels constituant le BIM[2], mais pour le moment aucune recherche ne démontre si les différents parcours des utilisateurs pourraient être à l'origine des difficultés de collaboration dans l'usage des logiciels.

En effet, dans un logiciel comme Revit, qui sépare les actions relevant du modèle architectural et celles du modèle d'ingénierie, les utilisateurs peuvent adopter plusieurs méthodes pour réaliser une même action au sein de la maquette numérique.[3] Bien que ces méthodes puissent produire des objets visuellement similaires, elles diffèrent sur des points tels que la catégorisation des éléments, par exemple, une rampe et un sol en pente sont deux éléments similaires mais n'appartiennent pas à la même catégorie. Ainsi, lors du partage des maquettes entre les architectes et les ingénieurs cela peut devenir un sujet de discordance supplémentaire aux conflits déjà existants dans la chaîne de production architecturale. [4]

Dès lors, ce mémoire s'inscrit dans le contexte de l'évolution rapide des technologies numériques et de leur adoption croissante dans le secteur de la construction.[5] Il vise à identifier si les architectes et les ingénieurs adoptent des approches de modélisation différentes dans Revit. Pour cela, leurs méthodes respectives seront analysées, en particulier lors de la création de familles paramétrées. En effet, étant un ensemble d'objets modélisés dont les caractéristiques sont ajustables dynamiquement à l'aide de paramètres, les familles paramétrées permettent de créer plusieurs variantes d'un même élément et s'insèrent dans la maquette de base. De plus, étant donné leur

échelle, la complexité de leur réalisation dans un temps donné reste raisonnable. Aussi, toute erreur de modélisation au sein de la famille sera répercutée dans la maquette et sera alors le témoin du niveau de maîtrise du logiciel.

Dans une première partie, un état de l'art du contexte actuel du BIM sera exposé dans le monde de la construction afin de comprendre les mécanismes de la production d'un projet usant du logiciel Revit. Cette partie analysera également les conflits préexistants entre architectes et ingénieurs, tant dans leur formation initiale que dans leurs relations professionnelles. C'est ainsi que je pourrai assoir la problématique pour détailler ensuite le protocole expérimental permettant d'y répondre.

Dans une deuxième partie, nous présenterons la méthodologie détaillée de l'étude, incluant la définition de l'hypothèse de recherche, le cadre expérimental et les axes de comparaison choisis. Cette partie exposera également la conception de la grille d'observation et les méthodes d'analyse des résultats.

Dans une troisième partie, nous analyserons les résultats obtenus selon les trois axes définis : le respect des consignes, la structuration et le paramétrage, et la flexibilité des modèles. Cette analyse sera suivie d'une validation de l'hypothèse principale et d'une discussion des limites et perspectives de l'étude.

1. Comprendre le BIM et ses enjeux

Les modes de représentation de l'architecture ont évolué, depuis les principes fondamentaux établis par Vitruve dans son traité « De architectura » au 1^{er} siècle avant J-C, « utilitas, firmitas, venustas » jusqu'à l'avènement du Building Information Modelling (BIM). Durant la Renaissance, des architectes clés comme Filippo Brunelleschi, avec son développement de la perspective linéaire, Léon Battista Alberti, avec « De reaedificatoria », ou encore Palladio, avec « I quattro libri dell'architettura », ont révolutionné la représentation architecturale en intégrant les principes vitruviens dans une pratique modernisée.

C'est à la fin du 20^e siècle que les premiers outils de Dessin Assisté par Ordinateur (DAO) introduisent un tout nouveau mode de représentation qui impactera drastiquement les méthodes de représentation des architectes et des ingénieurs. Mario Carpo, théoricien contemporain, considère la conception assistée par ordinateur comme la « première révolution numérique dans l'architecture »[6] elle aurait changé nos méthodes de représentation et par conséquent la façon de concevoir les projets, marquant profondément l'architecture contemporaine.

Aujourd'hui, avec l'émergence du BIM, nous assistons à ce que Carpo qualifie de "deuxième révolution numérique"[7]. Cette évolution ne se limite pas à un simple changement d'outils : elle transforme fondamentalement la façon dont les acteurs du bâtiment conçoivent, construisent et gèrent les projets. [8] De plus, le BIM modifie non seulement nos manières de représenter l'architecture mais aussi nos façons de penser la conception elle-même. [1]

Cette transformation numérique s'inscrit dans un contexte où l'industrie de la construction doit faire face à des défis croissants de productivité et de collaboration. [9] Le BIM, en tant que plateforme collaborative, promet de répondre à ces enjeux en facilitant l'échange d'informations entre les différents acteurs du projet. Cependant, l'adoption de ces nouvelles pratiques soulève des questions fondamentales sur l'évolution des métiers et des compétences dans le secteur de la construction. [5]

C'est pourquoi, pour comprendre pleinement les enjeux du BIM dans l'industrie de la construction actuelle, il convient d'abord de définir précisément ce qu'est le BIM, ses composantes et ses outils, notamment Revit qui s'impose comme un logiciel de référence. Plus particulièrement, nous examinerons la structuration des familles paramétrées qui constituent une interface commune de travail entre ingénieurs et architectes. Ensuite, nous analyserons comment le BIM s'intègre et transforme une industrie du bâtiment déjà établie, en mettant l'accent sur son impact dans les différentes phases du projet et sur les divers acteurs de la construction. Enfin, nous examinerons les limites actuelles de cette intégration, notamment les nouveaux défis qu'elle soulève dans la collaboration entre ingénieurs et architectes. Cette analyse nous permettra de mieux comprendre le contexte dans lequel s'inscrivent les relations entre ces deux corps de métier face à ces nouveaux outils.

1.1 Cadre conceptuel et terminologique du BIM

Avant d'analyser l'impact du BIM sur les pratiques des ingénieurs et des architectes, il est essentiel d'établir un cadre conceptuel clair. En effet, la complexité de cet outil et la diversité de ses applications nécessitent une définition précise de ses composantes et de sa terminologie. Cette clarification permettra non seulement de comprendre les fondements du BIM, mais aussi d'appréhender comment les différents acteurs se l'approprient dans leur pratique professionnelle.

Dans cette optique, nous examinerons d'abord les principes fondamentaux du Building Information Modeling, en nous appuyant sur les définitions normalisées tant au niveau international que national. Ensuite, nous nous concentrerons sur Revit, l'un des principaux logiciels BIM, en analysant ses spécificités et son rôle dans la modélisation paramétrique. Enfin, nous approfondirons la notion de familles paramétrées, composantes essentielles de la modélisation BIM qui constituent un point de convergence entre les pratiques des ingénieurs et des architectes.

Cette progression nous permettra d'établir les bases conceptuelles nécessaires pour comprendre les enjeux de l'utilisation du BIM dans la collaboration interdisciplinaire.

1.1.1 Le Building Information Modeling : principes fondamentaux

Dans un premier temps, le BIM peut se définir à l'échelle mondiale. En effet, de nombreux pays ont mis en place des normes et des directives pour encourager son utilisation. Aujourd'hui l'US National BIM Standards donne une définition du BIM à laquelle tous les acteurs internationaux adhèrent :

“BUILDING INFORMATION MODELING:

Generating and using a shared digital representation of a built environment asset to facilitate design, construction, and operation processes to form a reliable basis for decisions.” [10]

Ainsi, à partir de cette définition internationale, le **BIM pourrait se résumer en une maquette numérique partagée utilisée à chaque étape du projet afin d'avoir une base fiable pour la prise de décision.**

De plus, il est important qu'à l'échelle nationale le lexique soit lui aussi homogénéisé afin de permettre la collaboration des acteurs français à tous les niveaux. En France, l'association MediaConstruct qui accompagne la mise en place du BIM dans les entreprises françaises, a réalisé un glossaire afin que tous les acteurs de l'industrie de la construction s'accordent et se comprennent à l'échelle nationale. Le BIM constituant en un processus intégrant différents acteurs autour d'un projet commun requiert une définition faisant consensus. Cette dernière définit d'abord le BIM en se référant à :

«LA MAQUETTE NUMERIQUE :

Représentation 3D des caractéristiques physiques et fonctionnelles d'un bâtiment. Mais outre les 3 dimensions, elle intègre aussi la dimension temps (4D), les datas « financières (5D), environnementales (6D), patrimoniales (7D) ... C'est donc avant tout une base de données techniques, constituée d'objets définis par leurs caractéristiques et leurs relations entre eux. Le tout forme un ensemble structuré d'informations sur un ouvrage. »[11]

Dès lors, le **BIM couvre l'ensemble du cycle de vie d'un projet**, de la conception à la construction, en passant par l'exploitation et la maintenance. Cela permet une gestion plus intégrée et efficace des projets. **Pour notre étude nous nous concentrons sur l'utilisation**

du BIM dans la phase de conception d'un projet architectural au niveau 3D. On parle du BIM 4D, qui intègre la dimension temporelle, permettant de visualiser l'évolution du projet dans le temps. Il existe aussi le BIM 5D, qui ajoute la dimension du coût, permettant une gestion plus précise des budgets. Cette approche multidimensionnelle fait du BIM une véritable base de données techniques structurée, comme l'expliquent Garrigos & al [12] : les objets qui la composent sont définis par leurs caractéristiques propres et leurs relations mutuelles, formant un ensemble cohérent d'informations sur l'ouvrage.

Dans un second temps, le BIM a pour but de faciliter la collaboration entre les différentes parties prenantes d'un projet comprenant les architectes, les ingénieurs, les entrepreneurs et les commanditaires. **Le BIM centralise l'information et permet aux différents acteurs de collaborer simultanément, malgré l'importante quantité de données échangée.**

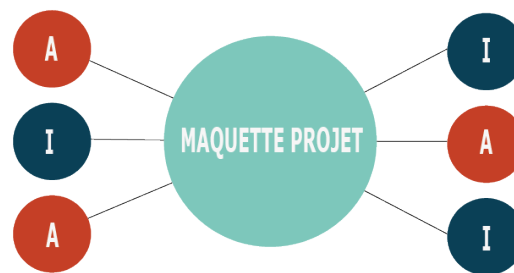


Figure 1 : Centralisation de l'information afin de fluidifier la collaboration entre les différents acteurs.

Par ailleurs, MediaConstruct complète sa définition en soulignant l'aspect collaboratif du BIM :

« LE PROCESSUS METIER DE GENERATION ET D'EXPLOITATION DE DATA TECHNIQUES :

Permet de concevoir, construire et exploiter un ouvrage sur l'ensemble de son cycle de vie. C'est un process collaboratif dans l'entreprise (BIM niveau 1) ou entre des partenaires extérieurs (BIM niveau 2) autour de la Maquette Numérique. »[11]

Ainsi, nous pouvons poursuivre cette définition en indiquant que **le BIM a pour objectif de fluidifier la coordination des activités de construction**. Les progrès dans l'interopérabilité des logiciels BIM améliore l'échange de données entre différentes plateformes. Les formats d'échanges des maquettes sont multiples et d'après la Convention BIM réalisée par Bouygues Bâtiment elles peuvent être réparties de la façon suivante :

12. Logiciels et Formats d'Echanges

| | Logiciels | Editeurs | Système d'exploitation | Format et livrables numériques | Autre |
|--|---|---|--|---|--|
| Modèles spécialisés métier | Revit 2018.2 | Autodesk | Windows / iOS | RVT – DWG – DWG – FBX – GBXML – IFC – IFC – DWG – DXF | Export systématique des documents au format PDF |
| | Covadis 16 | Geomedica | Windows / iOS | IFC – DWG – DXF | |
| | Tekla Structure | Trimble | Windows | IFC – DB1 – DWG – TCZIP | |
| | Rhino 5 | McNeel | Windows / iOS | IFC – SAT – 3DM | |
| | ATTIC+ | ATTIC+ | Windows | IFC – XLS | |
| Modèle global (utilisation par BIM Manager et coordinateur synthèse) | MEP Plancal NOVA | Trimble | Windows | IFC – DWG | Interfaces de coordination de maquette et de gestion de conflits |
| | Navisworks Manage 2018 Revit 2018.2 BIM Track | Autodesk Autodesk BIM One | Windows / iOS Windows / iOS Windows / WEB | NWF – NWD – NWC RVT – IFC BCF – IFC | |
| Outil de visualisation | Navisworks Freedom 2018 | Autodesk | Windows | NWD | Diffusé gratuitement et accessible à partir du site de l'éditeur |
| Suivi de production et OPR | Tekla BIMSight GoodBIM BimView | Trimble Autodesk Autodesk Autodesk | Windows Windows / iOS Windows / iOS Windows | IFC Plateforme éditeur RVT | |
| | | | | | Plateforme à définir |
| Outil de planification pour la 4D | Microsoft Project 2013 | Microsoft | iOS / Windows | MPP | |
| | Navisworks Manage version 2018 | Autodesk | iOS / Windows | NWF – NWD | |

A noter, que la charpente métallique du projet réalisée depuis le logiciel Tekla devra être convertie en objet natif dans un fichier Revit 2018 en complément de l'export en IFC (l'add'in spécifique à l'import Tekla via le format .TCZIP pourrait être pertinent en fonction du type de la modélisation).

Cela permettra de faciliter la coordination du projet, étant réalisé entièrement sous Revit 2018.



Page | 24
Bâtir une Vie Meilleure

Figure 2: Tableau de Bouygues Construction illustrant les logiciels et formats d'échanges utilisés

Aussi, on pourra détailler les fichiers de type IFC (Industry Foundation Classes) qui d'après le tableau (figure 2) est largement utilisé à toutes les phases du projet afin de partager les données entre les utilisateurs. D'après les fiches mémos pratiques de Building Smart l'IFC :

« Favorise l'interopérabilité dans les secteurs du Bâtiment et constituent un modèle « sémantique » basé sur la notion d'objet. Les informations peuvent porter sur de multiples aspects : site, bâtiment, étages, équipements et fonctionnalités, composants et liens entre eux, produits qui constituent les ouvrages... » [13]

L'interopérabilité joue donc un rôle crucial dans cette collaboration. Ainsi, les formats d'échange, notamment les IFC (Industry Foundation Classes), sont essentiels pour permettre le partage d'informations entre différentes plateformes. [14] Ces formats standardisés permettent d'échanger des informations sur de multiples aspects : site, bâtiment, étages, équipements, fonctionnalités et composants.

Finalement on peut dire que les IFC sont un format d'échange des informations entre deux logiciels distincts, qui est standardisé favorisant la collaboration au sein du BIM. **Malgré ce format de donnée, qui rassemblent les différents modèles pour avoir une vue d'ensemble, il reste encore aujourd'hui beaucoup à faire pour atteindre une bonne interopérabilité.** En effet, l'interopérabilité reste un défi majeur [2]. Les obstacles techniques et organisationnels continuent de limiter la fluidité des échanges entre les différents acteurs du projet.

In fine, on s'accordera sur une définition du BIM telle que :

Un processus basé sur des modèles 3D, appelés maquettes, qui offre une représentation numérique des caractéristiques physiques et fonctionnelles d'un bâtiment. Il va au-delà des dessins 2D traditionnels en intégrant des données, des informations et des outils de gestion tout au long du cycle de vie d'un projet.

1.1.2 Revit comme outil de modélisation paramétrique

Dans un second temps, le logiciel Revit s'inscrit comme l'un des logiciels leaders dans le domaine du BIM. En effet, ce logiciel développé par Autodesk offre une plateforme de modélisation complète du bâtiment en trois dimensions, permettant aux utilisateurs de créer des maquettes numériques détaillées intégrant les aspects architecturaux, structurels et Mécanique, Electricité, Plomberie (MEP), au sein d'une même interface. [3]

De plus, ce logiciel repose sur trois concepts fondamentaux hiérarchisés, comme illustré figure 3 :

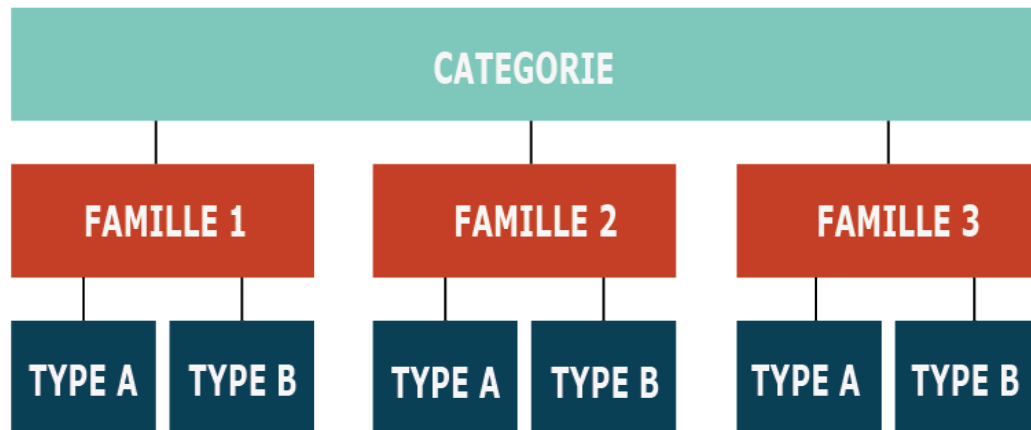


Figure 3: Hiérarchisation des composants dans Revit

- La Catégorie : définit le groupe général auquel appartient l'élément (Mur, fenêtre, Porte...)
- La Famille : représente un groupe d'éléments ayant des paramètres et utilisations communes (Exemple : Porte simple, Porte tierce, Porte double)
- Le Type : propose différentes options au sein d'une même famille (Exemple : Porte double, bois, 200*250 ; Porte double, bois, 150x230)

Cette organisation hiérarchique, facilite la gestion des composants du bâtiment et permet une modélisation cohérente à différentes échelles. [12]

Par ailleurs, l'une des caractéristiques de Revit est aussi sa dimension collaborative. En effet, ce logiciel permet aux équipes d'architectes, d'ingénieurs et de professionnels MEP de travailler simultanément sur un modèle centralisé, visant à fluidifier ainsi la coordination entre les différentes phases du projet. [1] De plus, il intègre des fonctionnalités de gestion des modifications, permettant aux utilisateurs de suivre les évolutions du projet au fil du temps. Dès lors, cela facilite la gestion des révisions et des mises à jour tout au long du cycle de vie du projet et permet, par exemple, l'intégration d'analyses énergétiques, permettant aux professionnels de concevoir des bâtiments plus durables en évaluant les performances énergétiques tout au long de la conception.

Enfin, Revit génère automatiquement des documents de construction, tels que des plans, des coupes et des élévations, à partir du modèle numérique. Cela permet de réduire les erreurs et d'améliorer l'efficacité dans la création de documents de construction. De plus, bien que Revit dispose d'une vaste bibliothèque de composants prêts à l'emploi, il offre

également la possibilité aux utilisateurs de créer et partager leurs propres bibliothèques personnalisées à travers la création de familles. Cette flexibilité, permet aux professionnels d'adapter l'outil à leurs besoins spécifiques tout en maintenant la cohérence avec les standards BIM. [3]

1.1.3 Structuration des familles paramétrées

La réalisation de familles paramétrées dans Revit constitue une composante essentielle du processus de modélisation BIM. Plusieurs types de familles se distinguent, chacune ayant ses spécificités et ses usages : [3]

- Les familles systèmes constituent la base du logiciel. Définies par défaut dans Revit, elles ne peuvent être créées ou modifiées fondamentalement. Seuls leurs types peuvent être dupliqués et modifiés selon les besoins du projet. Il s'agit par exemple des murs, des sols ou des toits standard.
- Les familles chargeables, qui peuvent être en 2D ou 3D, offrent plus de flexibilité. Ces dernières sont créées indépendamment du projet et peuvent être chargées selon les besoins. Parmi elles, on distingue :
 - o Les familles hébergées, qui dépendent d'une famille hôte (par exemple, une fenêtre qui nécessite un mur pour son insertion)
 - o Les familles imbriquées, qui s'intègrent dans d'autres familles pour créer des assemblages plus complexes (par exemple : une famille d'évier qui se positionne dans une famille de meuble de cuisine)

La création d'une famille commence par le choix d'un gabarit qui détermine sa catégorie. Ce choix initial est crucial car il définit les comportements et paramètres disponibles pour la famille. [15] En effet on ne pourra pas modéliser une fenêtre à partir de la catégorie mur mais bien seulement à partir de la catégorie fenêtre.

