



HAL
open science

Amélioration de l'interopérabilité BIM via un cadre de co-modélisation par requêtes et enrichissements itératifs de données

Léa Sattler

► **To cite this version:**

Léa Sattler. Amélioration de l'interopérabilité BIM via un cadre de co-modélisation par requêtes et enrichissements itératifs de données. Autre. HESAM Université préparée à: École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2021. Français. NNT: . tel-03507658v1

HAL Id: tel-03507658

<https://theses.hal.science/tel-03507658v1>

Submitted on 5 Jan 2022 (v1), last revised 28 Mar 2022 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR
[LAMIH UMR CNRS 8201 – Campus de Paris]

THÈSE

présentée par : **Léa SATTLER**

soutenue le : **7 juillet 2021**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée à : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

Spécialité : **Génie industriel**

Amélioration de l'interopérabilité BIM
via un cadre de co-modélisation
par requêtes et enrichissements itératifs de données

THÈSE dirigée par :

[Professeur LAMOURI Samir]

et co-encadrée par :

[Professeur PELLERIN Robert]

[Professeur DENEUX Dominique]

Jury

Mme Hind BRIL-EL HAOUZI, Professeure, UL

Mme Zohra CHERFI-BOULANGER, Professeure, UTC

M. Dominique DENEUX, Professeur, UPHF

M. Christian GIRARD, Professeur, ENSA Paris-Malaquais

M. Samir LAMOURI, Professeur, Arts et Métiers

M. Thomas MAIGNE, Directeur Générale, M4D

M. Robert PELLERIN, Professeur, Polytechnique Montréal

Mme Olivia PENAS, IGR, Supmeca ISAE

Rapporteure

Examinatrice

Examineur

Examineur

Examineur

Invité

Examineur

Rapporteure

**T
H
È
S
E**

À ma fille, à mes proches.

Remerciements

Je tiens à remercier dans un premier temps le jury scientifique, qui me fait l'honneur d'examiner ces travaux de recherche : Mme Hind BRIL-EL HAOUZI, Mme Zohra CHERFI-BOULANGER, M. Christian GIRARD, Mme Olivia PENAS.

Je remercie ensuite mon directeur de thèse, Samir Lamouri, pour sa présence, son humanité, sa gentillesse, sa patience ; pour la qualité de nos échanges, la justesse de ses réflexions, la pertinence de ses conseils, sa culture sans bornes ; pour la manière dont il a su m'aider, m'écouter, me diriger au long de ce doctorat, tout en me laissant une grande liberté. Je remercie aussi mes deux autres encadrants, Dominique Deneux et Robert Pellerin pour leurs lectures attentives, leurs précieux conseils méthodologiques, leur grande pédagogie et leur réactivité.

Je remercie également la start-up M4D-Treegram, le partenaire industriel de cette thèse – en particulier Thomas Maigne, son directeur, qui m'a fait confiance pour mener ce doctorat, ainsi que toute l'équipe et notamment : les développeurs, Mohammed Larabi et Cyril Bore, et les automatisateurs, dits « BAM », Victor Gautier, Fabien Dobigny et Florent Reynier, qui ont largement contribué aux travaux évoqués dans cette thèse.

Merci aussi à toutes les personnes qui m'ont aidée dans mes recherches et réflexions : Aurélie de Boissieu, qui m'a poussée à publier un premier article, Thomas Paviot et Virginie Fortineau pour leur écoute et leurs conseils, Emilien Cristia pour nos discussions, et Charlotte Bertrand pour sa confiance. Un merci tout particulier à Jean-Patrick Degrave, un des premiers à avoir lu mes ébauches de réflexions un peu lunaires sur les data et le pouvoir – et qui m'a recueillie dans son agence d'architecture pendant la période de rédaction de cette thèse.

Et merci bien sûr à mes proches, qui m'ont tant soutenue, pêle-mêle – Estefania Tobon Valencia et Juan Pablo Usuga Cadavid, mes merveilleux collègues de laboratoire ; Guillaume, le primatologue qui m'a accompagnée sur un bout du chemin ; Camille & Camille, les deux docteurs en histoire de l'art et de l'architecture ; Rubin et ses relectures ; les Nuggets (qui se reconnaîtront), le Café du Centre et la P.'s Connexion ; et puis tous mes amis, absolument tous, qui ont dû, à un moment ou un autre, quelque part entre 2018 et 2021, écouter mes angoisses abyssales de doctorante (notamment, n'étant qu'architecte, au sujet de mon absence cruciale de

diplôme d'ingénieur – et le complexe de l'imposteur qui en a découlé quant à la troublante discipline de cette thèse, le *génie industriel*). Et merci enfin à ma famille, d'avoir été là, tout simplement : mes parents, ma sœur et mes deux frères – sans oublier Thomas et bien sûr notre fille Nina, qui rentrait au CP quand je me suis retrouvée sur les bancs de l'école doctorale.