D'autre part, une famille contient les éléments suivants :

- Des sous-catégories pour organiser ses composants (par exemple : « vitrage », « ouvrant »)
- Des plans de référence qui contrôlent sa géométrie : ces derniers peuvent être comparés à un "squelette" invisible qui structure et contrôle la géométrie de la famille. Ainsi, ce sont des plans virtuels, représentés par des lignes pointillées dans

l'interface de Revit, qui servent de guides pour la construction et le contrôle des éléments de la famille. Pour illustrer leur fonctionnement, prenons l'exemple d'une fenêtre paramétrique :

- Des plans de référence verticaux définissent la largeur de la fenêtre
- Des plans horizontaux déterminent sa hauteur
- Des plans supplémentaires peuvent définir l'épaisseur du cadre

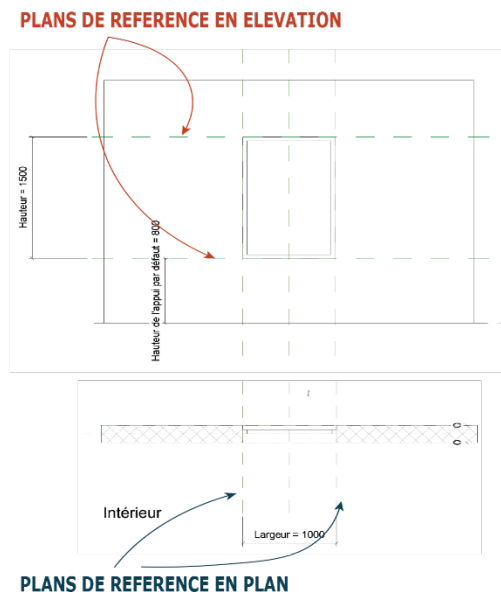


Figure 4: Illustration des plans de référence

L'intérêt majeur des plans de référence réside dans leur capacité à être liés à des paramètres. Par exemple, la distance entre deux plans de référence peut être contrôlée par un paramètre "largeur" ou "hauteur" (figure 4). Ainsi, lorsqu'un utilisateur modifie la valeur de ces paramètres, tous les éléments géométriques attachés aux plans de référence se mettent à jour automatiquement, maintenant la cohérence du modèle.[15]

- Des annotations pour sa documentation (par exemple : lignes de détails qui indiquent le mode d'ouverture de la fenêtre)

Enfin, les familles peuvent intégrer des formes complexes grâce à différentes méthodes de modélisation : extrusions, révolutions et formes définies par l'utilisateur. Ces formes sont contrôlées par des paramètres qui permettent des ajustements dynamiques selon le type dans la famille. Cette flexibilité est essentielle pour répondre aux besoins variés des projets de construction. [16] Dans un contexte professionnel, les familles paramétrées servent souvent à créer des éléments de catalogue comme les portes, fenêtres ou luminaires. Ces catalogues peuvent être enrichis de métadonnées spécifiques (coûts, données énergétiques, etc.), permettant une gestion plus complète et intégrée du projet BIM. [5]

1.2 La révolution du BIM dans le secteur de la construction

Cette analyse du cadre conceptuel et terminologique du BIM, de Revit et des familles paramétrées mettent en évidence la complexité technique et organisationnelle qu'implique l'adoption de ces nouveaux outils numériques. Cependant, comprendre ces concepts ne suffit pas et il est essentiel d'analyser comment ils s'intègrent et transforment une industrie du bâtiment déjà établie et structurée.

En effet, le secteur de la construction présente des particularités qui le distinguent d'autres industries. Arashpour [9] souligne sa complexité et sa multi dimensionnalité, impliquant une multitude d'acteurs, de processus et de technologies. Dans ce contexte, l'intégration du BIM ne se fait pas sans bouleverser les pratiques existantes.

Dès lors, il convient d'examiner comment le BIM s'insère dans cette industrie fragmentée, comment il transforme les processus métiers, mais aussi quelles sont ses limites actuelles. Cette analyse nous permettra de mieux comprendre les enjeux de son adoption par les différents acteurs du secteur, en particulier les ingénieurs et les architectes.

1.2.1 Le BIM s'intègre à une industrie du bâtiment existante

a) Le BIM s'intègre à toutes les phases du cycle de vie du bâtiment

L'industrie du bâtiment se révèle complexe et multidimensionnelle à la différence des autres industries comme celles de l'aéronautique ou de l'automobile. Elle constitue un secteur clé de l'économie mondiale impliquant une multitude d'acteurs, de processus mais aussi de technologies. [9] Cette industrie peut se diviser en plusieurs catégories allant des projets résidentiels à petite échelle en allant jusqu'à de grandes opérations tels que des musées. Chacune des catégories possède ses propres caractéristiques, défis et exigences réglementaires qui lui sont relatives et auxquels le projet se doit de répondre. Il est important de considérer aussi que chaque construction est unique, par sa localisation qui sera toujours différente mais aussi et surtout par les conditions de réalisation ou encore la législation en vigueur. A la différence des autres industries, le produit n'est pas répété de manière identique même si celui-ci est composé d'éléments standardisés réalisés en usine.

D'autre part, la réalisation d'un projet se déroule selon plusieurs phases et sur plusieurs années. Le processus commence par les études préliminaires : études d'esquisse (ESQ), études d'avant-projet (AVP) comprenant l'avant-projet sommaire (APS) et l'avant-projet définitif (APD), jusqu'au dépôt du permis de construire (DPC). Viennent ensuite les études de projet (PRO), puis les études et plans d'exécution (EXE). La phase de construction débute avec la sélection des entreprises, suivie de la direction de l'exécution des travaux (DET) et de l'ordonnancement, coordination et pilotage du chantier (OPC), pour finir avec l'assistance aux opérations de réception (AOR).

Comme illustré ci-dessous :



Figure 5: Chronologie des phases d'un projet

Cette figure 5 illustre alors comment s'enchainent les phases les plus importantes dans la réalisation d'un projet. Il est important de comprendre qu'au cours de chacune de ces phases le BIM peut être intégré afin de gérer le projet tout au long de son cycle de vie, [17] comme illustré figure 6 et figure 7.

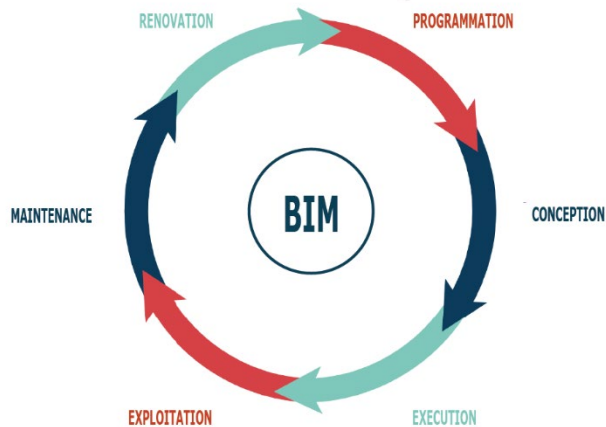


Figure 7: Intégration du Bim selon les phases du projet

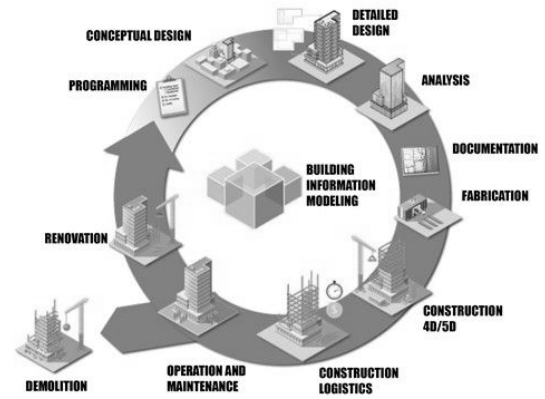


Figure 6: Cycle de vie du bâtiment [18]

Mais comment le BIM est-il intégré à chaque étape du projet ? Pour cela, en énumérant les objectifs du BIM nous pouvons les intégrer selon les différentes phases.

| | | Programmation | Conception | Exécution | Exploitation |
|------------------------|---|---------------|------------|-----------|--------------|
| Objectifs Programme | Revue de projet | | | | |
| | Communication | | | | |
| | Maintenance | | | | |
| Objectifs Etudes | Modélisation 3D | | | | |
| | Livrables 2D | | | | |
| | Coordination interdisciplinaire | | | | |
| | Pré-synthèse | | | | |
| | Synthèse technique | | | | |
| | Interopérabilité | | | | |
| | Quantitatifs et nomenclatures | | | | |
| | Etudes techniques exécution | | | | |
| Objectifs exploitation | Exportation quantitatif | | | | |
| | Visualisation, localisation 3D | | | | |
| | Optimisation des délais des interventions | | | | |
| | Anticiper résolution des pannes | | | | |
| | Formulation des réserves | | | | |

Figure 8: Les objectifs du BIM selon les phases du projet

A partir de ce tableau (figure 8) nous observons l'omniprésence du BIM lors de la réalisation d'un projet. **En résumé, le BIM intervient comme un outil de coordination et de gestion de l'information et ainsi chaque phase du projet peut bénéficier des fonctionnalités spécifiques du BIM :**

- **En phase de programmation : intégration des exigences et contraintes du projet**
- **En phase de conception : production des livrables 2D et 3D, coordination interdisciplinaire**
- **En phase d'exécution : synthèse technique, quantitatifs et nomenclatures**
- **En phase d'exploitation : visualisation 3D, optimisation des interventions**

Dès lors, cette intégration du BIM à toutes les étapes encourage une collaboration à tous les niveaux du projet. Les différents acteurs, de la maîtrise d'ouvrage aux entreprises de construction, peuvent utiliser la maquette numérique selon leurs besoins spécifiques. Cette approche transforme la manière dont l'information est partagée et utilisée tout au long du cycle de vie du bâtiment. [14]

b) Le BIM peut être utilisé par tous les acteurs de la construction

Tout au long de cette partie, vous pouvez vous référer aux schémas figure 9 et figure 10 pour faciliter la compréhension, repérées par le bandeau bleu page 20.

De plus, l'industrie du bâtiment se structure en plusieurs niveaux, où chaque acteur intervient durant certaines phases du projet avec des responsabilités et des tâches spécifiques que le BIM peut venir impacter. En effet, Hochscheid [5] montre que cette intégration progressive du BIM modifie les rôles traditionnels.

D'abord, **la maîtrise d'ouvrage**, comprenant le commanditaire du projet qui peut être propriétaire ou promoteur, détermine les objectifs du projet (programme, budget, cahier des charges). Dans certains cas on retrouve **l'Assistance à maîtrise d'ouvrage** réalisant la planification et l'organisation des diverses entreprises. Il choisit les intervenants du projet et réalise des retours sur les propositions réalisées par les architectes et les ingénieurs. A cette étape, toutes les données transmises par la maîtrise d'ouvrage peuvent être intégrées au processus BIM. Dès lors, les exigences comme une certaine surface de plancher, le programme prédéfini ou encore le respect des nouvelles normes, sont tous des paramètres intégrables dans la maquette numérique afin d'en maîtriser son respect tout au long de la conception. [17]

Les architectes conçoivent un projet en réalisant des livrables (plans, coupes, maquettes) en tenant compte du programme, en respectant les limites budgétaires et en intégrant leur vision de l'architecture. En somme, ils transforment les besoins des propriétaires en concepts. Ces livrables sont directement produits par des logiciels comme Revit. Ainsi la modélisation de la maquette permet de produire les documents « commerciaux » utiles pour communiquer sur le projet lors de la phase concours par exemple, mais elle permet aussi de produire les documents techniques nécessaires à la signature des contrats.

Les ingénieurs, selon leur différente spécialisation, s'assurent que la conception proposée par les architectes est techniquement viable. Ils se joignent alors pour affiner le projet en réalisant les calculs, en vérifient les normes et en réalisant eux aussi les documents concrétisant la réponse technique aux besoins engendrés par les architectes. En intégrant le BIM à leur démarche, ces calculs peuvent désormais être directement réalisés au sein de la maquette. Ainsi les ingénieurs peuvent aussi réaliser des simulations thermiques, acoustiques et vérifier si les réseaux sont compatibles avec la structure sans impacter le projet architectural.

Les entreprises de construction, sont responsables de la mise en œuvre du projet. Les chefs de chantiers coordonnent les travaux quotidiens de manière à respecter les plannings et les budgets afin de réaliser le projet fourni par les architectes et les ingénieurs. Durant la phase de préparation de chantier, la maquette 3D rend possible l'extraction des métrés tout en s'adaptant suivant l'évolution du projet. [18]

Les bureaux de contrôle, mandatés par la maîtrise d'ouvrage réalisent les contrôles nécessaires afin de s'assurer que le projet respecte les délais, les budgets et soit conforme aux spécifications. Ils supervisent les réunions entre les différents acteurs, mettent à jour les plannings et formulent des réserves si nécessaire concernant chacune des entreprises impliquées. Durant la phase chantier il est possible d'utiliser des visionneuses BIM afin de visualiser directement en 3D la conformité des ouvrages réalisés.

Les économistes, réalisent la planification financière et la gestion des coûts. Ils analysent les plans fournis par les architectes et les ingénieurs afin d'estimer les coûts des matériaux, de main d'œuvre, de transport et des équipements nécessaires à la réalisation du projet. Grâce à la maquette numérique et à l'extraction des nomenclatures, les quantités sont directement exploitables et facilitent les estimations.

Nous pouvons résumer cette organisation selon l'organigramme suivant en intégrant les relations entre les différents acteurs.

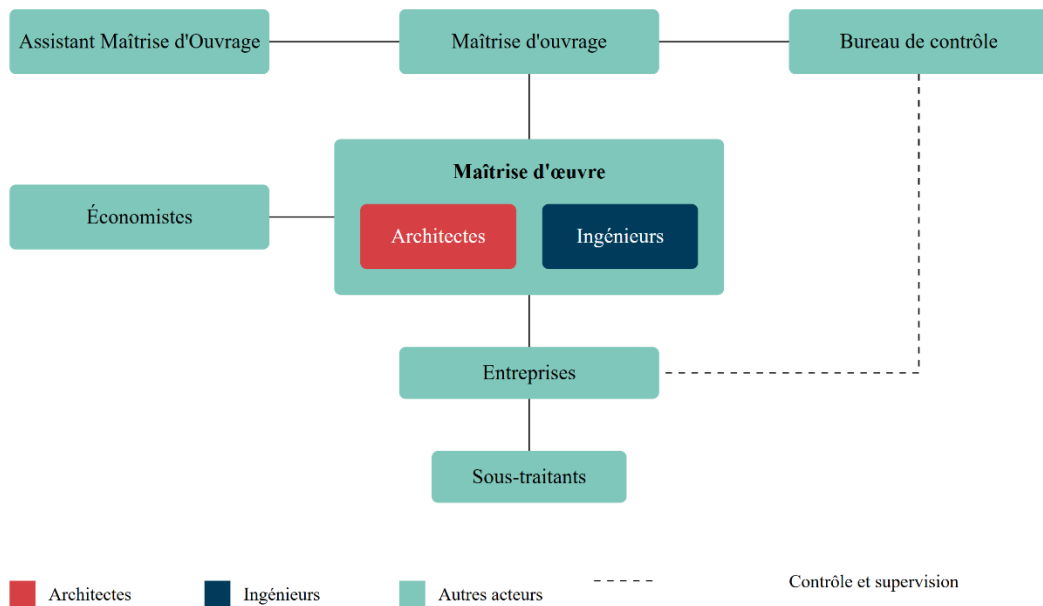


Figure 9: Organigramme des acteurs de l'industrie de la construction

A partir de cette organisation stratifiée nous pouvons intégrer ces acteurs temporellement dans le processus de réalisation du projet de la façon suivante :

Z

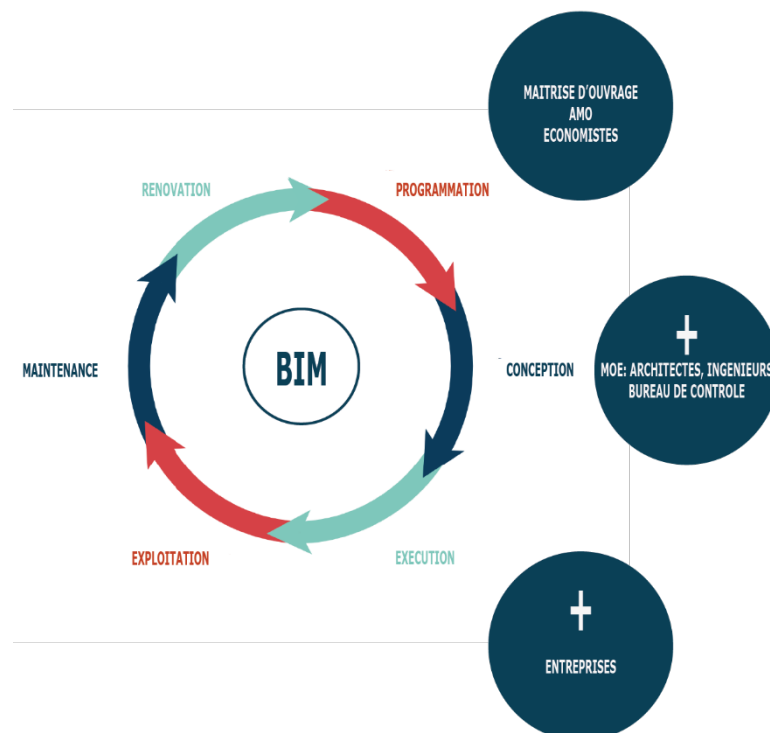


Figure 10: Cycle de vie du bâtiment avec les acteurs

1.2.2 Le BIM transforme les processus métiers

La transformation numérique du secteur de la construction se manifeste aussi par une évolution du cadre réglementaire. Bien que le BIM ne soit pas obligatoire en France, certaines dispositions législatives encouragent son adoption notamment l'article R2132-10 du 1er avril 2019 relatif aux marchés publics :

« L'acheteur peut, si nécessaire, exiger l'utilisation d'outils et de dispositifs qui ne sont pas communément disponibles, tels que des outils de modélisation électronique des données du bâtiment ou des outils similaires. Dans ce cas, il offre un ou plusieurs des moyens d'accès mentionnés à l'article R. 2132-14, jusqu'à ce que ces outils et dispositifs soient devenus communément disponibles aux opérateurs économiques. »[19]

De plus, la directive européenne 2014/24/UE recommande l'usage du BIM dans les marchés publics. Ainsi, en France, le Plan BIM 2022 [20] illustre la volonté gouvernementale d'accélérer cette transition numérique dans la construction.

a) Impact chez les ingénieurs

D'une part, l'intégration du BIM transforme les méthodes de travail des ingénieurs, comme introduit précédemment. En effet, selon le rapport OPIIEC [21], 85% des bureaux d'études techniques considèrent le BIM comme un enjeu stratégique majeur. Cette transformation se manifeste à travers une réorganisation significative des structures. En effet, 37% des bureaux d'études ont créé des postes de BIM Manager, tandis que 42% des ingénieurs ont dû suivre des formations spécifiques pour s'adapter à ces nouveaux outils. Plus significatif encore, 65% des entreprises ont dû revoir leurs méthodes de travail pour intégrer le BIM.

Au niveau technique, cette évolution se traduit par des changements majeurs dans les pratiques. Les ingénieurs peuvent désormais intégrer leurs calculs directement dans la maquette numérique, développer des analyses multiphysiques plus poussées et automatiser les vérifications réglementaires. Cependant, comme le souligne le rapport de l'OPPIEC [21], cette transition n'est pas sans obstacles. Le coût élevé de la formation constitue le principal frein pour 45% des entreprises, auquel s'ajoutent la difficulté de recruter des profils qualifiés et une certaine résistance au changement au sein des équipes.

b) Impact chez les architectes

D'autre part, Le Baromètre BIM [5] révèle une transformation tout aussi significative mais différente dans les agences d'architecture. L'adoption du BIM y apparaît plus progressive : 30% des agences l'utilisent régulièrement, 40% prévoient son adoption dans les deux ans, tandis que 30% restent réticents ou n'envisagent pas son adoption.

Les motivations des architectes pour adopter le BIM sont multiples. 76% citent l'amélioration de la qualité des projets comme principale motivation, suivie par la réduction des erreurs de conception (68%) et une meilleure collaboration avec les partenaires (62%). Cependant, les freins sont également importants : 82% mentionnent le coût des logiciels et de la formation, 45% le manque de demande des clients, et 38% la complexité perçue des outils.

L'impact sur la pratique architecturale est profond. Le temps de conception se trouve modifié, avec une augmentation en phase initiale mais un gain significatif en phase de développement. Les méthodes de représentation évoluent, passant du dessin 2D traditionnel à la modélisation 3D. Plus fondamentalement encore, comme le souligne le baromètre), cette transformation n'est pas uniquement technique mais implique une véritable mutation culturelle de la profession d'architecte.

c) Impact sur les relations entre les acteurs

En somme, ces transformations chez les ingénieurs comme chez les architectes s'accompagnent d'une évolution significative des relations entre les différents acteurs du projet. Comme l'illustre l'étude sur l'hybridation des pratiques de Poirier & al [22], la coordination s'améliore grâce à l'anticipation des conflits techniques, une communication plus fluide et un partage d'information optimisé. Cette nouvelle dynamique collaborative, bien que prometteuse, soulève également des questions sur l'évolution des responsabilités et des rôles de chaque profession dans le processus de conception et de construction.

1.2.3 Les limites du BIM

Malgré les avancées significatives dans l'adoption du BIM et ses bénéfices avérés, plusieurs obstacles persistent dans sa mise en œuvre effective, ces limites se manifestent tant sur le plan technique qu'organisationnel. [14]

Le premier frein majeur est d'ordre économique. La mise en place du BIM représente un investissement conséquent pour les entreprises, non seulement en termes d'équipements et de logiciels, mais aussi en formation du personnel. D'après le Baromètre BIM, [5] cette barrière financière est particulièrement sensible pour les petites structures, qui peinent à amortir ces coûts initiaux malgré les gains de productivité potentiels à long terme.

Un deuxième obstacle majeur concerne la formation des professionnels. Boton et Forgues (2019), mettent en évidence un décalage entre les compétences requises pour une utilisation efficace du BIM et la formation actuellement disponible. Cette problématique est double :

- Un manque de personnel qualifié pour répondre aux besoins croissants du marché
- Une difficulté à former les professionnels expérimentés aux nouvelles méthodes de travail.

Ensuite, l'interopérabilité constitue une troisième limite significative. Malgré l'existence de formats d'échange standardisés comme les IFC, des problèmes persistent dans le transfert d'informations entre différents logiciels.[2] Dès lors, ces difficultés techniques peuvent entraver la collaboration effective entre les différents acteurs du projet.[16]

Par ailleurs, la rigidité des logiciels BIM pose également un problème. Les utilisateurs doivent souvent adapter leurs pratiques aux contraintes des outils plutôt que l'inverse, ce qui peut limiter la créativité et l'innovation dans la conception. [5] Cette standardisation forcée des pratiques peut parfois aller à l'encontre des besoins spécifiques de certains projets.

Ces limites, bien qu'importantes, doivent être considérées comme des défis à surmonter plutôt que des obstacles insurmontables. La compréhension de ces contraintes est essentielle pour améliorer les pratiques et développer des solutions adaptées aux besoins des différents acteurs du secteur de la construction.

1.2.4 Des promesses collaboratives aux réalités professionnelles

En somme, l'intégration du BIM dans l'industrie du bâtiment révèle un paradoxe. D'une part, comme nous l'avons vu, le BIM s'impose progressivement comme un outil incontournable, transformant en profondeur les pratiques tant chez les ingénieurs que chez les architectes. Les ingénieurs adoptent rapidement ces technologies qui s'alignent avec leur approche technique du projet. [21] En revanche les architectes s'adaptent plus progressivement, cherchant à concilier ces nouveaux outils avec leurs processus créatifs. [5]

D'autre part, les limites identifiées, qu'elles soient techniques, organisationnelles ou financières, révèlent que cette transformation numérique ne résout pas automatiquement les défis de collaboration entre les différents acteurs du projet. En effet, l'utilisation d'outils communs ne garantit pas une compréhension mutuelle des besoins et des contraintes de chaque profession. [1]

Cette situation nous amène à nous interroger plus précisément sur la nature des relations entre ingénieurs et architectes dans ce contexte de transformation numérique. Si le BIM promet une meilleure collaboration, il est essentiel de comprendre comment les formations initiales distinctes et les approches différentes de ces deux professions peuvent influencer leur utilisation des outils numériques, en particulier dans la création et la manipulation des familles paramétrées qui constituent une interface commune de leur travail.

1.3 Conflits préexistants entre architectes et ingénieurs

L'analyse de l'intégration du BIM dans l'industrie de la construction et de ses limites actuelles soulève une question fondamentale : celle de la relation entre ingénieurs et architectes face à ces nouveaux outils numériques. Cette relation, historiquement complexe, se trouve aujourd'hui confrontée à de nouveaux défis avec l'avènement du BIM.

Les tensions entre ces deux professions ne sont pas nouvelles mais trouvent leurs racines dans une longue histoire de collaborations et de rivalités.[4] Le BIM, bien qu'il promette une meilleure coordination entre les acteurs, s'intègre dans ce contexte relationnel préexistant et l'adoption de ces outils numériques, loin de gommer les différences, peut parfois les accentuer en révélant des approches distinctes de la conception et de la modélisation.[22]

Pour comprendre ces divergences et leurs implications dans l'utilisation du BIM, il est essentiel d'examiner d'abord les formations initiales distinctes qui façonnent ces deux professions, puis d'analyser comment ces différences se manifestent dans leurs relations professionnelles et enfin, d'étudier comment le BIM influence cette dynamique.

1.3.1 Description des formations initiales distinctes

Par nature, les étudiants s'orientent dans l'une ou l'autre des formations initiales en raison de leur sensibilité et de leurs goûts qu'ils soient portés sur la culture ou les mathématiques par exemple. Ces distinctions pourraient affecter leurs méthodologies et leur priorité lors de la résolution de problème, ou la réalisation de tâches professionnelles.

a) Constat de la formation initiale en école d'architecture

Le cursus le plus classique des architectes est long et rigoureux, implique trois années de Licence suivies de deux années de Master et se termine par une année complémentaire professionnalisante (HMONP). La formation initiale comprend une partie théorique mais aussi une partie pratique, dispensées par des professeurs souvent architectes de profession. Les études d'architectures combinent des cours sur l'histoire, la théorie de l'architecture, la philosophie, le droit, l'art plastique, les modes de construction, les logiciels de modélisation, et enfin le cours d'atelier de projet.

Sociologiquement, le profil type d'un étudiant architecte est souvent perçu comme un créateur avec une vision esthétique. Souvent, les architectes sont considérés « comme des artistes et accessoirement un technicien »[23], ce qui peut parfois les éloigner de la maîtrise d'œuvre au profit d'ingénieurs.

Ensuite, une fois diplômé, l'architecte est principalement responsable de la conception globale du projet. En 2023, la France comptabilisait près de 30 500 architectes agréés en architecture et inscrits au tableau de l'Ordre, un taux plus faible que nos voisins européens. [24] Il élabore les espaces en tenant compte de la fonctionnalité et l'intégration des enjeux déterminés par la Maîtrise d'ouvrage tout en veillant au respect des normes. En phase de programmation et de conception, l'architecte analyse les besoins du client, le contexte du site en prenant en compte les contraintes budgétaires et réglementaires.

Enfin, l'architecte joue un rôle dans la coordination entre les différentes parties prenantes. Il s'assure que la vision du projet soit bien comprise et respectée par tous les intervenants. Dès lors, il est nécessaire que ses intentions soient clairement énoncées et donc précisément représentées pour être communiquées aux autres acteurs du projet. Il réalise les documents graphiques nécessaires à la communication de ses projets (esquisses, plans, coupes, élévations, maquette). Toutefois, le métier évolue avec l'intégration de nouvelles technologies comme le BIM, incitant les architectes à renforcer leurs compétences techniques pour créer des modèles 3D paramétriques.

b) Intégration de Revit dans la formation initiale des architectes de l'ENSAPLV

Aujourd'hui la formation Revit qui est dispensée à l'ENSAPLV se déroule à partir du deuxième semestre de la troisième année. Cette formation consiste en 3h par semaine de cours et n'est pas obligatoire. En effet, les étudiants ont le choix entre plusieurs professeurs d'informatique qui enseignent chacun un programme (Revit, Archicad, Rhino). D'une part, le cours est introduit par Power Point afin de comprendre les enjeux du logiciel et se déroule ensuite sous la forme d'atelier de 15 étudiants. Durant la première partie du cours, une maquette Revit a été visualisée afin de rendre compte du potentiel du logiciel pour les étudiants architectes. D'autre part, ce cours est organisé selon deux phases, la première que nous pouvons appeler « démonstration » : les étudiants reproduisent ce que la professeure fait à l'écran (insertion d'un plan Autocad dans revit, tracé des murs, positionnement des fenêtres, des familles). La seconde phase que nous pouvons nommer « production » consiste en l'accompagnement par la professeure dans la réalisation du projet du S6 des étudiants, en conseillant et en suivant les étudiants individuellement. Les étudiants réalisent alors leur projet et le présentent en réalisant des plans, des coupes, des élévations et des axonométries.

c) Constat de la formation initiale en école d'ingénieur

La formation initiale des ingénieurs suit un déroulement différent mais tout aussi rigoureux. Le cursus le plus classique commence avec deux années de classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE), spécialisées en mathématiques, physiques et science de l'ingénieur. A la suite des concours nationaux, les étudiants intègrent une école d'ingénieur, pour un cursus de trois ans. Ces études incluent des cours avancés en mathématiques, physique, mécanique des structures, technologie de l'information, formation aux logiciels de modélisation et aussi des projets de groupe afin d'intégrer les notions de management et de communication. De nombreux stages en entreprise sont à réaliser afin de concrétiser la partie théorique.

Sociologiquement, les ingénieurs sont souvent perçus comme des profils sensibles à la précision, à la technicité, à la sécurité et à la rentabilité, car ils suivent un cursus mettant l'accent sur la résolution de problèmes techniques et l'optimisation des performances des bâtiments.

Ensuite, une fois diplômé, l'ingénieur est responsable de la viabilité technique du projet. Il réalise des calculs et des analyses pour s'assurer de la faisabilité d'un projet et qu'il soit conforme aux normes en vigueur. Il réalise les analyses techniques et la conception structurelle du projet. Il réalise aussi un travail sur l'optimisation des performances du

bâtiment, en termes de durabilité, d'efficacité énergétique et de coût. Durant la phase d'exécution, l'ingénieur conduit la mise en œuvre des travaux en garantissant le respect des plans et des spécifications techniques.

L'ingénieur doit aussi collaborer étroitement avec l'architecte pour s'assurer que les aspects techniques soient bien intégrés dans la conception globale. Cette coordination s'avère être cruciale pour éviter les conflits ou les incompatibilités entre les différentes parties du projet. Dès lors, l'ingénieur utilise lui aussi Revit afin de créer des modèles détaillés des systèmes structurels, mécaniques, électriques et de plomberie. Ces modèles doivent être précis et intégrer toutes les contraintes techniques dans le but d'améliorer la collaboration avec les autres maquettes du projet.

d) Intégration des Revit dans la formation initiale des ingénieurs de l'EIVP

Aujourd'hui la formation Revit qui est dispensée à l'EIVP se déroule à partir du premier semestre de la deuxième année. Cette formation consiste en 3h par semaine de cours obligatoires. En effet, à la différence des architectes, à l'EIVP les étudiants ne sont introduits qu'à ce logiciel de modélisation BIM. En revanche, cette fois-ci ce sont trois professeurs qui enseignent le logiciel. Ainsi, la promotion de 100 étudiants est divisée en 3 groupes de 33. Le cours de Revit est d'abord introduit par toute une phase Power Point expliquant le contexte du BIM au sein de l'industrie de la construction. En effet, une des compétences qui est évaluée par ce cours c'est la compréhension du BIM et en particulier des conventions données par les entreprises de construction. Ainsi chaque cours de 3h est découpé en 1h de théorie puis 2h de pratiques. La première phase est une démonstration des compétences fondamentales et au bout de 4 séances de 2h de pratiques, les étudiants ont une évaluation consistant en la réalisation d'une maison simple avec un étage. Le devoir demande de réaliser des coupes, des vues en plans, des élévations, des perspectives, il est aussi demandé de savoir exporter les feuilles de présentation et la maquette en format revit et IFC. Ensuite la seconde phase accompagne les étudiants dans la modélisation de leur « projet construction » qui se déroule durant le même semestre. Les étudiants doivent alors modéliser le bâtiment existant, ce qui les pousse à modéliser des familles spécifiques pour se rapprocher au mieux de la réalité, et le projet qui sera réalisé en proposant des solutions structurelles. L'évaluation finale porte alors sur cette maquette réalisée et sur la qualité des documents graphiques en ayant géré les modes de représentation.

e) Bilan des différences dans les formations initiales

Ces différences de formation initiale ne sont pas anodines : elles façonnent des approches distinctes du projet architectural.[4] De plus, l'intégration du BIM dans les cursus académiques constitue un défi majeur pour les établissements d'enseignement supérieur. En effet, il existe sept défis fondamentaux que rencontrent les écoles dans la mise en place de cet enseignement.[25] Il s'agit notamment de définir les compétences à acquérir, de choisir une approche pédagogique adaptée, d'établir des méthodes d'évaluation pertinentes, de mettre en place l'environnement technologique nécessaire, de développer des partenariats industriels, et de gérer le calendrier d'apprentissage. Ces défis, bien que communs aux deux types de formation, sont abordés différemment selon les disciplines.

Dans les écoles d'ingénieurs, l'introduction du BIM transforme les méthodes mêmes de l'enseignement technique.[26] La modélisation paramétrique et la gestion des données sont intégrées naturellement dans un cursus déjà orienté vers l'optimisation et la rationalisation. Les compétences BIM s'inscrivent dans une continuité avec les autres apprentissages techniques, facilitant leur adoption par les étudiants ingénieurs. En revanche, dans les écoles d'architecture, l'intégration du BIM soulève des questions plus complexes. En effet, ces établissements doivent trouver un équilibre délicat entre l'enseignement technique du BIM et la préservation de la dimension créative fondamentale à la formation architecturale. [27] Faillières réalise une étude au sein des écoles d'architecture françaises et révèle trois approches distinctes :

- L'intégration du BIM comme outil complémentaire dans l'atelier de projet
- La création de cours spécifiques dédiés à la modélisation BIM
- Le développement d'approches hybrides alliant technique et créativité

Cette différence d'approche dans l'enseignement du BIM n'est pas anodine, elle pourrait renforcer les divergences de pratiques professionnelles entre ingénieurs et architectes.[25] Boton & al. insistent sur l'importance de développer des approches pédagogiques favorisant la collaboration interdisciplinaire dès la formation initiale, pour préparer les futurs professionnels à une pratique plus intégrée du BIM.

Ces constats soulèvent des questions importantes sur la façon dont ces différences de formation influencent l'utilisation pratique des outils BIM, en particulier dans la création et la manipulation des familles paramétrées, qui constituent une interface commune de travail entre ingénieurs et architectes.

1.3.2 Bilan actuel des relations interdisciplinaires

Aujourd'hui, les rôles de l'architecte et de l'ingénieur sont distincts mais intrinsèquement liés. Si le succès d'un projet de construction repose sur leur collaboration interdisciplinaire, on constate pourtant des conflits récurrents entre ces deux corps de métier.[4]

Une hypothèse serait que les divergences dans la formation initiale et les compétences de base de ces deux groupes professionnels, pourraient influencer leur mode de production, notamment leur approche de la modélisation dans les logiciels comme Revit. En effet, les architectes ont une formation initiale intégrant des aspects artistiques mettant en valeur la créativité, l'esthétique, la théorie et la surtout la fonctionnalité des espaces. Par ailleurs, les ingénieurs, reçoivent une formation initiale privilégiant précision, viabilité et efficacité. En outre, les architectes semblent plus sensibles à des problématiques complémentaires servant le développement du projet selon des critères sociologiques, urbanistiques ou formels, quand l'ingénieur semble le résoudre à l'aide de la solution qui lui semble la plus optimale selon des critères économiques ou temporel. De nombreux conflits émergent alors et peuvent porter sur :

- Leur sens des priorités : une façade complexe déterminée par l'architecte sans prise en compte des contraintes imposées à la structure pour la soutenir, entraînant des modifications significatives du dessin ou de la structure.
- L'intégration des normes : un dessin ne prenant pas en compte certaines normes entraînant des coûts supplémentaires afin de les corriger lors de la phase d'exécution.
- Les désaccords sur les détails techniques : une hauteur sous plafond pas assez importante par rapport aux besoins des équipements techniques qui doivent être insérés entre le faux plafond et le plafond.
- Les erreurs d'exécution : durant la phase d'exécution, les ingénieurs procèdent à des modifications afin de s'adapter à des conditions imprévues. Ces modifications peuvent nécessiter des ajustements visuels et/ou fonctionnels non voulus par l'architecte affectant alors l'intégrité du design initial.

Ces exemples,[4] soulignent l'importance d'une anticipation de ces sujets lors de la modélisation de la maquette BIM. Cependant, si le BIM offre des outils pour faciliter cette anticipation, son utilisation ne résout pas automatiquement ces tensions historiques. [1] Au contraire, il peut parfois les exacerber en rendant plus visibles les différences d'approche dans la modélisation et la gestion du projet.

1.3.3 Nouveaux conflits ajoutés par le processus BIM

Si le BIM a été présenté comme une solution pour améliorer la collaboration entre les acteurs du projet, son introduction a paradoxalement généré de nouvelles sources de tension entre ingénieurs et architectes. Comme l'observait déjà Champy il y a plus de vingt ans : *"si l'intervention de l'architecte se justifie par sa capacité à élaborer des dessins [puisque l'identité de la profession s'est construite sur celle de l'architecte-artiste], la conception assistée par ordinateur, en simplifiant considérablement ce travail, recèle une menace"* [28]

En effet, Botton & Forgues [15] identifient plusieurs niveaux de conflits émergents et les organisent selon :

- Les conflits de leadership : avec l'apparition de nouveaux rôles comme le BIM Manager créant une nouvelle hiérarchie, la gestion de l'information tend à se cristalliser autour des gestionnaires BIM, une dualité émerge entre la direction traditionnelle du projet et la gestion BIM.
- Les divergences méthodologiques : les ingénieurs et architectes adoptent des approches différentes de la modélisation, les processus de collaboration BIM proposés sont souvent trop génériques, un écart existe entre les processus théoriques et leur application pratique

De plus, Gartoumi & al. [15] soulignent que ces tensions se manifestent particulièrement dans :

- La définition des niveaux de détail requis
- La gestion des modifications du modèle
- L'organisation des données dans la maquette numérique

Par ailleurs, l'adoption du BIM soulève des questions de propriété intellectuelle et de responsabilité professionnelle. [5] Les architectes, traditionnellement garants de la conception, peuvent voir leur rôle remis en question par une approche plus collaborative et technique du projet.

Ces nouveaux conflits, nécessitent de repenser les modes de collaboration entre ingénieurs et architectes. [22] Il ne s'agit plus seulement de résoudre des conflits techniques, mais de développer une nouvelle culture professionnelle qui prenne en compte les spécificités et les besoins de chaque discipline.

1.3.4 Synthèse de la fracture dans le contexte du BIM

L'analyse de la fracture entre ingénieurs et architectes révèle une situation complexe que le BIM vient à la fois éclairer et transformer. Les différences fondamentales dans leur formation initiale, leurs approches distinctes du projet architectural et leurs méthodes de travail spécifiques persistent malgré l'adoption d'outils numériques communs.

En effet, comme nous l'avons vu, les formations initiales distinctes ne façonnent pas seulement des compétences techniques différentes, mais aussi des visions et des approches particulières de la conception. L'intégration du BIM dans ces formations initiales reflète et parfois semble renforcer ces différences. [25] Les relations professionnelles entre ces deux corps de métier, historiquement marquées par une tension entre créativité architecturale et rationalité technique, se trouvent aujourd'hui confrontées à de nouveaux défis avec l'introduction du BIM.

2. Enonciation de la problématique

Le BIM a été présenté comme une révolution dans le secteur de la construction, avec la promesse d'une plus grande efficacité, d'une meilleure coordination entre les différents acteurs, et de la centralisation des données. [8] Cependant, en dépit des avancées techniques, il reste des obstacles importants, notamment dans le domaine de l'interopérabilité entre logiciels et dans la communication au sein des équipes.[14]

Des solutions techniques, telles que des protocoles de travail communs, des standards de modélisation ou encore des logiciels interopérables, ont été proposées pour surmonter ces limites [16]. Malgré cela, ces solutions ne suffisent pas toujours à résoudre les défis de collaboration entre architectes et ingénieurs.[1] Il reste donc une dimension humaine et pédagogique potentiellement sous-estimée dans la prise en main et l'usage des outils BIM, qui pourrait jouer un rôle clé dans la réussite des projets.