Merci aussi à tous les gens qui ont patiemment regardé mes stories Instagram sur les doctes-rats, les escaliers rédactionnels, les diagrammes d'ingénieurs des années 90, et à mes voisins qui ont supporté la musique chez moi jusqu'à 4h du matin durant la phase de bouclage de cette thèse. Et merci aussi, d'une manière générale, à la caféine.

Résumé

Le manque d'interopérabilité dans le BIM (*Building Information Modeling*) est reconnu par la communauté scientifique et par les acteurs de l'AEC (*Architecture, Engineering and Construction*), et impacte la collaboration digitale : sur le terrain, les échanges de données liées au BIM ne sont ni normés ni automatisés et conduisent à des ressaisies et pertes de données lors des itérations, entravant les flux de données et de travail. La présente thèse vise à investiguer cette double question, impliquant des considérations techniques (interopérabilité technologique : compatibilité entre modèles de données, formats) et organisationnelles (interopérabilité métier : modèles d'affaires, coopération humaine) au sein d'une industrie fragmentée et peu numérisée.

Un triple état de l'art – à travers des allers-retours entre une période récente (2013-2018), vintage (1990-2000), et brûlante (2019-2021) – révèle que ces deux pendants ne sont que trop rarement traités conjointement dans la littérature scientifique. Un levier à la fois technique et organisationnel est donc proposé afin d'améliorer l'interopérabilité BIM : un cadre collaboratif basé sur des cycles itératifs de requêtes et d'enrichissements collectifs de données. Ce cadre, qui vise à instaurer des processus de co-modélisation BIM multi-métier, est appuyé par un prototype logiciel, Treegram, permettant de fédérer et de transcrire des données BIM hétérogènes dans une base de données neutre, que les utilisateurs peuvent interroger et enrichir.

Les requêtes constituant l'atome des échanges de données, la collaboration BIM s'organise autour de cycles de requêtes/vérifications/enrichissements de données. L'utilisation de Treegram sur un projet réel montre que le cadre proposé, s'il fonctionne d'un point de vue technique et améliore les flux de données, interroge les limites des modes traditionnels de production de projet dans l'AEC et soulève la question des modèles d'affaires susceptibles d'accueillir les logiques intégratives de l'ingénierie concourante et des technologies de l'industrie 4.0.

Abstract

The lack of interoperability in building information modeling (BIM) is acknowledged by the scientific community and by architecture, engineering and construction (AEC) actors and impacts digital collaboration. In the field, BIM data exchanges are neither standardized nor automated and lead to data re-entry and loss during iterations, hindering data flows and workflows. This thesis aims at investigating this double issue, involving technical (technological interoperability: compatibility between data models, formats) and organizational (business interoperability: business models, human cooperation) considerations in the context of a fragmented and low-digitalized industry.

A three-pronged state of the art – through comparisons between recent (2013-2018), vintage (1990-2000), and proximate (2019-2021) periods – reveals that these two realms are but seldom considered together in the scientific literature. A technical as well as organizational device is therefore proposed to improve BIM interoperability: a collaborative framework, based on iterative cycles of collective data queries and enrichment. This framework aims at establishing interprofessional BIM co-modeling processes and is supported by a software prototype, Treegram, allowing to federate and transcribe heterogeneous BIM data into a neutral database, which users can query and enrich.

As queries are the core of data exchange, BIM collaboration is organized around data query/verifications/enrichment cycles. The use of Treegram on an actual project shows that while the proposed framework works from a technical point of view and improves data flows, it nevertheless questions the limits of the traditional modes of project production in AEC and raises the question of the business models likely to accommodate the integrative rationales of concurrent engineering and industry 4.0 technologies.

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Remerciements | 5 |
| Résumé | 7 |
| Abstract | 8 |
| Table des matières | 9 |
| Liste des tableaux | 13 |
| Liste des figures & illustrations | 14 |
| Liste des sigles et des abréviations | 18 |
| Notes sur la langue et le formatage de cette thèse | 20 |
| Notes sur le partenariat industriel de cette thèse CIFRE | 21 |
| Introduction | 23 |
| Chapitre 1. La problématique de l'interopérabilité BIM | 27 |
| 1.1 Définition du BIM | 27 |
| 1.2 Spécificités de l'industrie du bâtiment | 32 |
| 1.2.1 Prototype permanent | 32 |
| 1.2.2 Forte fragmentation | 32 |
| 1.2.3 Faible technologisation | 33 |
| 1.2.4 Modèles économiques sinueux | 34 |
| 1.3 Bref historique du BIM | 35 |
| 1.3.1 Les années 1970/80 : prémisses | 35 |
| 1.3.2 Les années 1990 : explorations | 37 |
| 1.3.3 Les années 2000 : ébullition | 40 |
| 1.3.4 Les années 2010 : stagnation | 42 |
| 1.4 L'interopérabilité BIM | 46 |
| 1.4.1 Caractérisation de l'interopérabilité BIM | 46 |
| 1.4.2 Solutions existantes aux problèmes d'interopérabilité technologiques | 50 |
| 1.4.3 Solutions existantes aux problèmes d'interopérabilité métier | 51 |
| 1.5 Conclusion | 53 |