En effet, les acteurs de la construction pourraient ne pas avoir nécessairement la même approche de modélisation en fonction de leur formation initiale. Les architectes et les ingénieurs, ayant des perspectives et des méthodologies propres à leurs disciplines, peuvent interpréter et utiliser un même outil de manière différente. [4] Ce phénomène pourrait être à l'origine de certaines incompréhensions ou erreurs de coordination observées dans les projets BIM. Bien que Botton & al [25] aient étudié les enjeux de l'intégration du BIM dans l'enseignement, aucune recherche ne s'est jusqu'à présent penchée spécifiquement sur la manière dont la formation, reçue par chacun, peut modifier l'appréhension de la modélisation. Par conséquent, nous pouvons nous demander, dans quelle mesure les

différents acteurs, s'approprient-ils un même outil ? Quels sont les défis spécifiques qu'ils rencontrent lors de la modélisation et de la collaboration selon leur profession ? Plus encore, en quoi les formations respectives des architectes et des ingénieurs impactent-elles leurs méthodologies de travail et leurs priorités dans la modélisation BIM ?

En effet, une piste envisagée pour comprendre cette fracture se trouve dans l'étude des étudiants en formation avant qu'ils ne soient influencés par le monde du travail. L'école est à la fois le lieu de l'apprentissage technique des outils de représentation mais aussi le lieu de la confirmation des ambitions, du caractère et du mode de penser. Ainsi, se pose la question de l'influence des formations initiales sur le processus de production d'un projet à travers les outils informatiques. En effet, on peut alors se demander si ces différences dans la formation initiale influencent directement la manière dont chaque groupe utilise Revit afin de modéliser les éléments du bâtiment ? Ainsi, c'est lors de la conception de familles paramétrées à intégrer dans la maquette numérique que les différences pourraient se révéler notables dans la mesure où cela requiert des processus relevant à la fois de la rigueur de l'ingénieur et à la fois de la pensée architecturale.[3]

Dès lors, cette distinction entre ingénieurs et architectes soulève la problématique suivante :

**DANS QUELLES MESURES LES INGENIEURS ET LES ARCHITECTES
MODELISENT-ILS DIFFEREMMENT UNE FAMILLE PARAMETREE DANS REVIT ?**

3. Méthodologie

Cette recherche vise donc à explorer s'il existe de telles différences dans la modélisation d'un ingénieur ou d'un architecte réalisant le même exercice sur Revit. À travers une expérimentation comparative impliquant deux groupes d'étudiants, l'un d'ingénieurs et l'autre d'architectes, cette étude analysera leurs approches de modélisation selon trois axes principaux : le respect des consignes, la méthodologie de structuration, et la flexibilité des modèles créés. L'objectif est de déterminer si la formation initiale influence significativement les pratiques de modélisation, et comment ces différences potentielles peuvent impacter la collaboration dans un contexte BIM. Pour répondre à cette problématique, je présenterai d'abord l'hypothèse de recherche qui guide cette étude, ainsi que le cadre expérimental mis en place. Je détaillerai ensuite les trois axes de comparaison que j'ai identifiés pour analyser les productions des étudiants. Enfin, j'exposerai la méthode d'analyse des résultats et les différentes configurations envisagées pour leur interprétation

3.1 Définition de l'hypothèse de recherche et du cadre expérimental

Avant de détailler le protocole expérimental, il est temps de définir l'hypothèse de recherche qui structure cette étude. Cette étape préliminaire me permet de formaliser les intuitions issues de l'état de l'art tout en établissant un cadre pour l'analyse des résultats. La formulation de l'hypothèse joue également un rôle dans la conception même de l'expérimentation. En effet, c'est en anticipant les différences potentielles entre ingénieurs et architectes que j'ai pu déterminer les éléments à observer et les critères d'analyse. Cette réflexion préalable m'a aussi guidée dans le choix de l'exercice à proposer aux participants, ainsi que dans l'élaboration des outils de mesure et d'évaluation. Je présenterai donc d'abord l'hypothèse principale et ses implications, avant d'exposer le cadre expérimental que j'ai mis en place pour la tester.

3.1.1 Hypothèse de recherche

Le BIM a transformé les pratiques de modélisation numérique, offrant des solutions pour améliorer la collaboration entre les divers acteurs du bâtiment, mais des défis subsistent dans la coopération entre ingénieurs et architectes. Bien que des standards de modélisation et des protocoles d'interopérabilité aient été développés pour optimiser ces collaborations, il reste un écart dans la compréhension et l'utilisation de Revit entre ces deux professions.

Dans ce contexte, l'hypothèse de ce mémoire est la suivante :

SI L'APPROCHE DE MODELISATION DANS REVIT VARIE ENTRE INGENIEURS ET ARCHITECTES, UNE DES RAISONS PEUT VENIR DE LA DIFFERENCE DE LEUR FORMATION INITIALE.

Plus précisément, ce cursus influencerait leur compréhension des processus de modélisation, leur approche de la conception paramétrique, ainsi que leur rigueur et leur méthode dans la création d'éléments spécifiques (ici, une famille paramétrée de fenêtre). Cette hypothèse repose sur l'idée que les compétences, priorités, et méthodes propres aux disciplines de l'architecture et de l'ingénierie se traduiraient dans leur manière d'aborder un logiciel de modélisation commun, comme Revit.

Pour tester cette hypothèse, des critères observables et comparables seront utilisés. D'abord, la rigueur dans le respect des consignes de modélisation est un premier critère. En effet, si les ingénieurs et les architectes montrent une homogénéité dans leurs comportements au sein de chaque groupe (par exemple, en suivant ou non les consignes de modélisation), cela pourrait révéler une influence de leur cursus dans leur manière d'aborder les consignes. Ensuite, les choix méthodologiques dans la structuration et paramétrage de la famille constituent un deuxième critère. En effet, en fonction des méthodes choisies pour structurer la famille de fenêtre (paramètres, organisation des éléments, réalisation de types), des différences pourraient refléter les orientations spécifiques de chaque formation, telles que la recherche d'efficacité ou d'esthétisme. Enfin, le degré de flexibilité et d'adaptabilité des modèles serait le troisième critère. En effet, l'aptitude à créer des modèles dynamiques et ajustables peut varier selon les compétences développées en formation. Les ingénieurs, plus axés sur la fonctionnalité technique, pourraient privilégier la précision des paramètres, tandis que les architectes pourraient viser la souplesse dans la conception.

Dès lors, les configurations de résultats potentiels permettront de tester cette hypothèse en distinguant les divergences notables entre groupes, ou l'absence de différences significatives, afin d'interpréter si et comment la formation initiale des participants affecte leur modélisation.

L'objectif de cette recherche est ainsi d'explorer si la formation initiale d'un utilisateur, qu'il soit en école d'ingénieur ou d'architecture, influe sur sa prise en main de Revit. Cette compréhension pourrait, en élargissant la recherche, servir de base à des recommandations pour améliorer la formation des futurs professionnels du BIM, en vue de faciliter une collaboration plus efficace.

3.1.2 Cadre expérimental

a) Echantillon

Cette recherche implique des étudiants provenant des deux écoles dans lesquelles je suis inscrite : **l'Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris (EIVP) et l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris La Villette (ENSAPLV)**. Ces écoles, sont toutes deux reconnues internationalement et ambitionnent de former des professionnels capables de répondre aux défis complexes des projets urbains et architecturaux de demain.

L'EIVP, l'une des rares grandes écoles en France spécialisée dans l'ingénierie urbaine, vise à former des ingénieurs dotés de solides connaissances en sciences et techniques urbaines, capables de les actualiser et de les adapter tout au long de leur vie professionnelle en fonction des innovations technologiques. Les cours sont articulés autour d'un projet par semestre sur un thème spécifique : l'environnement, les data, les systèmes constructifs, la gestion de l'eau et des déchets, l'urbanisme. Les étudiants doivent de plus réaliser des stages afin de commencer à s'orienter vers les diverses branches de l'ingénierie. Le cursus est le même pour tout le monde mais il y a tout de même la possibilité d'effectuer des doubles diplômes en partenariat avec d'autres écoles d'ingénieur ou de commerce afin de spécialiser son profil. De plus, au sein de cette école l'intégration des outils numériques dans la formation initiale intervient lors de la deuxième année et dure un semestre durant lequel ces connaissances acquises sont directement appliquées dans le projet « construction » du semestre.

De son côté, l'ENSAPLV est la deuxième des écoles d'architecture en France, classement ArchiPrep 2022 selon l'intégration des élèves de 1ère année, le cadre de vie, la vie étudiante, l'international. Cette école est connue pour son approche créative et d'une grande diversité dans les approches de projet. Les architectes formés à l'ENSAPLV ont une base théorique et pratique. Les étudiants acquièrent les fondamentaux de l'architecture : techniques de représentation, histoire et théorie de l'architecture et des notions en construction. L'accent est également mis sur les questions sociétales et environnementales, afin que les étudiants comprennent comment l'architecture peut répondre aux besoins de la société. Des projets pratiques permettent aux étudiants d'explorer des problématiques concrètes, souvent sur des thèmes d'urbanisme et de logement. Cette école laisse le choix aux étudiants de se spécialiser en suivant des séminaires et en choisissant quels types de projets ils souhaitent approfondir. Par ailleurs, une des spécificités de cette école est sa volonté de faire perdurer le dessin à la main durant au minimum les deux premières années d'école. Dès lors, les cours d'outils numériques sont dispensés mais pas nécessairement appliqués au projet parallèlement à cet enseignement.

A noter que **les travaux fournis par les étudiants dans le cadre de ce mémoire seront anonymisés** afin d'enlever une certaine pression dans la réalisation de l'exercice. Ainsi j'attribuerai un numéro à chaque étudiant selon qu'il soit ingénieur ou architecte, par ordre de réception de l'exercice : j'obtiens alors **Ingénieur 1,2,3,4,5 et Architecte 1,2,3,4,5**. Dans les tableaux et graphiques ils seront abrégés de la manière suivante I1, I2, I3, I4, I5 et A1, A2, A3, A4, A5.

b) Questionnaire

Dans cette expérience le questionnaire préalable est destiné aux élèves ingénieurs de l'EIVP et aux élèves architectes de l'ENSAPLV, il **visé à collecter des informations sur leur parcours, leurs compétences techniques en modélisation, et leur expérience avec le logiciel Revit**. L'objectif est d'identifier les éventuels biais qui pourraient impacter leur manière d'aborder la conception d'une famille paramétrée. En ayant une vue d'ensemble sur le passé académique et les compétences de chaque participant, il sera possible de mieux comprendre les méthodes et choix observés lors de l'exercice de modélisation, en établissant des liens avec leurs pratiques antérieures.

Ainsi, ce questionnaire est **soumis avant l'exercice de modélisation** pour garantir une évaluation des compétences des étudiants en évitant que l'expérience de la modélisation n'influence leurs réponses. Les étudiants sont informés de la nature de l'exercice, puis

répondent au questionnaire sur internet. J'ai donc réalisé un google form me garantissant une homogénéité des réponses et une mise en forme des statistiques directement, intitulé : « Ton profil Revit ».

L'idée est de réaliser un questionnaire rapide et intuitif, je l'ai alors structuré en plusieurs sections abordant :

- **La discipline de l'élève** : Architecte ou Ingénieur, en éliminant les bicursus car ils peuvent introduire un biais dans l'étude
- **Son niveau d'étude** : L1, L2, L3, M1 ou M2 // 1^{ère} année, 2^{ème} année, 3^{ème} année
- **Son niveau de maîtrise de Revit** : durée de l'enseignement à l'école, autodidacte, expérience professionnelle

Ces informations permettent de saisir le niveau de maîtrise et la diversité des pratiques chez les participants, et d'établir une base de comparaison. Chaque réponse éclaire les compétences spécifiques des élèves, offrant un cadre de référence pour l'analyse de leurs méthodes de modélisation.

3.1.3 L'exercice

a) Le choix de la famille de fenêtre

Dans cette étude, j'ai choisi de me concentrer sur la création d'une famille Revit car elle permet selon moi de mettre en lumière un des aspects fondamentaux du BIM : la modélisation paramétrique ; et qu'elle implique de maîtriser deux compétences différentes : d'une part la logique de programmation, et d'autre part le sens de la représentation visuelle.

Quand on crée une famille Revit, on se retrouve à effectuer un travail qui ressemble à de la programmation, comme en Python par exemple : il faut définir des variables (qu'on appelle paramètres), créer des relations entre elles (avec des formules et des contraintes), et organiser les éléments de manière hiérarchique (en catégories et sous-catégories). C'est un aspect technique qui correspondrait plutôt bien à la formation des ingénieurs, habitués à manipuler ce type de logique mathématique.

Mais en même temps, modéliser une famille demande aussi de réfléchir à son apparence : comment l'objet va se présenter dans l'espace, quelles seront ses proportions, comment il s'affichera dans les différentes vues du projet, et comment il s'intégrera visuellement dans l'ensemble. Cette dimension graphique ferait écho au cursus des architectes, où la représentation visuelle est un critère d'évaluation important.

C'est justement ce double aspect qui m'intéresse : en observant comment chaque participant gère ces deux dimensions - la partie technique du paramétrage et la partie visuelle de la représentation. C'est pourquoi j'ai choisi les familles car ce sont aussi des éléments de la maquette numérique, que tout le monde utilise et partage dans un projet.

Ainsi, afin d'observer les approches spécifiques de chaque étudiant, j'ai élaboré un exercice de modélisation d'une famille de fenêtre. En effet, la fenêtre est un élément architectural aux multiples fonctions : elle agit comme une ouverture, un point d'éclairage naturel, une barrière thermique et sonore, et un passage d'air. La fenêtre est un élément commun aux deux groupes d'étudiants, chacun la côtoie quotidiennement et reste un élément géométriquement simple à modéliser. En modélisant une fenêtre paramétrée, on peut facilement ajuster des variables essentielles comme la largeur, la hauteur, et la hauteur de l'allège. Ces paramètres impliquent une compréhension de la flexibilité requise dans un projet BIM, où chaque élément doit pouvoir s'adapter aux différentes configurations du bâtiment, par exemple l'épaisseur du mur ou sa composition. Ainsi, cela permet de tester la capacité des étudiants à concevoir des éléments modulaires et adaptables, ce qui est crucial dans un environnement BIM où l'adaptabilité des objets intégrés dans la maquette numérique est un critère de collaboration.

b) Règlement de l'exercice

Les participants doivent modéliser une fenêtre paramétrée en utilisant **la version 2025 de Revit**. Ce choix de version vise à éviter les variations dans les fonctionnalités ou le comportement des outils entre les versions. Par ailleurs, les participants **doivent effectuer l'exercice en toute autonomie** pour que les résultats reflètent leurs compétences propres et leurs méthodes individuelles de travail. De plus, l'exercice est structuré pour être réalisé **en un temps limité de deux heures** afin qu'en cas de difficulté, ou d'échec, l'exercice soit tout de même soumis. **Les participants sont invités à lancer un enregistrement de leur écran** avec OBS Studio avant de commencer, puis de l'arrêter une fois l'exercice terminé. En réalité le mode d'enregistrement d'écran n'interfère en rien la modalisation alors si l'écran est enregistré avec un autre logiciel cela n'a aucun impact sur l'analyse des résultats. Cette

vidéo permet de suivre le processus de modélisation, d'observer les décisions prises, les éventuels défis rencontrés, et le niveau de prise en main de chaque étudiant de Revit. Durant l'exercice, **l'usage de Dynamo est interdit** afin d'observer des modélisations suivant une méthodologie se limitant aux compétences de base. En effet Dynamo est un outil de programmation intégré à Revit permettant d'automatiser des tâches et de créer des géométries complexes en connectant des nœuds visuels sans codage direct, ce qui facilite les opérations répétitives et avancées en modélisation BIM. Les étudiants sont aussi **invités à consigner leurs réflexions et leurs doutes sur le processus de modélisation**. Cette documentation est l'occasion d'accompagner leur travail d'indications sur les choix effectués, les difficultés rencontrées, et les solutions envisagées. Enfin, tous les fichiers (vidéo, fichier Revit, notes) sont transmis via WeTransfer pour une collecte centralisée et organisée des données.

c) Les consignes de l'exercice

La fiche (figure 11), a été envoyée aux étudiants par mail. L'idée est de **ne pas contraindre la modélisation en donnant un trop grand nombre de consignes**. L'objectif principal est d'obtenir une modélisation partant de la même base et limiter ainsi des erreurs relevant d'un mauvais choix de gabarit, ce qui ne serait pas utile pour notre analyse et rendrait l'exercice non exploitable.

De plus, pour le dessin de la géométrie de la fenêtre, **aucun modèle n'a été suggéré**. En effet, une possibilité aurait été de préciser le vocabulaire comme « dormant », « ouvrant simple » et « allège » en réalisant un schéma pour éviter toute erreur d'interprétation. Cependant suggérer une forme serait déjà une première façon d'influencer la réalisation de l'exercice. Dès lors l'exercice est expliqué seulement sous la forme **d'un texte demandant 3 éléments de base qui doivent être présents afin de représenter la fenêtre**, l'objectif est de guider la modélisation de l'élève sans l'influencer.

Ensuite, j'ai choisi **de leur indiquer quels sont les critères auxquels leur fenêtre paramétrée sera soumise**. Cette méthode me permet d'appuyer sur certains points de la modélisation afin de suggérer de prêter une attention plus grande à certains critères. En somme, la rédaction de cet exercice consiste en l'élaboration d'un cadre plutôt libre mais tout de même orienté afin de pouvoir comparer les modélisations des deux groupes.

| | |
|--|--|
| | <h1>LA FENÊTRE PARAMÉTRÉE</h1> |
| | <p>Objectif : Le but de cet exercice est de familiariser les étudiants avec la modélisation paramétrique dans Revit en créant une fenêtre paramétrée. Les étudiants utiliseront les outils de modélisation de base, définiront des paramètres et créeront une géométrie flexible et ajustable.</p> |
| | <p>Instructions :</p> <p>Ouvrir Revit Lancez le logiciel Revit sur votre ordinateur.</p> <p>Créer une nouvelle Famille Sélectionnez l'option "Créer" dans le menu d'accueil des Familles de Revit et choisissez le fichier gabarit "Fenêtre métrique", puis "Ouvrir".</p> <p>Dessiner la géométrie de la fenêtre Utilisez les outils de dessin de Revit pour dessiner la géométrie de base de la fenêtre. Le design de la fenêtre est laissé libre, vous pouvez vous pouvez utiliser des références ou dessiner selon vos envies. En revanche celle-ci doit nécessairement comporter les éléments suivants:</p> <ul style="list-style-type: none"> • un dormant • un ouvrant simple • une allège <p>Vous pouvez complexifier votre fenêtre comme vous le souhaitez tant que les éléments de bases sont présents.</p> <p>Paramétrer la fenêtre La fenêtre modélisée sera évaluée selon les critères suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Adaptabilité: Largeur/Hauteur/Hauteur de l'allège par rapport au sol • Dimensions du cadre • Comportement par rapport à un mur avec isolation • Détails selon ce que vous pensez nécessaire: matériaux attribués, signalisation du type d'ouverture, volets ... • Explication de la technique utilisée ainsi que des difficultés rencontrées. En cas de difficultés lors d'un paramétrage veuillez noter les contraintes que vous avez rencontrées et réaliser des hypothèses expliquant pourquoi vous n'y êtes pas arrivés. <p>Le paramétrage de la fenêtre reste libre, les paramètres énoncés ci-dessus sont à titre indicatif, vous pouvez adapter votre modélisation en fonction des contraintes qui vous semblent nécessaires.</p> |

Figure 11: Fiche consigne de la fenêtre paramétrée

3.2 Détermination des axes de comparaison

Après avoir défini le cadre expérimental et présenté l'exercice de modélisation d'une fenêtre paramétrée, il m'a fallu déterminer comment structurer mon analyse pour identifier d'éventuelles différences entre ingénieurs et architectes. Mon double parcours m'a sensibilisée aux aspects que je considère comme révélateurs des divergences potentielles entre ces deux professions. C'est pourquoi j'ai choisi d'articuler mon observation autour de trois axes complémentaires, afin d'identifier des comportements spécifiques et différenciés entre les deux groupes, en tenant compte des possibles attitudes face aux consignes, aux choix méthodologiques et à l'organisation des modèles :

- Respect des consignes de modélisation de base
- Méthodologie de structuration et de paramétrage de la famille
- Degré de flexibilité et adaptabilité de la famille

Ces trois dimensions me permettent de mettre en lumière les approches distinctes que pourraient adopter ingénieurs et architectes dans leur pratique de la modélisation paramétrique. Je vais maintenant détailler et justifier le choix de chacun de ces axes d'analyse.

3.2.1 Justification des axes de comparaison

Ces critères ont été sélectionnés non seulement en raison de leur pertinence pour observer des divergences dans les pratiques de modélisation en éclairant la manière dont la formation initiale influence le processus de création dans un environnement BIM.