Chapitre 2. État de l’art sur l’interopérabilité et la collaboration BIM 55

| | | |
|-------|---|-----|
| 2.1 | État de l’art original, 2013-2018..... | 57 |
| 2.1.1 | Méthodologie, corpus, cadre d’analyse | 57 |
| 2.1.2 | Cadre d’analyse n°1 : Les différents contextes AEC..... | 61 |
| 2.1.3 | Cadre d’analyse n°2 : Les visées collaboratives de l’interopérabilité..... | 65 |
| 2.1.4 | Cadre d’analyse n°3 : Les méthodes de résolution des problèmes d’interopérabilité BIM | 72 |
| 2.1.5 | Discussion..... | 83 |
| 2.2 | État de l’art anachronique, 1989-1999..... | 88 |
| 2.2.1 | Méthodologie, corpus, cadre d’analyse | 89 |
| 2.2.2 | Comparaison aux industries digitalisées..... | 90 |
| 2.2.3 | Conjonction de l’organisationnel et du digital..... | 92 |
| 2.2.4 | Temporalités..... | 94 |
| 2.2.5 | Modèles de données | 95 |
| 2.2.6 | Processus dynamiques..... | 97 |
| 2.2.7 | Anticipations et prospectives..... | 98 |
| 2.2.8 | Discussion..... | 101 |
| 2.3 | État de l’art actualisé, 2019-2021 | 103 |
| 2.3.1 | Amélioration de la création et utilisation d’IFC | 103 |
| 2.3.2 | Amélioration de l’interopérabilité technologique au-delà de l’IFC..... | 104 |
| 2.3.3 | Amélioration de l’interopérabilité métier | 108 |
| 2.3.4 | Discussion..... | 109 |
| 2.4 | Conclusion..... | 110 |

Chapitre 3. Proposition d’un workflow de co-modélisation par requêtes et enrichissements de données 111

| | | |
|-------|---|-----|
| 3.1 | Requêtes collaboratives : une conjonction de plusieurs solutions existantes | 112 |
| 3.2 | Aperçu des situations d’interopérabilité BIM..... | 113 |
| 3.3 | Zoom sur les processus d’échanges BIM : la nécessité des requêtes | 116 |
| 3.3.1 | Un cadre de fédération | 116 |
| 3.3.2 | Atome collaboratif : requêtes et enrichissement de données | 118 |
| 3.3.3 | Exemple d’itération..... | 119 |
| 3.4 | Les requêtes en théorie : un paradigme du big data..... | 121 |
| 3.5 | Les requêtes en pratique dans le BIM..... | 124 |
| 3.5.1 | Les requêtes dans Revit..... | 125 |
| 3.5.2 | Les requêtes dans Navisworks | 126 |
| 3.5.3 | Les requêtes dans Solibri Office..... | 128 |

| | | |
|---|---|------------|
| 3.5.4 | Synthèse comparative..... | 128 |
| 3.6 | Caractérisation du cadre de collaboration par la requête..... | 129 |
| 3.6.1 | Fonctionnement..... | 129 |
| 3.6.2 | Prérequis..... | 132 |
| 3.7 | Conclusion..... | 133 |
| Chapitre 4. Prototype d'application : Treegram..... | | 135 |
| 4.1 | Fonctionnement général..... | 135 |
| 4.2 | Architecture de l'application..... | 136 |
| 4.3 | Constitution de la base de données neutre..... | 137 |
| 4.3.1 | La fonctionnalité de scan, ou l'import des données..... | 137 |
| 4.3.2 | Écriture des objets BIM dans Treegram..... | 138 |
| 4.4 | Création et organisation de requêtes..... | 140 |
| 4.4.1 | Les arbres : espace d'organisation des requêtes..... | 140 |
| 4.4.2 | Les nœuds : espace de création de requêtes..... | 141 |
| 4.4.3 | Arborescence dynamique de requêtes : vues métier..... | 145 |
| 4.5 | Vérification et enrichissement de données..... | 150 |
| 4.5.1 | Franchissement des itérations..... | 150 |
| 4.5.2 | Vérification des données..... | 151 |
| 4.5.3 | Enrichissement des données..... | 152 |
| 4.6 | Tests de Treegram..... | 157 |
| 4.6.1 | Test de robustesse..... | 158 |
| 4.6.2 | Test de création d'une vue métier..... | 159 |
| 4.6.3 | Test de requête et enrichissement d'une maquette multi-source..... | 161 |
| 4.7 | Conclusion..... | 166 |
| Chapitre 5. Cas d'usages de Treegram sur un projet réel..... | | 167 |
| 5.1 | Cas d'usage multi-métiers..... | 167 |
| 5.1.1 | Création d'une vue multi-métier..... | 167 |
| 5.1.2 | Création d'une vue multi-métier avec enrichissement de données..... | 168 |
| 5.1.3 | Co-renseignement de données de performance acoustiques..... | 171 |
| 5.2 | Cas d'usage mono-métiers..... | 172 |
| 5.2.1 | Comparaison automatisée de composants BIM dispersés dans divers fichiers..... | 172 |
| 5.2.2 | Codification automatisée de panneaux de murs-rideaux..... | 174 |
| 5.2.3 | Modélisation automatisée de contours de surface utile..... | 178 |
| 5.2.4 | Génération automatisée de calepinages de faux-plafonds..... | 180 |

| | | |
|-------|--|------------|
| 5.2.5 | Analyse et audit automatisés de maquettes BIM..... | 183 |
| 5.3 | Conclusion..... | 184 |
| 5.3.1 | Pistes d'améliorations du prototype Treegram..... | 184 |
| 5.3.2 | Workflows de co-modélisation BIM et ingénierie concourante..... | 185 |
| 5.3.3 | Comment la question de l'automation prend le relais sur celle de l'interopérabilité..... | 187 |
| | Conclusion..... | 189 |
| | Liste des publications..... | 193 |
| | Bibliographie..... | 194 |
| | Annexes | 215 |

Liste des tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau 1 Exclusions thématiques | 59 |
| Tableau 2 Exclusions méthodologiques | 59 |
| Tableau 3 Catégorisation suivant le contexte AEC..... | 61 |
| Tableau 4 Catégorisation suivant les buts collaboratifs de l'interopérabilité..... | 66 |
| Tableau 5 Catégorisation suivant les méthodologies de résolution | 72 |
| Tableau 6 Comparaison des fonctionnalités de requête dans Revit, Navisworks et Solibri .. | 129 |

Liste des figures & illustrations

| | |
|--|-----|
| Figure 1 Une allégorie de la collaboration BIM (R.Garber, 2009) | 30 |
| Figure 2 Le manque crucial de digitalisation et de productivité dans l'AEC (McKinsey, 2015)..... | 34 |
| Figure 3 Frise chronologique des logiciels PLM, CAD et BIM..... | 35 |
| Figure 4 Le remplacement du dessin par la computation (C.Eastman, 1975)..... | 36 |
| Figure 5 Captures d'écran du logiciel CATIA V2, 1983 | 37 |
| Figure 6 Peix, Frank Gehry, 1992, maquette CATIA | 38 |
| Figure 7 Embryological House, Greg Lynn, 1997 | 39 |
| Figure 8 Stade National de Pékin, Herzog et De Meuron, 2008 | 41 |
| Figure 9 Zaragoza Bridge Pavilion, Zaha Hadid, 2008..... | 42 |
| Figure 10 Une illustration du monopole de Revit | 43 |
| Figure 11 Greg Lynn & HoloLens, 2016 | 45 |
| Figure 12 Les différents niveaux d'interopérabilité | 48 |
| Figure 13 Collaboration hybride : cognitive et computationnelle..... | 49 |
| Figure 14 Le découpage en phase d'un projet de bâtiment | 56 |
| Figure 15 Constitution du corpus sur l'interopérabilité et la collaboration entre 2013 et 2018 | 58 |
| Figure 16 Augmentation des publications sur l'interopérabilité et la collaboration entre 2013 et 2018 | 60 |
| Figure 17 Les trois qualités contradictoires d'un modèle d'information BIM selon Hartman (2017)..... | 81 |
| Figure 18 Evolution des approches de résolution des problèmes d'interopérabilité et de collaboration BIM | 83 |
| Figure 19 Les niveaux de Maturité BIM, définis par le Bim Industry Working Group en 2011 | 84 |
| Figure 20 Parodie des niveaux de maturité de BIM, par le compte twitter BIM Level 8..... | 85 |
| Figure 21 Vue conceptuelle du CIC - Computer Integrated Construction (Yamakazi, 1992) | 91 |
| Figure 22 Architecture du système CIC (Yamazaki, 1992) | 94 |
| Figure 23 Prospective pour l'intégration digitale dans le bâtiment (Howard, 1989) | 99 |
| Figure 24 Vision holistique de la collaboration digitale dans le bâtiment (Brown et al, 1995) | 102 |