En effet, le respect des consignes s'est imposé comme un premier critère d'observation pour cette étude comparative. Pour analyser les différences de modélisation entre ingénieurs et architectes, il est d'abord nécessaire de s'assurer que tous les participants réalisent l'exercice selon un cadre commun. Sans cette base méthodologique partagée, il deviendrait impossible de distinguer les différences liées à la formation de celles liées à une divergence d'interprétation des consignes. Ces observations révéleraient aussi des divergences potentielles dans leurs pratiques, reflétant possiblement l'influence de leur cursus sur leur rapport aux méthodologies imposées

Ensuite, le choix de la méthodologie de structuration et de paramétrage de la famille comme deuxième critère repose sur l'idée que la structuration interne d'un modèle est un indicateur de la compréhension technique et de la capacité à naviguer dans le logiciel. Ce critère permet de se concentrer sur la compétence technique liée à l'organisation des éléments dans le modèle, et comment celle-ci peut varier en fonction de la formation. Le paramétrage d'une famille paramétrée dans Revit reflète des choix méthodologiques influencés par la formation.

Enfin, la flexibilité et l'adaptabilité du modèle permettent de s'intégrer dans la démarche BIM, car celle-ci requiert une capacité à ajuster un modèle aux évolutions d'un projet. Bien que des critères comme la précision des dimensions ou la complexité des formes pourraient être considérés, la flexibilité permet de mieux saisir l'anticipation par les participants des contraintes nécessaires. Cela met en évidence la capacité d'adaptation, influencée par la manière dont les architectes et les ingénieurs abordent les projets.

In fine, ces trois axes ont été sélectionnés car ils permettent d'analyser des dimensions du processus de modélisation telles que la rigueur méthodologique, la compréhension technique et la capacité d'adaptation. Bien que d'autres critères, comme la créativité ou l'esthétique, puissent être pertinents dans certains contextes, ces trois axes sont les plus adaptés pour observer les différences de formation et d'approches disciplinaires dans un cadre BIM, et pour comprendre comment ces différences influencent la collaboration interdisciplinaire.

3.2.2 Respect des consignes de modélisation de base

Ce premier axe examine l'application des consignes données pour la création de la famille paramétrée.

- Si les étudiants ne respectent pas les consignes de modélisation, alors cela peut s'expliquer par diverses raisons : une incompréhension des instructions, une volonté d'explorer d'autres options, ou encore un manque de familiarité avec Revit.
- Si ces déviations se généralisent au sein d'un même groupe d'étudiants (ingénieurs ou architectes), alors cela pourrait révéler une approche caractéristique de leur cursus.

D'abord j'observe la conformité aux trois éléments requis (un dormant, un ouvrant simple, une allège). Tous les étudiants doivent intégrer les trois éléments essentiels requis dans la consigne. Si des divergences apparaissent, par exemple, les ingénieurs sont plus rigoureux dans le respect des consignes ou les architectes prennent des libertés, cela pourrait montrer des différences dans leur approche de la modélisation influencée par leur cursus.

Ensuite, je prête attention à l'homogénéité dans le respect des consignes. En effet, la cohérence des réponses au sein de chaque groupe, par exemple, tous ou presque tous les ingénieurs respectent les consignes versus des divergences plus marquées chez les architectes, permettrait de déterminer si la rigueur méthodologique varie d'un groupe à l'autre. Enfin, je pourrais sortir des points forts et des points faibles selon les critères qui ont été respectés et peut-être extraire des tendances pour chacun des groupes.

3.2.3 Méthodologie de structuration et de paramétrage de la famille

Ce second axe s'intéresse à la manière dont les participants organisent les éléments de la famille paramétrée et les paramètres qu'ils appliquent. La structuration reflète la compréhension technique et la méthode appliquée pour rendre la famille opérationnelle et adaptable dans la maquette BIM.

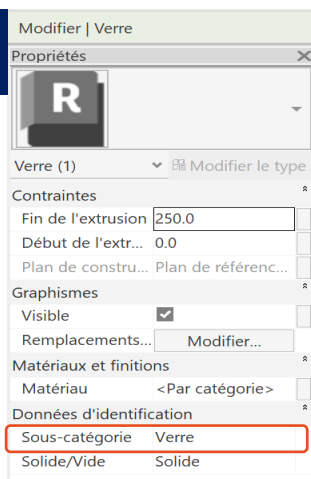


Figure 12: Attribution sous-catégorie

D'abord j'observe l'organisation des éléments, en effet c'est en analysant la manière dont les éléments sont disposés et catégorisés dans la famille que je pourrais constater des divergences ou des concordances. Une catégorisation claire et méthodique, pourrait être plus courante chez les ingénieurs, tandis que les architectes pourraient ne pas en adopter. En effet dans la réalisation d'une fenêtre il est possible d'attribuer à chaque composant une « sous-catégorie » telle que « verre » par exemple, comme figure 12.

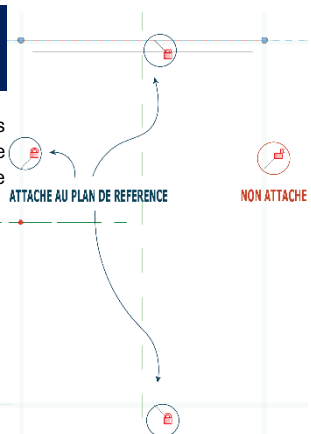


Figure 13: Attaches aux plans de référence

Ensuite, un second critère serait l'observation de l'utilisation des plans de référence. En effet, il est possible de modéliser sans attacher les lignes de modèle aux plans de référence. (figure 13) Cependant, ne pas le faire reflète une maîtrise limitée ou une méconnaissance de la fonction et des implications des plans de référence. Dès lors, si cette tendance se confirme dans l'un ou l'autre des groupes, cela pourrait indiquer une lacune spécifique dans les connaissances ou les pratiques de modélisation des deux groupes.

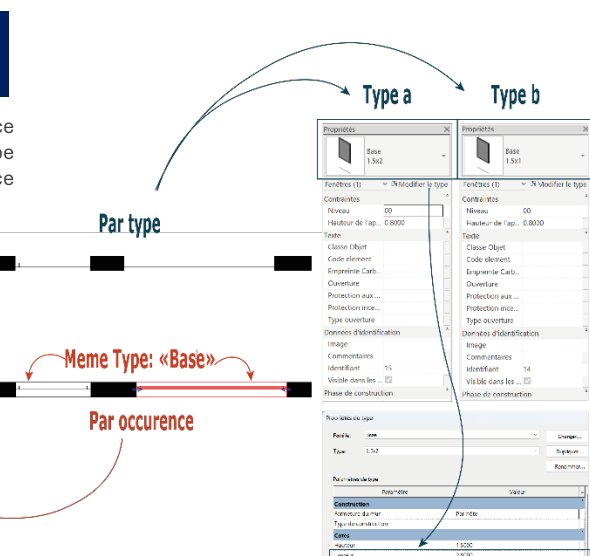


Figure 14: Différence paramètre par type ou par occurrence

Enfin, la gestion des paramètres selon qu'ils soient définis par type ou par occurrence reflète une priorisation entre la standardisation (paramètres par type) et la flexibilité individuelle (paramètres par occurrence) dans la modélisation. (figure 14) Ainsi, une différence pourrait apparaître dans la manière dont chaque groupe équilibre ces deux approches.

3.2.4 Degré de flexibilité et d'adaptabilité de la famille

Ce dernier axe évalue dans quelle mesure les modèles créés par les participants sont dynamiques et adaptables aux changements dans la maquette. La flexibilité d'une famille paramétrique permet de générer des variantes sans refaire la modélisation de base. Ce critère met en lumière la capacité des participants à concevoir des modèles à la fois fonctionnels et adaptables, reflet de leurs priorités de formation.

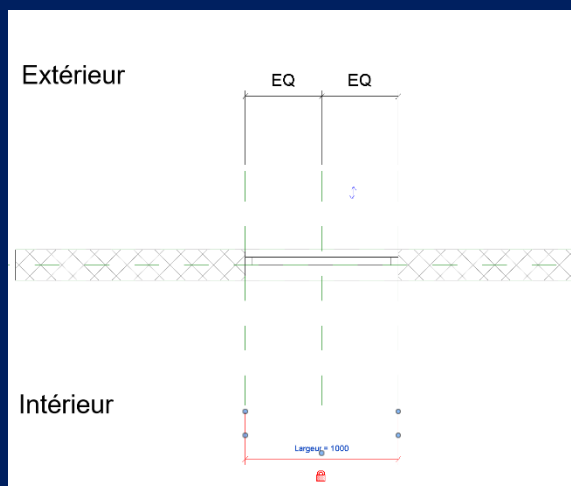


Figure 16: Vue en plan du paramètre « largeur »

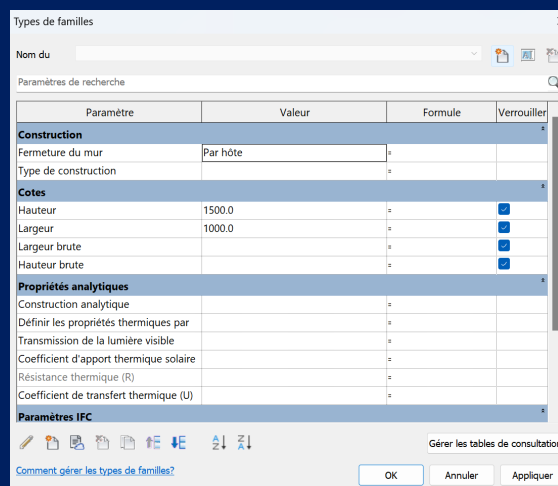


Figure 16: Fenêtre « gestion des types de la famille »

D'abord j'identifie la possibilité d'ajustement des paramètres, combien et quels sont-ils en les identifiant en élévation ou en plan (figure 15) et à partir de la fenêtre « gestion des types de la famille » (figure 16). En effet, la possibilité d'ajuster les paramètres pour créer des types de fenêtres différentes est un critère important dans la mesure où dans un projet une même fenêtre se répète mais ne possède pas nécessairement les mêmes dimensions.

Ensuite, j'examine l'attribution des matériaux à travers la gestion des sous-catégories. Cette organisation des éléments selon leur nature (vitrage, dormant, etc.) permet une meilleure adaptabilité lors de l'intégration dans différents projets. La rigueur dans cette catégorisation pourrait varier selon la formation initiale des participants.

Enfin, j'analyse la gestion de la visibilité des éléments. La configuration des paramètres de visibilité, permettant par exemple de masquer certains composants selon les vues, reflète une compréhension des besoins de représentation. Cette capacité à gérer différents niveaux de détail selon le contexte pourrait être plus développée chez certains participants selon leur formation.

3.3 Conception de la grille d'observation

Pour mettre en évidence les différences potentielles dans la modélisation entre ingénieurs et architectes, j'ai besoin de mettre en place un système me permettant d'organiser ma comparaison, ainsi je réalise une grille d'observation. Dès lors, je l'organise autour des trois axes de comparaison clés : le respect des consignes de modélisation de base, la méthodologie de structuration et de paramétrage de la famille, et le degré de flexibilité et d'adaptabilité de la famille. Ces axes sont déclinés en critères spécifiques, qui doivent être évalués selon une méthode neutre qui allie des mesures quantitatives et qualitatives. Ce double niveau d'évaluation permet une analyse descriptive sans biais, en évitant toute simplification statistique, qui pourrait masquer les nuances des comportements. Cette approche par échelons et par observations qualitatives vise à mettre en exergue des

tendances et des choix méthodologiques typiques à chaque groupe, facilitant ainsi la comparaison.

3.3.1 Recueil des observations pour le respect des consignes de modélisation de base (1^{er} axe)

Dans un premier temps, pour analyser la rigueur méthodologique des participants, je créer un score de conformité binaire : 1 point par critère respecté ; 0 point sinon ; pour chaque consigne de modélisation qui sont :

| | |
|--|--|
| Adaptabilité | La fenêtre paramétrée est conçue de manière à pouvoir être adaptée facilement à différentes tailles et configurations de baies. |
| Dimensions du cadre | Les dimensions du cadre de la fenêtre sont ajustables selon les besoins du projet. |
| Comportement par rapport à un mur avec isolation | L'élève réalise des tests pour vérifier si la fenêtre paramétrée se positionne correctement par rapport au mur. Il effectue des changements de la nature du mur composé d'une partie structurelle et d'une partie isolante afin de vérifier le positionnement de la fenêtre. |
| Niveau de détail de la fenêtre | La fenêtre comporte les éléments de base : un dormant, un ouvrant simple et une allège. |
| Explications lors de la modélisation | L'étudiant fournit des explications claires et détaillées lors de la modélisation, expliquant son raisonnement et les décisions prises. |

Figure 17: Explications sous-critères 1er axe

Ce tableau (figure 17) me permet d'observer le respect strict des consignes sans interprétation. La consigne est soit respectée soit elle ne l'est pas pour chacun des critères. En revanche pour le critère du niveau de détail de la fenêtre, comme la consigne demande trois éléments, j'ai choisi d'attribuer un point par élément modélisé. Par exemple, si la fenêtre comporte un dormant et un ouvrant simple mais pas d'allège alors il a respecté deux consignes sur 3. Ainsi, on obtient une échelle de respect des consignes sur un total de 4 critères binaires plus un critère pesant 3, soit finalement le respect de 7 consignes. Ainsi j'établis une échelle de conformité aux consignes de la manière suivante :

- 6-7 : Conformité élevée
- 4_5 : Conformité partielle
- 2-3 : Conformité minimale
- 0-1 : Aucune conformité

En parallèle de cette analyse de conformité je note quelles sont les consignes respectées ou ignorées par chaque groupe.

3.3.2 Recueil des observations pour la méthodologie de structuration et de paramétrage de la famille (2^{ème} axe)

Dans un premier temps, pour analyser la compréhension technique je créer un score d'organisation :

D'abord, je décompose la méthodologie en sous-critères :

| | |
|---|--|
| Création de types dans la famille | Les types, dans la famille paramétrique, permettent de générer des variantes d'un même objet. Par exemple, une fenêtre déclinée dans différentes dimensions peut être modélisée en types distincts. Cela reflète la capacité des étudiants à anticiper les besoins de flexibilité et à structurer leur travail. |
| Accrochage aux plans de référence | Les éléments du modèle sont-ils liés à des plans de référence ? Ces derniers sont des plans qui sont en relation les uns avec les autres permettant de préserver la stabilité du modèle lors des ajustements ou modifications. Ainsi, ils servent de base pour modéliser les éléments en liant ces derniers aux plans qui eux sont liés aux paramètres. |
| Gestion des paramètres par type ou par occurrence | Les paramètres <i>par type</i> définissent des valeurs communes pour toutes les instances d'un type spécifique, tandis que les paramètres <i>par occurrence</i> permettent des ajustements indépendants pour chaque instance. Ce choix reflète la manière dont les participants priorisent entre précision (type) et adaptabilité (occurrence) dans la modélisation. |

Figure 18: Explications sous critère 2ème axe

J'attribue un score de 0 à 2 pour chaque sous-critère selon l'échelle suivante :

- 2/2 : structuration méthodique,
- 1/2 : structuration basique,
- 0/2 : absence de structuration

Dès lors, je réalise une classification en niveaux de structuration, en totalisant les scores pour chaque sous-critère afin de positionner chaque participant dans une classification :

- 5-6 : Structuration élevée
- 3-4 : Structuration intermédiaire
- 1-2 : Structuration faible

Ainsi cette méthode me permet d'observer les scores par classification pour déterminer s'il existe une différence de structuration par groupe.

En parallèle de cette analyse, je cherche à identifier des comportements méthodologiques spécifiques à chaque groupe, par exemple la façon de réaliser les extrusions, si elle est précise ou non, dépendante de l'outil choisi. Ou encore, j'observe la manière dont les participants semblent comprendre la logique des plans de référence et des catégories d'éléments.

3.3.3 Recueil des observations pour le degré de flexibilité et adaptabilité de la famille (3^{ème} axe)

De manière analogue au second axe, pour analyser la capacité d'adaptation j'établis un score d'adaptabilité :

D'abord, je décompose la méthodologie en sous-critères :

| | |
|---------------------------------------|---|
| Ajustement des dimensions | Ici, je m'intéresse à la capacité du modèle à être ajusté selon différentes dimensions sans compromettre son intégrité. Ce critère illustre l'aptitude des étudiants à avoir réalisé des paramètres permettant de modifier non seulement les dimensions de la fenêtre mais aussi d'autres éléments comme celles du cadre. |
| Catégorisation des éléments | Ce critère vérifie si les participants ont attribué des catégories aux différents éléments de la famille (par exemple, verre pour le vitrage, cadre pour le dormant). Cela permet par la suite d'adapter les matériaux directement dans la maquette globale, donnant un degré supplémentaire d'adaptabilité. |
| Gestion de la visibilité des éléments | Les étudiants ont-ils configuré la visibilité des éléments selon les besoins d'affichage, comme masquer certaines parties dans les vues 2D tout en les montrant en 3D ? Une bonne gestion de la visibilité indique une attention aux détails et une compréhension des différents niveaux de représentation. |

Figure 19: Explication sous-critères 3ème axe

J'attribue un score de 0 à 2 pour chaque sous-critère selon l'échelle suivante :

- 2/2 : adaptabilité optimale,
- 1/2 : adaptabilité partielle,
- 0/2 pour absence d'adaptabilité

Ensuite, j'établis un score de robustesse, c'est-à-dire, je vérifie la capacité de la famille à maintenir sa fonctionnalité après intégration dans une maquette numérique d'un projet.

Ainsi j'établis une notation de 0 à 2 selon l'échelle suivante :

- 2/2 : aucun élément n'est perturbé
- 1/2 : un seul élément est perturbé
- 0/2 : plusieurs éléments sont perturbés

Dès lors, en sommant le score d'adaptabilité et de robustesse, je réalise une classification en niveaux de structuration selon un score de flexibilité :

- 7-8 : Modèle très flexible
- 4-6 : Modèle moyennement flexible
- 0-3 : Modèle rigide

Ainsi, cette méthode me permet d'observer la répartition des participants dans chaque groupe pour voir si l'un des groupes se concentre davantage dans une catégorie de flexibilité spécifique.

En parallèle de cette analyse, j'observe si des paramètres particuliers sont systématiquement utilisés ou négligés, par exemple, les dimensions sont souvent ajustables, mais la visibilité des éléments l'est rarement.

3.4 Méthode d'analyse des résultats par axe

3.4.1 Respect des Consignes de Modélisation de Base

Je présenterai le pourcentage de participants ayant respecté chaque consigne, comparé entre ingénieurs et architectes. Sous la forme d'un histogramme de fréquence par groupe les résultats permettront de visualiser le nombre de participants ayant respecté les consignes, critère par critère. A partir de cela je peux interpréter les résultats en termes de tendances. Par exemple, si les ingénieurs montrent un taux plus élevé de respect des consignes, cela pourrait suggérer une rigueur méthodologique, tandis qu'une flexibilité dans les consignes chez les architectes pourrait indiquer une liberté d'interprétation.

3.4.2 Méthodologie de Structuration et de Paramétrage de la Famille

Je rendrai compte des choix de structuration réalisant un diagramme en radar pour chaque groupe afin de montrer visuellement les tendances selon les différents sous-critères de structuration (catégorisation, plans de référence, paramètres de dimension). Cela me permettra de discuter de l'approche adoptée par chaque groupe. Par exemple, une structuration plus détaillée chez les ingénieurs pourrait être interprétée comme une rigueur, tandis qu'une absence de certains paramètres pourrait montrer une certaine liberté chez certains architectes.

3.4.3 Degré de Flexibilité et d'Adaptabilité de la famille

A l'instar de l'analyse de la structuration je rendrai compte des choix de flexibilité à travers un diagramme en radar. Cette approche permet d'illustrer les tendances observées selon les différents sous-critères : l'ajustement des dimensions, la catégorisation des éléments, la gestion de la visibilité et la robustesse du modèle.

Les résultats seront présentés pour chaque groupe afin de mettre en évidence les similitudes et les divergences dans leur approche. Cette visualisation facilitera l'identification des caractéristiques dominantes dans chaque groupe. Par exemple, une distribution des points vers les sous-critères d'ajustement des dimensions et de catégorisation des éléments chez les ingénieurs pourrait indiquer une préférence pour le contrôle technique. En parallèle, une concentration vers la gestion de la visibilité chez les architectes suggérerait une attention particulière à la représentation graphique.