| | |
|--|-----|
| Figure 25 Les quatre situations d'interopérabilité BIM | 113 |
| Figure 26 Illustration des différents LOD avec l'exemple d'un mur | 115 |
| Figure 27 Requête et enrichissement de données, l'atome collaboratif | 118 |
| Figure 28 Captures d'écran des arborescences des logiciels Digital Project et Revit | 123 |
| Figure 29 Proto-requêtes dans Revit | 126 |
| Figure 30 Requêtes dans Naviswork | 127 |
| Figure 31 Freins d'interfaces aux requêtes dans Naviswork | 127 |
| Figure 32 Requêtes dans Solibri Office | 128 |
| Figure 33 Cadre collaboratif BIM traditionnel : fragmentation, ressaisies et pertes de données | 130 |
| Figure 34 Cadre collaboratif BIM proposé : requêtes et enrichissements mutuels de données..... | 131 |
| Figure 35 Fonctionnement général du prototype de logiciel Treegram | 136 |
| Figure 36 Architecture du logiciel Treegram | 137 |
| Figure 37 Structuration de la base de données : workspaces et droits d'accès..... | 138 |
| Figure 38 Métaobjets dans Revit, Solibri et Treegram..... | 139 |
| Figure 39 Interface Utilisateur - Dashboard..... | 141 |
| Figure 40 Exemple d'une requête et de son résultat..... | 142 |
| Figure 41 Différents types de requêtes..... | 143 |
| Figure 42 Requête basée sur l'analyse de paramètres depuis la visionneuse | 144 |
| Figure 43 Menus déroulants aidant à la formulation des requêtes | 144 |
| Figure 44 Requête itérative | 146 |
| Figure 45 Requêtes itératives et en parallèle..... | 146 |
| Figure 46 Requête complexe et assemblage de requêtes simples - Condition « OU » | 147 |
| Figure 47 Requête complexe et assemblage de requêtes simples - Condition « ET »..... | 147 |
| Figure 48 Vue métier dans Treegram - A | 149 |
| Figure 49 Vue métier dans Treegram - B..... | 149 |
| Figure 50 Requête révélant un manque de paramétrage | 152 |

| | |
|---|-----|
| Figure 51 Modification d'un ou plusieurs attributs dans Treegram | 153 |
| Figure 52 Requête permettant de reclassifier des données..... | 154 |
| Figure 53 Enrichissement de données..... | 154 |
| Figure 54 Vérification de l'enrichissement de données | 155 |
| Figure 55 Cycle Requête - Vérification - Enrichissement..... | 155 |
| Figure 56 Extension | 156 |
| Figure 57 Extension et itération | 156 |
| Figure 58 Cadre de co-modélisation via Treegram..... | 157 |
| Figure 59 Test de robustesse – Comparaison du nombre d'éléments, dans Revit et Treegram | 158 |
| Figure 60 Test de robustesse : comparaison des métadonnées d'un mur, dans Revit et Treegram..... | 159 |
| Figure 61 Hétérogénéité de la structuration des données au sein d'un même format | 160 |
| Figure 62 Création d'une vue métier structurelle sur la base d'un fichier source Revit | 161 |
| Figure 63 Création d'une vue métier structurelle sur la base d'un fichier source IFC..... | 161 |
| Figure 64 Hétérogénéité de la maquette fédérée : différents métiers, logiciels de modélisation, formats | 163 |
| Figure 65 Maquette fédérée dans Treegram..... | 163 |
| Figure 66 Création d'une vue métier structurel..... | 164 |
| Figure 67 Création d'une vue métier pour la façade | 164 |
| Figure 68 Processus d'enrichissement de données dans Treegram, avec feedback dans le logiciel source | 165 |
| Figure 69 Vue multi-métier, multiformats | 168 |
| Figure 70 Processus d'enrichissement de données..... | 169 |
| Figure 71 Vue multi-métier de la charpente..... | 170 |
| Figure 72 Propagation de l'enrichissement de données dans le fichier source | 170 |
| Figure 73 Co-saisie de paramètres de performance acoustique | 171 |
| Figure 74 Processus de comparaison de composants BIM via Treegram | 173 |
| Figure 75 Comparateur de composants BIM | 174 |
| Figure 76 Règles de numérotation des panneaux de murs-rideaux | 174 |

| | |
|---|-----|
| Figure 77 Workflow de génération d'un nom unique par panneau | 175 |
| Figure 78 Blocks Dynamo pour connecter Revit à Treegram | 176 |
| Figure 79 Arbre de vérification visuelle d'attribution des types des panneaux | 177 |
| Figure 80 Arbre de vérification visuelle d'attribution des étages des panneaux | 177 |
| Figure 81 Type d'intersection géométrique à générer pour modéliser la surface utile | 179 |
| Figure 82 Workflow de génération des contours de surface utile | 179 |
| Figure 83 Visualisation des contours de surfaces utiles dans Treegram | 180 |
| Figure 84 Exemple d'un plan de faux-plafond : trames et panneaux | 181 |
| Figure 85 Modélisation multi-logicielle..... | 182 |
| Figure 86 Workflow de génération des calepinages de faux-plafonds..... | 182 |
| Figure 87 Automation de la vérification des maquettes..... | 184 |