3.5 Configurations de résultats envisagées et interprétations possibles

Dès lors, en observant les réponses aux consignes de modélisation, aux méthodes de structuration, et à la capacité d'adaptation de la famille, il devient possible d'identifier des tendances communes ou des différences entre les groupes. Cette démarche permet de tester l'hypothèse selon laquelle la formation initiale influence les pratiques de modélisation, tout en explorant plusieurs scénarios d'interprétation possibles. Ainsi, suivant les comportements observés : qu'ils soient homogènes dans chaque groupe, similaires entre groupes, ou variés au sein même de chaque groupe ; des pistes d'interprétation sont envisagées pour approfondir notre compréhension des différences ou similarités dans l'usage des outils BIM.

3.5.1 Comportements distincts entre ingénieurs et architectes

Lorsque l'analyse révèle des comportements distincts entre ingénieurs et architectes, avec, par exemple, une majorité d'ingénieurs suivant rigoureusement les consignes tandis que les architectes adoptent une approche plus flexible, il est possible d'interpréter cette différence comme un effet de la formation initiale. Une telle homogénéité dans les comportements des deux groupes pourrait refléter des habitudes méthodologiques influencées par leur parcours : rigueur méthodologique chez les ingénieurs, potentiellement, et davantage de flexibilité chez les architectes. Cependant, cette interprétation doit être nuancée par la prise en compte d'autres facteurs, tels que l'attention portée aux consignes ou une attitude critique vis-à-vis des instructions, qui pourraient également expliquer ces différences.

3.5.2 Absence de différences significatives entre groupes

Dans le cas où l'étude ne révélerait aucune différence significative entre les groupes, on pourrait remettre en question l'hypothèse selon laquelle la formation initiale influence les pratiques de modélisation. Cela signifierait que les deux groupes abordent la modélisation de manière similaire, ce qui indiquerait que d'autres facteurs, non liés au type de formation, jouent un rôle prépondérant dans leur pratique. Cela pourrait inviter à explorer des éléments tels que l'expérience pratique en modélisation, les habitudes d'apprentissage acquises en dehors de leur formation initiale, ou l'influence de la formation, et à repenser les hypothèses pour orienter des recherches futures vers des éléments de diversité des pratiques observées dans des contextes professionnels plus vastes.

3.5.3 Variabilité au sein de chaque groupe sans distinction nette

Enfin, si l'étude met en évidence une variabilité importante au sein de chaque groupe, sans distinction nette entre ingénieurs et architectes, cela suggérerait que les pratiques de modélisation sont davantage façonnées par des facteurs individuels. Ces différences, qui transcendent les distinctions de formation, pourraient refléter les préférences personnelles, l'expérience pratique propre à chaque participant, ou des différences d'aptitudes. Face à cette situation, il pourrait être pertinent de poursuivre l'analyse par le biais de questionnaires ou d'entretiens qualitatifs, permettant de recueillir des informations sur les parcours individuels, les habitudes de travail, et les motivations. Une telle approche permettrait d'approfondir la compréhension de la diversité des comportements et d'explorer des facteurs personnels qui influencent les pratiques de modélisation au-delà de la formation initiale.

4. Analyse des résultats

A présent je suis en mesure d'examiner les résultats de l'exercice visant à identifier s'il existe des différences de modélisation d'une famille paramétrée dans Revit entre ingénieurs et architectes. La méthodologie présentée précédemment structure l'analyse selon trois axes : le respect des consignes de modélisation, la méthodologie de structuration et de paramétrage, et le degré de flexibilité et d'adaptabilité des familles créées. Pour répondre à cette problématique, j'organise l'analyse en trois temps. Dans un premier temps, une présentation des données recueillies établit le profil des participants et leur niveau d'expérience avec Revit, fournissant le contexte nécessaire à l'interprétation des résultats. Dans un second temps, une analyse comparative examine les résultats obtenus selon les trois axes définis. Enfin, une synthèse met en perspective ces résultats pour identifier les corrélations entre formation initiale et pratiques de modélisation.

Cette approche permet d'exploiter de manière systématique les données issues des questionnaires préalables, des fichiers Revit produits et des enregistrements vidéo, tout en maintenant une cohérence avec les objectifs de recherche. L'analyse quantitative des scores obtenus est complétée par une analyse qualitative des choix de modélisation, offrant ainsi une compréhension nuancée des différences observées entre les deux groupes.

4.1 Présentation des résultats

4.1.1 Profil des participants établis par le questionnaire

a) Composition des groupes

L'étude s'appuie sur un échantillon de dix étudiants, également répartis entre l'École des Ingénieurs de la Ville de Paris (EIVP) et l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris La Villette (ENSAPLV). Les questionnaires préliminaires visent à établir le profil de formation Revit de chaque participant avant l'exercice de modélisation.

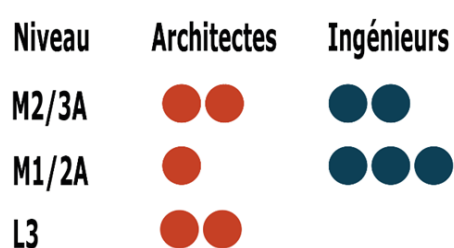


Figure 20: Profil des étudiants par niveau d'étude

Comme figuré ci-contre, figure 20, parmi les architectes, deux étudiants sont en master 2, un en master 1 et deux en licence 3. Du côté des ingénieurs, deux sont en troisième année, trois sont en deuxième année. Cette répartition permet d'observer des participants à différents stades de leur formation.

b) La formation Revit des participants

L'exploitation des questionnaires préliminaires met en évidence trois modes d'apprentissage distincts de Revit : la formation académique, l'apprentissage autodidacte et l'expérience professionnelle. L'analyse de ces trois composantes révèle des disparités significatives tant entre les deux groupes qu'au sein de chaque formation. On obtient le diagramme suivant, figure 21, exposant pour chaque étudiant leur relation aux trois modes d'apprentissage de Revit :

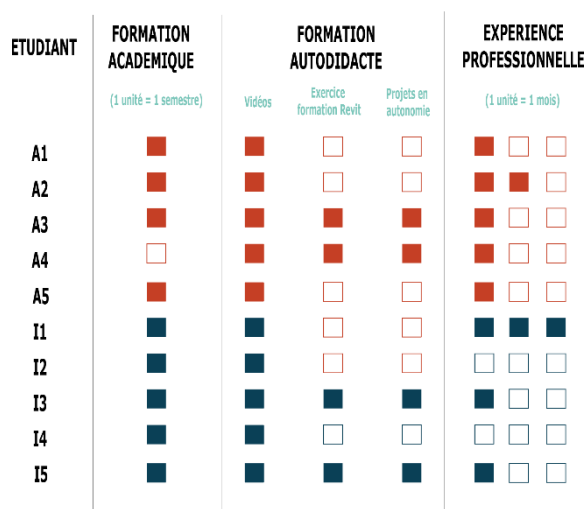


Figure 21: Les modes d'apprentissage Revit

Les résultats du questionnaire révèlent dans un premier temps que quatre architectes sur cinq ont suivi un semestre de formation Revit dans leur cursus. Alors que les cinq étudiants ingénieurs présentent une formation académique uniforme, avec un semestre de cours Revit reçu dans le cadre de leur cursus obligatoire en deuxième année. Cette homogénéité reflète l'intégration systématique de cet enseignement dans leur programme.

D'autre part, on remarque des tendances similaires entre les ingénieurs et les architectes avec un investissement personnel varié selon les étudiants. En effet, dans les deux cursus, 2/5 étudiants démontrent un engagement plus important dans leur apprentissage autonome. Cette formation personnelle est principalement basée sur des tutoriels en ligne. Cette proportion identique suggère que la motivation à approfondir la maîtrise de Revit transcende les différences de formation initiale.

Enfin, on remarque cette fois une disparité au niveau de l'expérience professionnelle entre les ingénieurs et les architectes. En effet l'exposition à Revit en contexte professionnel varie selon les niveaux d'études car liée aux stages réalisés qui se déroulent durant le cursus. Les étudiants architectes ont eu une exposition plutôt limitée à Revit durant leurs premiers stages mais tout de même existante. Alors que dans le groupe des ingénieurs, un étudiant se distingue par une expérience professionnelle significative avec Revit. Quand deux d'entre eux n'ont pas eu l'occasion d'utiliser Revit dans un contexte professionnel et les deux derniers ont eu une expérience limitée. Cette disparité peut s'expliquer chez les ingénieurs par une possibilité de réaliser des stages dans beaucoup de domaines divers qui ne participent pas à la phase de conception par exemple.

c) Implications pour l'analyse des compétences

La distribution observée des modes d'apprentissage soulève plusieurs points d'attention pour l'analyse des compétences en modélisation. D'une part, l'homogénéité de la formation académique chez les ingénieurs pourrait favoriser une approche plus standardisée de la modélisation au sein de ce groupe. D'autre part, la complémentarité entre formation académique et apprentissage autodidacte suggère que les deux groupes d'étudiants prêtent le même niveau d'intérêt à ce logiciel. Enfin, les variations dans l'expérience professionnelle peuvent influencer la familiarité avec les contraintes pratiques de la modélisation.

Ces observations préliminaires constituent un cadre de référence essentiel pour l'interprétation des résultats de l'exercice de modélisation et l'analyse des différences potentielles entre les deux groupes.

4.1.2 Résultats obtenus par axe d'observation

a) Respect des consignes de modélisation

Les résultats du premier axe d'observation concernent le respect des consignes de modélisation. Les données recueillies montrent des variations dans l'application des consignes entre les participants.

Dans un premier temps, lors de la réception des documents utiles à l'étude, j'ai constaté que seulement un élève avait pris le temps de commenter sa modélisation dans l'enregistrement vidéo. Ainsi ce critère n'est en aucun cas utile pour confirmer ou infirmer l'hypothèse. De plus, personne n'a respecté la consigne en testant le comportement de la fenêtre par rapport à un mur avec isolation. En revanche certains ont réalisé une cote afin d'ajuster la position de la fenêtre par rapport au nu du mur. Ainsi j'adapte mon critère à l'échantillon et j'observe si oui ou non l'élève met en place une stratégie permettant de contrôler la position de la fenêtre par rapport au nu du mur. Je réalise le tableau récapitulatif suivant :

Figure 22: Résultats respect des consignes

| Etudiant | Adaptabilité | Dimensions cadre | Mur isolé | Niveau détail | Explications | Score conformité |
|----------|--------------|------------------|-----------|---------------|--------------|------------------|
| A1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 3 |
| A2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0 | 5 |
| A3 | 1 | 1 | 0 | 3 | 0 | 5 |
| A4 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 |
| A5 | 1 | 1 | 0 | 2 | 0 | 4 |
| I1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 0 | 6 |
| I2 | 1 | 0 | 1 | 3 | 0 | 5 |
| I3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 0 | 6 |
| I4 | 1 | 1 | 0 | 2 | 0 | 4 |
| I5 | 1 | 1 | 0 | 3 | 1 | 6 |

Nous obtenons alors une distribution de conformité suivant l'échelle établie dans la méthodologie telle que :

| Niveau de conformité | Architectes | Ingénieurs |
|----------------------|-------------|------------|
| Élevée (6-7) | 0 | 3 |
| Partielle (4-5) | 3 | 2 |
| Minimale (2-3) | 2 | 0 |
| Aucune (0-1) | 0 | 0 |

Rappel méthodologique : L'évaluation du respect des consignes repose sur cinq critères distincts notés selon une échelle binaire (0-1), à l'exception du niveau de détail noté sur trois points (0-3). (Allège, dormant, ouvrant)

Figure 23: Distribution score de conformité

b) Structuration et paramétrage

Les résultats du deuxième axe concernent la méthodologie de structuration et le paramétrage des familles. Les données présentent des variations dans les approches.

Figure 24: Résultats niveau de structuration

| Participant | Création types | Plans référence | Gestion paramètres | Score structuration |
|-------------|----------------|-----------------|--------------------|---------------------|
| A1 | 0 | 2 | 0 | 2 |
| A2 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| A3 | 2 | 0 | 1 | 3 |
| A4 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| A5 | 2 | 0 | 1 | 3 |
| I1 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| I2 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| I3 | 2 | 2 | 1 | 5 |
| I4 | 1 | 2 | 1 | 4 |
| I5 | 2 | 2 | 1 | 5 |

Nous obtenons alors une distribution de structuration suivant l'échelle établie dans la méthodologie telle que :

Figure 25: Distribution score de structuration

| Niveau de structuration | Architectes | Ingénieurs |
|-------------------------|-------------|------------|
| Élevée (5-6) | 0 | 2 |
| Intermédiaire (3-4) | 3 | 3 |
| Faible (1-2) | 2 | 0 |

Rappel méthodologique : L'évaluation de la méthodologie de structuration s'appuie sur trois critères, chacun noté sur une échelle de 0 à 2 points : absence de structuration à structuration méthodique.

Observations des comportements méthodologiques :

- Ingénieurs 3, 4 et 5 : Utilisation systématique des plans de référence avec hiérarchisation claire
- Ingénieurs 1 et 2 et Architecte 2 : Utilisation partielle, pour les dimensions principales
- Architecte 1 : Organisation des plans malgré une modélisation simple
- Architectes 3, 4 et 5 : Modélisation directe sans plans de référence
- Tous les ingénieurs et architectes 2, 3, 4, 5 : Gestion des paramètres basiques, seulement pour les dimensions principales
- Architecte 1 : Paramètres non définis, dimensions fixes

c) Flexibilité et adaptabilité

Les résultats du troisième axe concernent la flexibilité et l'adaptabilité des familles créées.

Les données présentent des variations dans les approches.

Figure 26: Résultats niveau de flexibilité

| Participant | Tests ajustements | Attribution matériaux | Gestion visibilité | Robustesse | Score flexibilité |
|-------------|-------------------|-----------------------|--------------------|------------|-------------------|
| A1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 6 |
| A2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| A3 | 0 | 2 | 2 | 0 | 6 |
| A4 | 0 | 2 | 1 | 0 | 6 |
| A5 | 0 | 1 | 2 | 0 | 5 |
| I1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 4 |
| I2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| I3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 |
| I4 | 1 | 1 | 0 | 1 | 3 |
| I5 | 2 | 0 | 1 | 2 | 5 |

Nous obtenons alors une distribution de structuration suivant l'échelle établie dans la méthodologie telle que :

Figure 27: Distribution des scores de flexibilité

| Niveau flexibilité | Architectes | Ingénieurs |
|----------------------------|-------------|------------|
| Très flexible (7-8) | 0 | 0 |
| Moyennement flexible (4-6) | 5 | 3 |
| Rigide (0-3) | 0 | 2 |

Rappel méthodologique : L'évaluation de la méthodologie de flexibilité s'appuie sur trois critères d'adaptabilité, chacun noté sur une échelle de 0 à 2 points : absence d'adaptabilité à adaptabilité optimale. Plus un critère de robustesse : avec 2 points si aucun élément perturbé ; 1 point si un seul élément perturbé, 0 point si plusieurs.

Observations des comportements méthodologiques :

- Architectes 3 et 4 ont utilisé les sous-catégories pour la gestion des matériaux, tandis que les Ingénieurs 1 et 5 ont négligé cet aspect.
- Architectes 1, 3 et 5, se sont servis de la visibilité des éléments pour ajuster le niveau de détail de la représentation.

4.1.3 Synthèse des résultats obtenus

La présentation des résultats selon les trois axes d'observation révèle des distributions distinctes dans la manière dont les ingénieurs et les architectes ont abordé l'exercice de modélisation.

D'abord, concernant la conformité aux consignes, une différence apparaît entre les deux groupes, comme figuré ci-dessous (figure 28). Les ingénieurs démontrent un niveau de conformité globalement plus élevé, avec trois étudiants atteignant un niveau élevé et deux un niveau partiel. En revanche, les architectes se répartissent entre les niveaux partiel et minimal, avec aucun étudiant n'atteignant le niveau élevé. Cette distribution suggère une approche plus méthodique de la part des ingénieurs dans le respect des directives données.

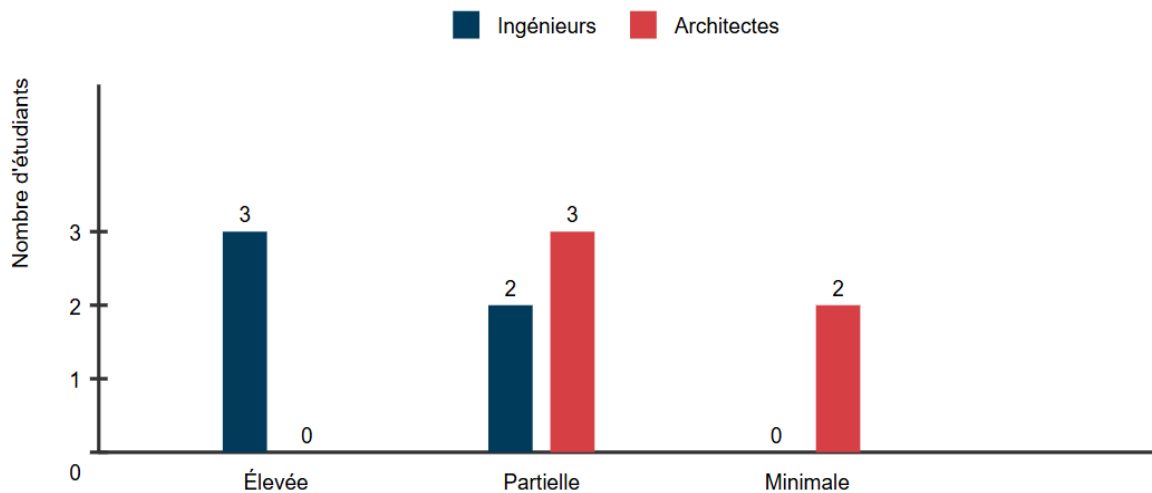


Figure 28 : Distribution scores de conformité

Ensuite, au niveau de la structuration, la répartition présente un profil différent, comme figuré ci-dessous (figure 29). Les ingénieurs se concentrent dans les niveaux élevé et intermédiaire, témoignant d'une certaine homogénéité dans leur approche. Les architectes, quant à eux, montrent une distribution plus étalée : trois étudiants se situent au niveau intermédiaire et deux au niveau faible. Cette dispersion pourrait indiquer des approches plus diversifiées dans la méthodologie de structuration chez les architectes.

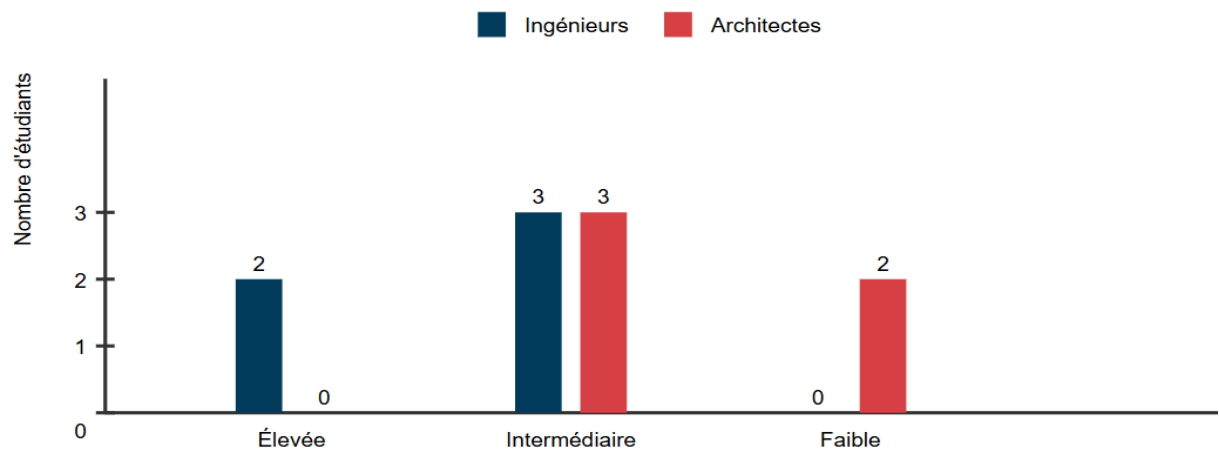


Figure 29: Distribution scores de structuration

Enfin, l'axe de la flexibilité révèle une tendance inverse aux observations précédentes, comme figuré ci-dessous (figure 30). La totalité des architectes atteint un niveau moyennement flexible, tandis que les ingénieurs se divisent entre moyennement flexible (trois étudiants) et rigide (deux étudiants). Cette distribution suggère une plus grande adaptabilité dans les modèles produits par les architectes.