Liste des sigles et des abréviations

AEC : *Architecture, Engineering and Construction* (correspond à “BTP” en français)

AMO : Assistance à la Maîtrise d’Ouvrage

APD : Avant-Projet Détaillé

API : *Application Programming Interface*

APS : Avant-Projet Sommaire

BAM : BIM AutoMator

BEM : *Building Energy Modeling*

BE : Bureau d’études

BIM : *Building Information Modeling* ou *Building Information Model*

BTP : Bâtiments et Travaux Publics (désigne l’industrie du bâtiment)

CAD : *Computer Aided Design* (CAO en français)

CAE : *Computer Aided Engineering*

CAM : *Computer Aided Manufacturing*

CDE : *Common Data Environment*

DOE : Dossier des Ouvrage Executés

ERP : *Enterprise Resource Planning*

FM : *Facilities Management*

HBIM : *Heritage BIM*

IAI : *International Alliance for Interoperability*

IoT: *Internet of Things*

IFC : *Industry Foundation Classes*

LOA : *Level of Accuracy*

LOD : *Level of Development*

LOG : *Level of Geometry*

LOI : *Level of Information*

MVD : *Model View Definition*

MEP : *Mechanical, Electrical, Plumbing*

NURBS : *Non-Uniform Rational Basis Splines*

PLM : *Product Lifecycle Management*

PDM : *Product Data Management*

SIG : *Système d'Information Géographique (GIS en anglais)*

SHM : *Structural Health Monitoring*

STEP : *STandard for the Exchange of Product model data*

Notes sur la langue et le formatage de cette thèse

Langage

Cette thèse a été rédigée en français ; toutefois, le contexte de la recherche sur le BIM étant largement international, la grande majorité de la bibliographie de cette thèse est en langue anglaise, et beaucoup de concepts afférents ont été originellement énoncés en anglais.

Afin de faciliter la lecture, notamment pour les chercheurs et professionnels du BIM, certains mots sont donc, à dessein, restés en langue anglaise, puisqu'utilisés couramment dans la littérature scientifique et sur le terrain – comme :

- Les acronymes anglais couramment utilisés en français (comme BIM, CAD ou PLM, cf. *Liste des sigles et des abréviations*)
- Les commandes de logiciels
- Les mots liés à l'informatique passés dans le langage courant, ou qui n'ont pas de solides équivalents français (comme : *user-friendly, inputs, outputs, set, drag'n'drop, workflow, as built, driver, mapping, big data, machine learning, one-shot, template, cloud, feedback, etc.*)
- Les citations de travaux historiques et techniques, que la traduction pourrait déformer.

Formatage

Afin de faciliter la lecture, et les phrases ou conclusions clef seront **surlignées en gras** ; et tout ce qui se rapporte à des fonctionnalités logicielles, à des formules ou des paramètres sera mis en forme comme ceci.

Notes sur le partenariat industriel de cette thèse CIFRE

La présente thèse est menée en contrat CIFRE (Conventions Industrielles de Formation par la Recherche), en partenariat avec l'ANRT (Association Nationale Recherche et Technologie).

Elle a été menée à l'ENSAM (Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers), au sein du laboratoire LAMIH UMR CNRS 8201, avec un partenaire industriel : la start-up M4D-Treegram, qui travaille autour de l'automation dans le BIM.

L'objectif de cette thèse est de faire des ponts entre la recherche scientifique dans le domaine de l'interopérabilité BIM et les recherches pratiques menées sur le terrain par cette start-up, notamment via le prototype logiciel développé par celle-ci, appelé Treegram (qui n'est pas encore commercialisé), visant à fluidifier la collaboration BIM. Ce logiciel est une idée originale de Thomas Maigne, et initialement développée depuis 2014 par Mohammed Larabi. Ma contribution, en tant qu'architecte et doctorante CIFRE, a été d'étayer scientifiquement ce prototype, et notamment de :

- appuyer théoriquement son développement,
- contribuer à la conception de certaines fonctionnalités,
- l'implémenter sur des projets d'architecture,
- évaluer son apport dans des situations de projets réels.