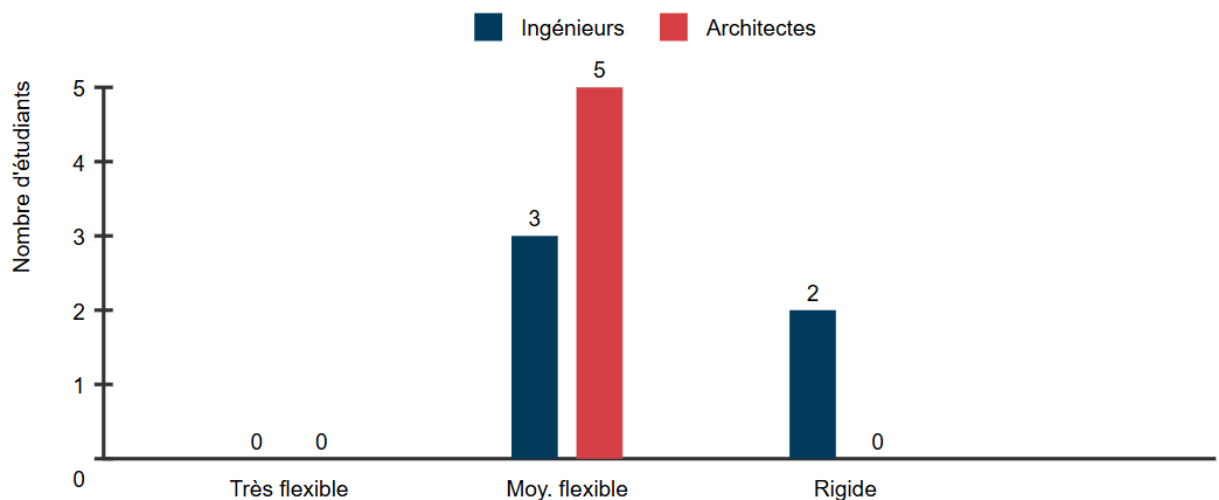


Figure 30: Distribution scores de flexibilité

Ces résultats mettent en évidence des différences dans les approches de modélisation entre les deux groupes. Les ingénieurs semblent privilégier la rigueur et la conformité, tandis que les architectes favorisent la flexibilité. Ces observations constituent une étape préliminaire pour l'analyse approfondie des corrélations entre la formation initiale et les pratiques de modélisation.

4.2 Analyse comparative des trois axes

La présentation des résultats par axe d'observation permet d'établir un premier constat des différences entre les deux groupes. Cependant, pour comprendre pleinement l'influence de la formation sur les pratiques de modélisation, il est nécessaire d'analyser en détail chaque axe en utilisant des méthodes d'analyses exposées précédemment. Cette analyse comparative approfondie s'appuie sur des visualisations adaptées à chaque type de donnée : un histogramme de fréquence pour le respect des consignes, permettant d'observer les taux de conformité critère par critère, et des diagrammes en radar pour la structuration et la flexibilité, illustrant les tendances dans les choix méthodologiques. Cette approche vise à identifier précisément les points de divergence et de convergence entre ingénieurs et architectes dans leur utilisation de Revit.

4.2.1 Respect des consignes de modélisation

L'analyse du respect des consignes révèle des différences entre les deux groupes. Afin de les visualiser je réalise l'histogramme suivant (figure 31) illustrant le pourcentage de respect des consignes par critère selon le cursus.

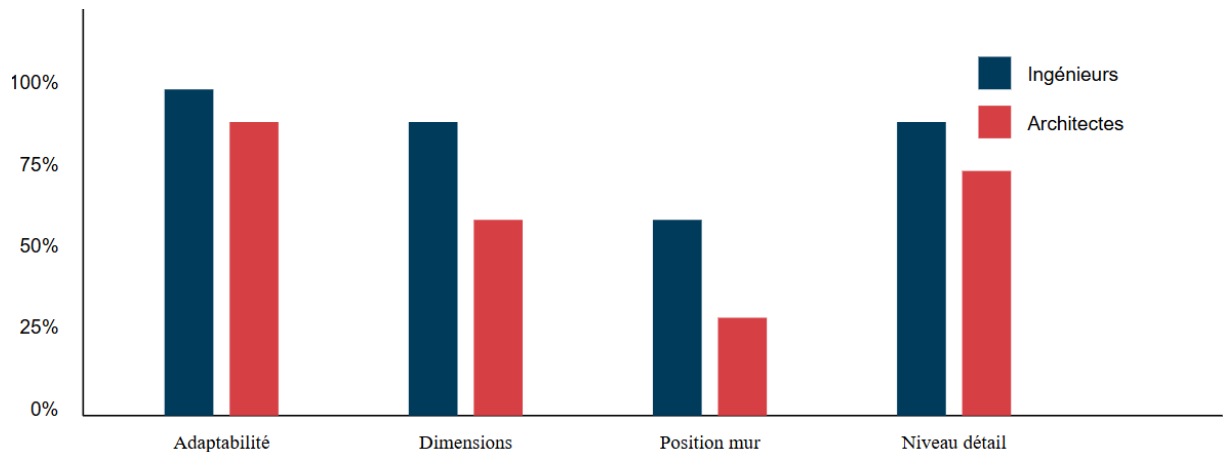


Figure 31: Pourcentage de respect des consignes par critère

De façon globale, l'histogramme montre que les ingénieurs atteignent des taux de conformité plus élevés sur la majorité des critères.

Pour l'adaptabilité, 5 ingénieurs sur 5 respectent ce critère contre 4 architectes sur 5. Concernant les dimensions du cadre, 4 ingénieurs sur 5 respectent la consigne contre 3 architectes sur 5.

La position par rapport au mur constitue le critère le moins respecté, avec 3 ingénieurs sur 5 et seulement 1 architecte sur 5 qui l'intègrent dans leur modélisation.

Le niveau de détail présente des résultats plus homogènes, les ingénieurs obtenant une moyenne de 2,8 éléments sur 3 contre 2,2 sur 3 pour les architectes.

Cette distribution suggère une approche plus méthodique chez les ingénieurs dans l'application des consignes techniques, tandis que les architectes semblent adopter une approche plus sélective des critères à respecter.

4.2.2 Structuration et paramétrage



Figure 32: Diagrammes radar pour chaque étudiant selon les trois critères de structuration

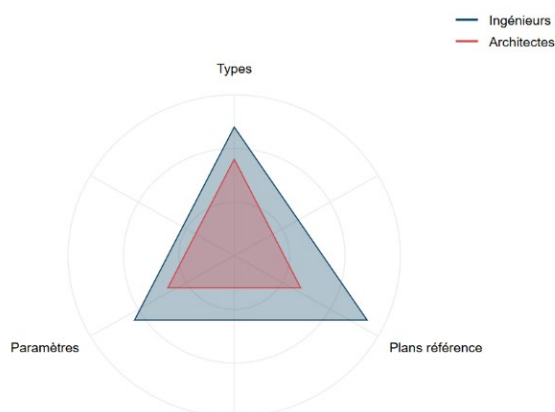


Figure 33: Niveau de structuration par cursus selon les trois critères de structuration

Le diagramme en radar de la structuration permet d'observer pour chaque étudiant selon les trois critères la répartition de leur structuration de la famille. Ainsi en réalisant un diagramme en radar pour tous les étudiants on observe des tendances différentes, comme illustré figure 32.

L'analyse de la structuration est affinée en observant les profils individuels des étudiants. Ces diagrammes radar permettent de visualiser la répartition des points sur les trois critères pour chaque participant. Cette approche révèle des nuances que les moyennes par groupe masquent. En effet, certains étudiants présentent des profils atypiques par rapport à leur groupe d'appartenance. Par exemple, les architectes 1 et 4 montrent une maîtrise d'un critère mais sans aucune autre méthode de structuration tandis que les ingénieurs 1 et 2 présentent un profil plus homogène sur les trois critères. Ces variations individuelles enrichissent la compréhension des tendances observées à l'échelle des groupes.

Bien que l'analyse individuelle soit instructive, la comparaison des moyennes entre ingénieurs et architectes permet de dégager des tendances générales dans leurs

approches respectives de la structuration. Le diagramme radar ci-contre (figure 33) superpose les profils moyens des deux cursus, mettant en évidence leurs points de convergence et de divergence sur chacun des trois critères étudiés. Cette synthèse visuelle facilite l'identification des caractéristiques distinctives de chaque formation dans leur approche de la modélisation paramétrique.

Dès lors, nous pouvons observer que les ingénieurs démontrent une utilisation plus systématique des plans de référence, avec en moyenne 1,6 points sur 2 contre 0,8 sur 2 pour les architectes. La création de types présente une répartition plus équilibrée, les ingénieurs obtenant une moyenne de 1,4 sur 2 et les architectes 1 sur 2.

La gestion des paramètres et des types montre une uniformité entre les deux groupes, avec une moyenne de 1 point sur 2 pour les ingénieurs et 0,8 sur 2 pour les architectes, indiquant une maîtrise similaire des paramètres de base. Cette faible différence suggère que les deux groupes appliquent une approche comparable dans la paramétrisation et l'organisation de leurs modèles.

Les approches diffèrent donc principalement dans l'utilisation des plans de référence : les ingénieurs les utilisent comme base structurelle de leur modélisation, tandis que les architectes les emploient de manière plus ponctuelle, témoignant d'une différence méthodologique dans l'organisation des relations entre les éléments.

4.2.3 Flexibilité et adaptabilité

De manière analogue à la partie précédente, nous pouvons comparer les critères d'adaptabilité à l'aide des graphiques radars pour chaque étudiant afin d'affiner l'analyse.

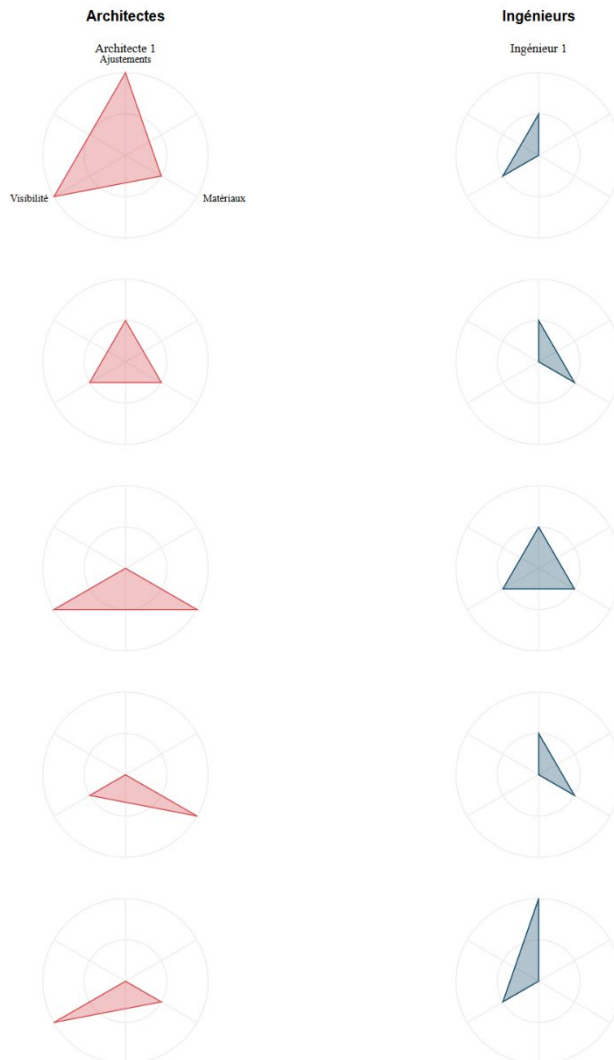


Figure 34: Diagrammes radar pour chaque étudiant selon les trois critères d'adaptabilité

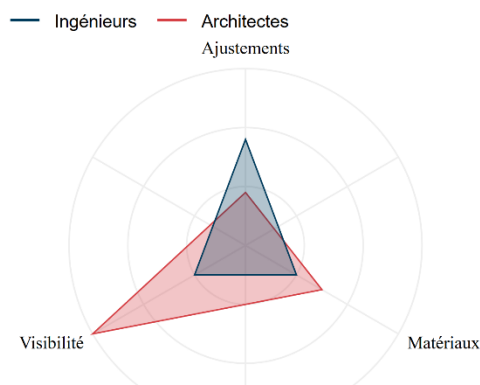


Figure 35: Niveau de structuration par cursus selon les trois critères d'adaptabilité

Cette représentation (figure 34) met en évidence la distribution des compétences sur les trois critères d'adaptabilité pour chaque participant.

Nous pouvons remarquer que 3 architectes sur 5 n'ont aucun critère d'ajustements quand tous les ingénieurs l'ont plutôt développé. Inversement, 3 ingénieurs sur 5 semblent délaisser le critère de visibilité.

Les ingénieurs présentent une distribution, avec une concentration sur l'ajustement des dimensions et une performance plus modérée sur les autres critères. L'Ingénieur 5 se distingue par des scores élevés en ajustement.

De manière analogue au deuxième axe, la comparaison des moyennes entre ingénieurs et architectes permet de dégager des tendances générales dans leurs approches respectives de l'adaptabilité.

La comparaison des moyennes entre les deux groupes révèle des tendances distinctes (figure 35). Les architectes obtiennent en moyenne

0,6 points sur 2 pour les ajustements dimensionnels, contre 1,2 pour les ingénieurs. En revanche, ils surpassent les ingénieurs dans l'attribution des matériaux avec une moyenne de 1,4 sur 2, comparée à 0,6 pour les ingénieurs. La gestion de la visibilité présente un écart similaire : 1,6 sur 2 pour les architectes contre 0,6 pour les ingénieurs.

Ces résultats suggèrent une approche différenciée de l'adaptabilité : cette distribution indique que les architectes privilégient la flexibilité visuelle et matérielle, tandis que les ingénieurs se concentrent sur la stabilité structurelle du modèle.

De plus, pour évaluer la flexibilité du modèle il convient d'étudier aussi la robustesse lors de l'insertion de la famille dans la maquette globale.

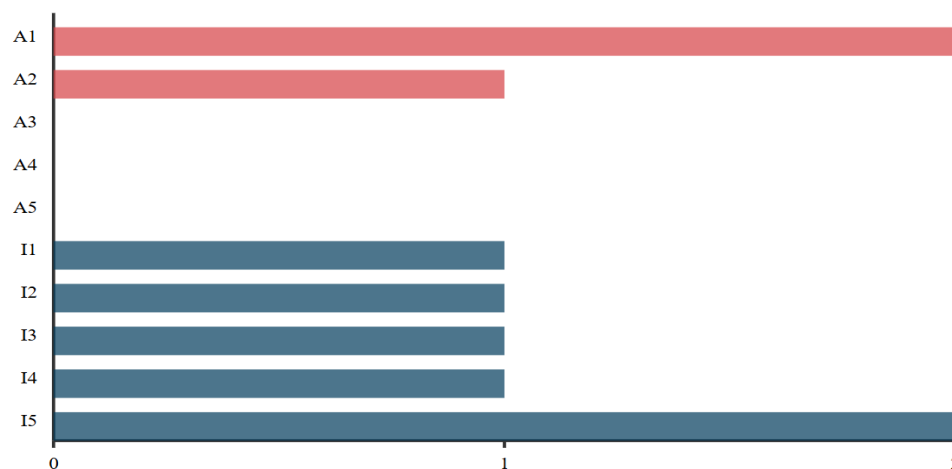


Figure 36: Robustesse par étudiant

L'analyse de la robustesse des modèles, représentée dans le graphique à barres, ci-dessus (figure 36), révèle également des différences entre les deux groupes. Les ingénieurs maintiennent un niveau constant de robustesse avec une moyenne de 1.2/2, quatre d'entre eux obtenant un score de 1 et l'Ingénieur 5 atteignant le score maximal. Les architectes présentent une distribution plus contrastée : l'Architecte 1 obtient le score maximal de 2, l'Architecte 2 atteint 1, tandis que les trois autres voient leurs modèles perturbés de manière significative avec des scores nuls.

La combinaison des critères d'adaptabilité et de robustesse permet d'évaluer la flexibilité globale des modèles. **Bien que les architectes excellent dans la gestion des matériaux et de la visibilité, leurs scores plus faibles en robustesse et en ajustements dimensionnels limitent la flexibilité d'ensemble de leurs modèles. À l'inverse, la constance des ingénieurs en robustesse et leur maîtrise des ajustements compensent leurs performances plus modestes sur les aspects visuels, aboutissant à des niveaux de flexibilité comparables entre les deux groupes.**

4.3 Bilan analyse des résultats

L'analyse comparative des trois axes d'observation met en évidence des différences entre les pratiques de modélisation des ingénieurs et des architectes. Ces divergences se manifestent à travers les différents critères étudiés.

En effet, **les ingénieurs démontrent une plus grande rigueur dans le respect des consignes et la structuration technique des familles**, comme en témoigne leur score moyen de conformité plus élevé et leur utilisation systématique des plans de référence. **Les architectes, quant à eux, privilégient l'adaptabilité visuelle et la gestion des matériaux, obtenant des scores supérieurs dans ces domaines spécifiques. Cette distribution des compétences suggère une influence du parcours sur les approches de modélisation.**

Néanmoins, **ces résultats doivent être nuancés par la présence de variations individuelles au sein de chaque groupe.** La formation autodidacte et l'expérience professionnelle pourraient moduler l'impact de la formation académique, comme l'illustrent les cas particuliers d'étudiants présentant des profils atypiques par rapport à leur groupe d'appartenance. Par exemple, certains architectes démontrent une maîtrise technique comparable à celle des ingénieurs, tandis que certains ingénieurs développent une sensibilité aux aspects visuels généralement associée aux architectes.

Ces observations soulèvent des questions sur la nature et la portée de l'influence de la formation initiale dans les pratiques de modélisation BIM. Il convient désormais d'examiner dans quelle mesure ces résultats permettent de valider notre hypothèse initiale et quelles implications en découlent pour l'amélioration des formations et des pratiques professionnelles.

5. Validation de l'hypothèse principale

L'analyse des résultats permet désormais de confronter l'hypothèse initiale aux observations effectuées dans la partie précédente. Cette démarche vise à déterminer dans quelle mesure la formation initiale influence effectivement l'approche de modélisation dans Revit.

5.1 Rappel de l'hypothèse et des configurations attendues

L'analyse des différences de modélisation entre ingénieurs et architectes s'appuie sur une hypothèse centrale : **la formation initiale influence significativement leur approche de modélisation dans Revit.** Cette hypothèse repose sur l'observation préalable de divergences dans les cursus académiques et suggère que les compétences acquises durant la formation se manifestent dans la pratique de la modélisation paramétrique.

La démonstration de cette hypothèse nécessite d'examiner trois aspects fondamentaux de la modélisation. **En premier lieu, la rigueur méthodologique témoigne de leur capacité à suivre un protocole établi. En second lieu la compréhension des processus BIM reflète la manière dont chaque groupe appréhende la logique de construction d'une famille paramétrique. Enfin, l'approche de la conception paramétrique révèle comment les étudiants structurent et organisent leurs modèles. Enfin,**

Pour valider cette hypothèse, trois critères d'évaluation ont été définis. D'abord, l'homogénéité des comportements au sein de chaque groupe permettrait de confirmer l'influence de la formation sur les pratiques de modélisation. Ensuite, l'existence de différences méthodologiques entre les groupes soutiendrait l'idée d'une approche distincte liée au parcours académique. Enfin, la corrélation entre le niveau de formation et la performance dans certains aspects de la modélisation renforcerait le lien entre formation et pratique.

Ces critères s'inscrivent dans un cadre d'analyse prenant en compte trois configurations de résultats possibles. **La première configuration anticipe des comportements distincts entre ingénieurs et architectes, reflétant directement l'influence de leur formation. La deuxième envisage l'absence de différences significatives, ce qui remettrait en question l'hypothèse initiale. La troisième considère une variabilité importante au sein des groupes, suggérant que d'autres facteurs pourraient avoir plus d'impact que la formation initiale.**

5.2 Confrontation avec les résultats observés

Les résultats de l'expérimentation révèlent une validation partielle de l'hypothèse initiale, avec des différences entre ingénieurs et architectes dans plusieurs axes de la modélisation.

En matière de conformité aux consignes, les données démontrent une approche différenciée entre les deux groupes. Les ingénieurs obtiennent des scores de conformité systématiquement plus élevés, avec trois étudiants atteignant un niveau élevé (6-7 points) et deux un niveau partiel (4-5 points). En revanche, aucun architecte n'atteint le niveau élevé, leur répartition se limitant aux niveaux partiel (trois étudiants) et minimal (deux étudiants). **Cette distribution témoigne d'une rigueur méthodologique plus prononcée chez les ingénieurs dans l'application des directives.**

L'analyse de la structuration des familles met en évidence des divergences méthodologiques significatives. Les ingénieurs démontrent une utilisation plus systématique des plans de référence, avec une moyenne de 1,6 points sur 2, contre 0,8 pour les architectes. Cette différence reflète une approche plus technique et organisée de la modélisation, probablement héritée de leur formation. Néanmoins, **les deux groupes présentent des résultats similaires dans la gestion des paramètres (moyenne de 1 pour les ingénieurs, 0,8 pour les architectes), suggérant une base commune dans la compréhension des outils paramétriques.**

Concernant la flexibilité des modèles, les résultats révèlent des priorités distinctes. Les architectes accordent une grande importance à la gestion de la visibilité (moyenne de 1,6/2) et l'attribution des matériaux (1,4/2), tandis que les ingénieurs se distinguent dans les ajustements dimensionnels (1,2/2) et la robustesse des modèles (1,2/2 en moyenne). **Cette complémentarité suggère que chaque groupe privilégie les aspects de la modélisation les plus pertinents selon leur formation.**

Toutefois, l'étude révèle également une variabilité significative au sein de chaque groupe, particulièrement visible dans les profils de formation. **L'apprentissage autodidacte, présent chez 40% des étudiants dans chaque groupe, et l'expérience professionnelle variable introduisent des facteurs de différenciation indépendants de la formation initiale.**

Ces observations nuancent l'hypothèse initiale en montrant que, si la formation influence effectivement les pratiques de modélisation, elle n'est pas le seul facteur déterminant. La complexité des résultats invite à considérer un modèle plus nuancé, où la formation académique constitue un cadre de référence que les expériences individuelles viennent enrichir ou modifier

5.3 Limites et perspectives

Bien que l'étude ait permis de mettre en évidence des différences entre ingénieurs et architectes, certaines limites doivent être prises en compte pour interpréter les résultats. Ces limites ouvrent également la voie à des pistes d'approfondissement pour enrichir la compréhension des pratiques de modélisation dans un contexte BIM.

5.3.1 Limites méthodologiques

Tout d'abord, nous pouvons identifier les principales limitations méthodologiques rencontrées dans cette étude. Ces limites, inhérentes à la conception et au déroulement de l'expérimentation, doivent être prises en compte pour interpréter les résultats et orienter les recherches futures.

a) Taille de l'échantillon

Premièrement, l'échantillon se compose de dix participants, répartis entre cinq ingénieurs et cinq architectes. Bien que ce choix permette une analyse comparative initiale des deux groupes, il reste limité en termes de diversité des profils. Un échantillon plus large, intégrant des participants issus de différentes institutions ou niveaux d'expérience, permettrait d'explorer une plus grande variété de comportements et de méthodologies. Cependant, en raison des contraintes temporelles et spatiales je n'ai pu que recenser les étudiants qui étaient à ma portée dans les deux écoles distinctes.

b) Contexte académique

Deuxièmement, les participants à cette étude sont des étudiants, encore en formation dans des écoles d'ingénierie et d'architecture. Ce choix méthodologique s'inscrit dans l'objectif principal de l'étude : examiner l'influence de la formation sur les pratiques de modélisation dans un cadre académique, avant que ces pratiques ne soient façonnées par des expériences professionnelles variées. Cependant, cette orientation présente également une limite. Les choix méthodologiques des étudiants, bien qu'illustrant l'impact potentiel de leur formation, peuvent être influencés par le cadre pédagogique, qui diffère des contraintes rencontrées dans un contexte professionnel. Par exemple, la gestion des délais, la coordination interdisciplinaire ou la pression des parties prenantes externes, absentes de cette expérimentation, pourraient influencer différemment leurs pratiques de modélisation dans un projet réel. Ainsi, bien que ce contexte académique soit central pour répondre à l'hypothèse de recherche, les résultats doivent être interprétés en gardant à l'esprit les différences entre le cadre éducatif et les réalités professionnelles.

c) Complexité limitée de l'exercice

Troisièmement l'exercice de modélisation d'une famille paramétrée de fenêtre a été conçu pour rester accessible et comparatif, en respectant les contraintes de temps et de compétences variées des participants. Cette simplicité a permis de focaliser l'analyse sur des critères clés comme le respect des consignes, la structuration, et la flexibilité, tout en minimisant les biais liés à des erreurs techniques majeures. Cependant, cette approche simplifiée ne reflète pas les défis rencontrés dans des projets BIM complexes. Ces derniers exigent souvent une coordination interdisciplinaire approfondie, une gestion fine des contraintes techniques, et des paramétrages avancés. Étudier des modèles plus complexes dans des exercices futurs pourrait révéler d'autres différences significatives entre ingénieurs et architectes.

Finalement, ces limites, bien qu'importantes, n'altèrent pas la pertinence des observations faites dans le cadre de cette recherche. Elles mettent en lumière des pistes d'amélioration pour des études ultérieures visant à approfondir les différences de pratiques de modélisation dans des contextes plus représentatifs des réalités professionnelles

5.3.2 Pistes d'amélioration

Les limites identifiées dans cette étude ouvrent des perspectives pour approfondir l'analyse des pratiques de modélisation entre ingénieurs et architectes. Afin de consolider et de généraliser les résultats obtenus, plusieurs axes de recherche méritent d'être explorés.

a) Élargissement à d'autres types de familles paramétrées

Tout d'abord, cette étude s'est concentrée sur la modélisation d'une fenêtre paramétrée, choisie pour sa simplicité et sa pertinence dans les projets BIM. Cependant, pour obtenir une vision plus complète des différences méthodologiques entre ingénieurs et architectes, il serait intéressant d'étendre l'analyse à d'autres types de familles paramétrées. En effet d'autres éléments plus complexes pourraient révéler des divergences plus marquées, notamment en termes de priorités méthodologiques et de gestion des paramètres.

b) Étude en contexte professionnel

Ensuite, il serait intéressant de comprendre comment ces différences se traduisent dans des situations réelles, une étude menée auprès de professionnels serait une suite logique. Ces derniers sont soumis à des contraintes de collaboration interdisciplinaire, de respect des délais et des budgets, qui influencent nécessairement leurs pratiques de modélisation. Ainsi, cette extension permettrait d'analyser si les tendances observées dans un cadre

académique se maintiennent, s'atténuent ou se transforment sous l'effet des exigences du milieu professionnel. De plus, elle pourrait intégrer des équipes de projet mixtes, composées d'ingénieurs et d'architectes, pour évaluer les dynamiques collaboratives et les solutions mises en œuvre pour surmonter les divergences.

c) Analyse des pratiques collaboratives

Enfin, une autre piste d'approfondissement réside dans l'étude des pratiques collaboratives entre ingénieurs et architectes lors de la modélisation BIM. L'interaction entre ces deux groupes, souvent médiée par des outils comme Revit, soulève des questions sur la coordination des modèles, la gestion des conflits, et l'alignement des méthodologies.

Un projet collaboratif simulé ou réel pourrait être conçu pour étudier la répartition des responsabilités dans la création et la gestion des maquettes. Quels sont les points de friction dans la coordination des modèles (catégorisation, paramétrage, etc.), et aussi quelles sont les solutions adoptées pour résoudre ces conflits (protocoles, standards de modélisation, échanges d'information) ?

Une telle approche permettrait non seulement d'identifier les difficultés rencontrées, mais aussi de proposer des recommandations pour améliorer les pratiques collaboratives et renforcer l'efficacité des projets BIM.

In fine, en élargissant l'analyse à de nouveaux objets, contextes et dynamiques collaboratives, ces pistes d'amélioration mettent en lumière la richesse des opportunités de recherche dans le domaine de la modélisation BIM. Elles permettent de dépasser les limites de cette étude exploratoire, tout en ouvrant des perspectives concrètes pour améliorer les pratiques professionnelles et pédagogiques. Ces réflexions trouvent leur aboutissement dans la conclusion de ce mémoire, où les enseignements principaux de l'étude seront synthétisés et les implications élargies pour le futur de la collaboration interdisciplinaire dans le BIM.

6 Conclusion

Cette étude s'est attachée à explorer les différences de modélisation entre ingénieurs et architectes dans le cadre de la création d'une famille paramétrée dans Revit. L'état de l'art a suivi un raisonnement progressif : partant des fondamentaux du BIM et de ses enjeux dans l'industrie de la construction [8] l'analyse s'est concentrée sur l'intégration de cet outil dans une industrie déjà établie [9]. Cette approche a révélé que malgré les promesses d'une meilleure collaboration, des obstacles persistent, particulièrement dans l'interopérabilité [14] et la communication entre équipes. L'étude des formations distinctes des ingénieurs et architectes [4] et de leur approche différente du BIM [25] a mis en évidence que ces outils numériques, loin de gommer les différences professionnelles, peuvent parfois les accentuer. Les travaux récents sur l'adoption du BIM dans les agences d'architecture [5] ont confirmé cette hypothèse, soulignant l'importance d'étudier comment ces différences de formation influencent concrètement les pratiques de modélisation.

À travers une méthodologie et trois axes d'analyse : la conformité à la consigne, la structuration et le paramétrage et la flexibilité, cette recherche a permis de dégager plusieurs enseignements.

D'abord, **les résultats confirment partiellement l'hypothèse initiale : la formation des participants joue un rôle dans leurs pratiques de modélisation. Les ingénieurs, formés à une approche méthodique et orientée vers la rigueur technique, ont montré une plus grande conformité aux consignes et une structuration plus systématique des modèles. À l'inverse, les architectes, davantage sensibilisés à la flexibilité, se sont distingués par leur capacité à concevoir des modèles adaptables dimensionnellement et visuellement.**

Cependant, **cette influence de la formation ne peut être isolée des autres facteurs**, notamment l'expérience personnelle et professionnelle des participants. L'étude a révélé que les étudiants ayant investi davantage dans leur apprentissage autodidacte ou ayant eu des expériences professionnelles significatives transcendaient parfois les tendances propres à leur groupe. **Cela souligne l'importance d'une approche combinant formation académique, apprentissage personnel et expérience pratique pour développer des compétences complètes en BIM.**

Enfin, **l'étude met en évidence la nécessité d'une approche intégrée pour améliorer la collaboration BIM.** Les différences de priorités et de méthodologies entre ingénieurs et architectes, bien qu'enrichissantes, peuvent devenir des sources de tension. Une meilleure

compréhension mutuelle des pratiques de modélisation et des besoins respectifs est donc essentielle pour optimiser les interactions interprofessionnelles.

Malgré ces constats, l'étude présente **plusieurs limites** qui encadrent ses conclusions. D'une part, **le faible nombre de participants a permis une analyse exploratoire, mais limite la généralisation des résultats**. D'autre part, l'étude reflète les pratiques **d'étudiants encore en formation, ce qui pourrait différer des comportements observés en contexte professionnel**. Enfin, **la modélisation d'une fenêtre paramétrée, bien que pertinente, reste simplifiée par rapport aux défis réels rencontrés dans des projets BIM complexes**. Ces limites ouvrent toutefois des perspectives enrichissantes pour les futures recherches. D'une part, un élargissement à d'autres types de familles paramétrées, comme des équipements techniques ou des structures complexes, permettrait d'explorer des méthodologies plus variées. D'autre part, une étude menée auprès de professionnels, dans un cadre interdisciplinaire et collaboratif, pourrait mieux refléter les réalités du terrain. Enfin, l'analyse des pratiques collaboratives en BIM reste un axe essentiel pour comprendre et surmonter les tensions qui peuvent émerger entre disciplines.

Finalement, en s'intéressant aux différences de modélisation entre ingénieurs et architectes, **ce mémoire a mis en lumière l'importance de comprendre les particularités disciplinaires pour améliorer la collaboration dans le cadre du BIM**. Les outils numériques comme Revit, bien qu'ils offrent un langage commun aux différents acteurs, ne suffisent pas à surmonter les divergences méthodologiques et les priorités propres à chaque discipline. Par ailleurs, **cette étude reste influencée par ma propre expérience. Mon double parcours, d'abord en ingénierie puis en architecture, m'a donné une perspective unique pour analyser ces différences**. Cependant, il a également introduit un biais potentiel dans ma compréhension des enjeux. Ayant été formée à la rigueur et à l'efficacité technique avant d'intégrer une discipline valorisant davantage la créativité et la flexibilité, je perçois ces divergences à travers un prisme particulier, façonné par cette double appartenance. **Malgré ce biais, les résultats de cette recherche appellent à une évolution des formations pour intégrer davantage d'interdisciplinarité et sensibiliser les futurs professionnels aux besoins des autres disciplines. Une meilleure compréhension mutuelle des pratiques de modélisation, combinée à des processus collaboratifs renforcés, pourrait significativement améliorer la coordination dans les projets BIM.**

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Centralisation de l'information afin de fluidifier la collaboration entre les différents acteurs. | 9 |
| Figure 2: Tableau de Bouygues Construction illustrant les logiciels et formats d'échanges utilisés..... | 10 |
| Figure 3: Hiérarchisation des composants dans Revit..... | 12 |
| Figure 4: Illustration des plans de référence | 14 |
| Figure 5: Chronologie des phases d'un projet | 16 |
| Figure 6: Cycle de vie du bâtiment [18]..... | 17 |
| Figure 7: Intégration du Bim selon les phases du projet | 17 |
| Figure 8: Les objectifs du BIM selon les phases du projet | 17 |
| Figure 9: Organigramme des acteurs de l'industrie de la construction | 20 |
| Figure 10: Cycle de vie du bâtiment avec les acteurs | 20 |
| Figure 11: Fiche consigne de la fenêtre paramétré | 43 |
| Figure 12: Attribution sous-catégorie | 47 |
| Figure 13: Attaches aux plans de référence | 47 |
| Figure 14: Différence paramètre par type ou par occurrence | 47 |
| Figure 16: Vue en plan du paramètre « largeur » | 48 |
| Figure 16: Fenêtre « gestion des types de la famille »..... | 48 |
| Figure 17: Explications sous-critères 1er axe | 50 |
| Figure 18: Explications sous critère 2ème axe..... | 51 |
| Figure 19: Explication sous-critères 3ème axe | 52 |
| Figure 20: Profil des étudiants par niveau d'étude | 57 |
| Figure 21: Les modes d'apprentissage Revit | 57 |
| Figure 22: Résultats respect des consignes..... | 59 |
| Figure 23: Distribution score de conformité | 59 |
| Figure 24: Résultats niveau de structuration..... | 60 |
| Figure 25: Distribution score de structuration..... | 60 |
| Figure 26: Résultats niveau de flexibilité..... | 61 |
| Figure 27: Distribution des scores de flexibilité | 61 |
| Figure 28 : Distribution scores de conformité | 62 |
| Figure 29: Distribution scores de structuration | 63 |
| Figure 30: Distribution scores de flexibilité | 63 |

| | |
|---|----|
| Figure 31: Pourcentage de respect des consignes par critère..... | 65 |
| Figure 32: Diagrammes radar pour chaque étudiant selon les trois critères de structuration | 66 |
| Figure 33: Niveau de structuration par cursus selon les trois critères de structuration | 66 |
| Figure 34: Diagrammes radar pour chaque étudiant selon les trois critères d'adaptabilité . | 68 |
| Figure 35: Niveau de structuration par cursus selon les trois critères d'adaptabilité | 68 |
| Figure 36: Robustesse par étudiant..... | 69 |

Références

- [1] C. Boton et D. Forgues, « Comprendre l'impact du numérique sur la gestion de projet en construction », *Lien Soc. Polit.*, n° 81, p. 41-60, févr. 2019, doi: 10.7202/1056303ar.
- [2] Z.-Z. Hu, X.-Y. Zhang, H.-W. Wang, et M. Kassem, « Improving interoperability between architectural and structural design and among structural analysis models: an industry foundation classes-based approach and web-based tools », 2015.
- [3] V. Bleyenheuft, J. Blachère, et C. Onraet, *Les familles de Revit pour le BIM*. Paris: Eyrolles, 2017.
- [4] N. Blache, « Les relations ingénieurs architectes, entente cordiale ou rivalités ? État de l'art sur les relations ingénieurs architectes depuis le XVIIIe siècle et mise en perspective des enjeux de réconciliation actuels », p. 71, 2016.
- [5] E. Hochscheid et G. Halin, « Baromètre BIM : une enquête sur l'adoption du BIM dans les agences d'architecture en France », *SHS Web Conf.*, vol. 82, p. 02004, 2020, doi: 10.1051/shsconf/20208202004.
- [6] « CARPO - The Digital Turn in Architecture - 1992-2012 ».
- [7] « CARPO The Second Digital Turn Design Beyond Intelligence_Chap 4 ».
- [8] C. M. Eastman, *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. John Wiley & Sons, 2011.
- [9] M. Arashpour et M. Arashpour, « Analysis of Workflow Variability and Its Impacts on Productivity and Performance in Construction of Multistory Buildings », *J. Manag. Eng.*, vol. 31, n° 6, p. 04015006, nov. 2015, doi: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000363.
- [10] National Institute of Building Sciences, « Terms and Definitions | ». Consulté le: 3 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.nibs.org/nbims/v4/bud/3>
- [11] buildingSMART France, « Notions clés à connaître sur le BIM | France, association des acteurs du BIM en France. » Consulté le: 23 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://buildingsmartfrance-mediaconstruct.fr/definition-notions-bim/>
- [12] A. G. Garrigos, C. A. Brebbia, L. Mahdjoubi, et R. Laing, *Building Information Systems in the Construction Industry*. WIT Press, 2018.
- [13] buildingSMART France, « Mémos pratiques pour mieux cerner et travailler en BIM | association des acteurs du BIM en France. », buildingSMART France, association des acteurs du BIM en France. | buildingSMART France agit concrètement en faveur de l'interopérabilité du BIM, notamment via le format IFC. Consulté le: 23 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://buildingsmartfrance-mediaconstruct.fr/memos-pratiques-bim/>
- [14] A. Grilo et R. Jardim-Goncalves, « Value proposition on interoperability of BIM and collaborative working environments », *Autom. Constr.*, vol. 19, n° 5, p. 522-530, août 2010, doi: 10.1016/j.autcon.2009.11.003.
- [15] K. Idrissi Gartoumi, S. Zaki, et M. Aboussaleh, « Building information modelling (BIM) interoperability for architecture and engineering (AE) of the structural project: A case study », *Mater. Today Proc.*, p. S2214785323030444, mai 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.05.408.
- [16] G. Sibenik, « Data exchange between architectural design and structural analysis models », 2022. doi: 10.34726/hss.2022.105592.
- [17] « BIM-tendances-metiers-dans-batiment ».
- [18] C. VALENTE, « Le BIM (maquette numérique) et la préparation de chantier », *Méthodes BTP*. Consulté le: 7 novembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://methodesbtp.com/articles/bim-preparation-chantier-batiment/>
- [19] « Est-ce que le BIM sera obligatoire en France ? » Consulté le: 23 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ffbatiment.fr/techniques-batiment/bim-transformation-numerique/accompagnement-mise-en-pratique-bim/dossier/le-bim-obligatoire-en-france>

- [20] « plan_bim_2022 ».
- [21] « Rapport OPIIEC ».
- [22] E. A. Poirier, F. Alami, et S. Frenette, « Une étude sur l'hybridation des pratiques au sein d'une agence d'architecture : Le cas de la coordination multidisciplinaire et l'hybridation des pratiques », 2023, doi: 10.48568/FXEM-G205.
- [23] « Evolution de l'exercice du métier d'Architecte dans un environnement contraint », Archibat. Consulté le: 23 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://archibat.info/evolution-de-lexercice-du-metier-darchitecte-dans-un-environnement-contraint/>
- [24] « L'essentiel des chiffres de la profession | Ordre des architectes ». Consulté le: 23 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.architectes.org/lessentiel-des-chiffres-de-la-profession-93232>
- [25] C. Botton, D. Forgues, et G. Halin, « Les enjeux liés à l'intégration de l'approche BIM de modélisation des données du bâtiment à l'enseignement universitaire : cas d'une école d'ingénierie », *Rev. Int. Technol. En Pédagogie Univ.*, vol. 14, n° 2, p. 5, 2017, doi: 10.18162/ritpu-2017-v14n2-01.
- [26] Ž. Turk, « Should BIM change the language of engineering education? », in *Creative Construction Conference 2018 - Proceedings*, Budapest University of Technology and Economics, 2018, p. 1067-1074. doi: 10.3311/CCC2018-138.
- [27] C. Faillières, « L'enseignement du BIM dans les écoles d'architecture françaises ».
- [28] Champy, *Sociologie de l'architecture*. 2001.

En définitive, ce mémoire souligne que reconnaître et comprendre les différences disciplinaires est une étape clé pour une intégration harmonieuse des acteurs du BIM. En combinant une approche méthodologique, une adaptation des formations et une évolution des pratiques professionnelles, il est possible de surmonter les tensions entre ingénieurs et architectes, pour tirer pleinement parti des avantages offerts par les technologies BIM.