Introduction

L'industrie AEC (*Architecture, Engineering and Construction*) a connu une ébauche de transition digitale à la fin des années 1980 avec la numérisation du dessin, suivie dans les années 1990-2000 des prémises du BIM (*Building Information Modeling*), impliquant des modèles 3D augmentés de métadonnées, des modélisations paramétriques et associatives, des designers dits computationnels, des projets d'architectures dites non standards aux morphologies inusuelles, des prouesses technologiques, et des promesses de collaboration digitale fluide, intuitive, automatisée – indolore. Depuis 2010, la pratique du BIM s'est démocratisée, puis peu à peu figée, et les promesses collaboratives se sont avérées non tenues : les workflows autour des maquettes BIM sont poussifs, souvent court-circuités, et encore encombrés des processus traditionnels papier ; les acteurs de l'AEC ont du mal à coopérer autour de bases de données et d'environnements digitaux 3D. Le manque d'interopérabilité BIM, décrié par les acteurs sur le terrain et reconnu par la communauté scientifique, est souvent incriminé dans cet échec collaboratif : les données BIM ont du mal à circuler d'un métier à l'autre, créant des blocages et des difficultés pour les différents intervenants à s'échanger des données. La présente thèse, réalisée avec un partenariat industriel CIFRE et une collaboration scientifique entre les Arts et Métiers et le laboratoire LAMIH, vise à pallier ce problème en considérant à la fois les aspects organisationnels et digitaux.

Dans le 1^{er} chapitre, nous investiguerons cette problématique du manque d'interopérabilité qui, depuis la démocratisation du BIM dans les années 2010, est considérée comme l'un des freins les plus importants à la collaboration digitale dans l'AEC. Celle-ci implique des considérations techniques (interopérabilité technologique : compatibilité entre modèles de données, formats) et organisationnelles (interopérabilité métier : modèles d'affaires, coopération humaine) au sein d'une industrie fragmentée et peu digitalisée.

Dans le 2^{ème} chapitre, nous montrerons que durant la période de gestation du BIM des années 1990, une vision plus holistique était à l'œuvre quant à la question de la digitalisation de l'AEC, avec des perspectives d'intégration globale des processus informatiques et métier.

Or dans la littérature scientifique récente, de 2013 à 2021, ces deux pendants de l'interopérabilité sont trop rarement abordés conjointement – le premier recevant plus d'attention que le second. Une lacune dans la recherche en particulier attirera notre attention, au sujet des technologies permettant d'interroger des données BIM, qui seraient pourtant à même de répondre à un besoin métier très prégnant : celui de rechercher et retrouver des données précises dans les ensembles souvent confus que sont les maquettes BIM. Le sujet des requêtes BIM apparaîtra donc comme un potentiel levier technique à même de résoudre un problème collaboratif, adressant la question des échanges de données BIM et de l'interopérabilité dans sa globalité.

Dans le 3^{ème} chapitre, nous émettrons et étayerons l'hypothèse selon laquelle la collaboration BIM pourrait être améliorée par l'utilisation de requêtes. En effet, les échanges de données BIM sur le terrain sont basés sur des extractions manuelles de données, impliquant duplications, ressaisies, pertes de données lors des itérations. Remplacer ces extractions ad hoc par des systèmes formalisés de requêtes dynamiques permettrait d'éviter aux utilisateurs des tâches rébarbatives, et d'assurer la continuité des flux de données. De plus, d'un point de vue théorique, l'interrogation de données est inhérente au paradigme du big data, et nécessaire pour appréhender des volumes importants de données. Un cadre collaboratif sera proposé en conséquence, basé sur des cycles itératifs de requêtes et d'enrichissements de données, visant à établir un cadre de co-modélisation BIM multi-métier.

Dans le 4^{ème} chapitre, nous exposerons les principes du prototype logiciel, Treegram, établissant ce cadre collaboratif. Celui-ci implique de fédérer et de transcrire des maquettes BIM hétérogènes – modélisées par différents métiers – dans une base de données neutre, dans laquelle des utilisateurs peuvent formuler des requêtes, créer des vues métier, et enrichir des données. Les requêtes constituent l'unité de base des échanges de données, et la collaboration s'organise via des cycles itératifs de requêtes - vérifications - enrichissements de données.

Dans le 5^{ème} chapitre, nous présenterons et analyserons des implémentations du prototype logiciel sur un projet d'architecture en phase d'étude. Nous montrerons que l'utilisation de Treegram permet aux utilisateurs de créer des vues métier via des assemblages de requêtes, d'enrichir et de co-renseigner des données. La co-modélisation multi-métier, si elle est donc possible techniquement, mène toutefois inévitablement à la question des dispositions

organisationnelles, contractuelles, économiques et humaines nécessaires pour l'émergence de telles synergies de travail, et de l'établissement d'une confiance plus grande entre les différents acteurs d'un projet donné. En effet, Treegram sert à orchestrer non seulement des flux de données classiques entre utilisateurs, mais aussi des flux de données entre différents processus de production BIM ; ainsi la question de l'interopérabilité – de la facilitation des échanges à l'automatisation des flux de données – mène-t-elle irrésistiblement à celle de la gestion automatisée d'une production globale de projet, et à des logiques d'ingénierie concourante. Nous concluons en interrogeant la migration de l'AEC vers une vision plus intégrative, notamment en regard des technologies de l'industrie 4.0.

Chapitre 1. La problématique de l'interopérabilité BIM

Le BIM vise à améliorer la fiabilité des données et des workflows dans l'industrie AEC, et donc à améliorer la qualité des bâtiments tout en réduisant le coût et temps de leurs études et construction. Depuis son apparition dans les années 2000, le BIM a gagné en popularité et s'est largement implanté dans les pratiques professionnelles de l'AEC. Au cours de la dernière décennie, un nombre important de gouvernements ont rendu obligatoires les livrables BIM pour les concours publics et ont investi dans des normes nationales BIM, ce qui constitue un fort indicateur de pénétration du marché (W. Wu et al., 2018). Parallèlement, le BIM est aussi un vaste champ de recherche universitaire. Étendard de la digitalisation de l'industrie du bâtiment, avec son potentiel disruptif, le BIM semble toutefois présenter une faiblesse sur la question de la collaboration et de l'interopérabilité. Dans le présent chapitre, après avoir dressé une définition et un historique du BIM, et exposé les spécificités de l'industrie AEC, nous caractériserons la question précise de l'interopérabilité au sein du BIM et ses différentes retombées.

1.1 Définition du BIM

Le terme BIM, acronyme de *Building Information Modeling*, désigne les processus et méthodes de création et de gestion de l'information via l'artefact d'une *maquette numérique* (ou *Building information Model* en anglais). La définition du BIM fait aujourd'hui consensus ; ainsi, d'après l'US National BIM Standards (*National BIM Standard - United States*, n.d.) :

« A BIM is a digital representation of physical and functional characteristics of a facility. As such, it serves as a shared knowledge resource for information about a facility forming a reliable basis for decisions during its lifecycle from inception onward ».

La définition du BIM par buildingSmart France (*Notions Clés Du BIM - BuildingSmart France*, n.d.) est similaire, et distingue la maquette numérique de son processus de création et d'utilisation :

« La maquette numérique (MN) :

Il s'agit d'une représentation 3D des caractéristiques physiques et fonctionnelles d'un bâtiment. Mais outre les trois 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 technique, constituée d'objets définis par leurs caractéristiques et leurs relations entre eux. Le tout forme un ensemble structuré d'informations sur un ouvrage.

Un processus métier de génération et d'exploitation de data techniques :

Il 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 MN. »

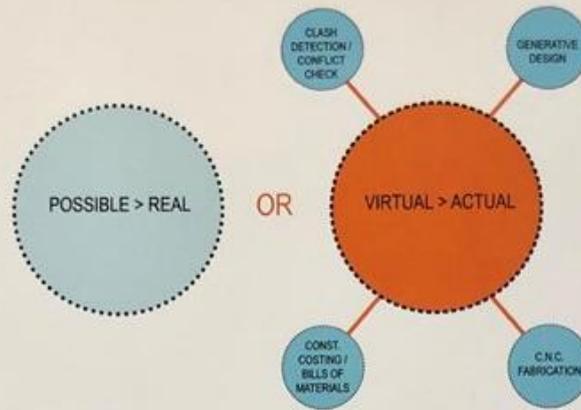
Une maquette BIM, ou maquette numérique, contient de l'information géométrique et non géométrique ; c'est-à-dire des objets sémantiquement riches. Avant l'apparition du BIM, la famille d'outils digitaux utilisée dans l'industrie du bâtiment était celle des outils CAD (*Computer Aided Design*) – soit du dessin technique numérique 2D. La nouveauté du BIM se situe au niveau des données non géométriques – souvent appelées *métadonnées*, associées à des modélisations 3D – peu fréquentes dans l'AEC avant les années 2000. De plus, la modélisation orientée objet s'impose comme le modèle de données¹ principal des maquettes BIM dès sa période embryonnaire dans la seconde moitié des années 90 (Brown et al., 1995). Ainsi, une

¹ Selon Wikipedia, « en informatique, un modèle de données est un modèle qui décrit la manière dont sont représentées les données dans une organisation métier, un système d'information ou une base de données. »
Source : https://en.wikipedia.org/wiki/Data_model

maquette BIM peut-être décrite comme une maquette CAD, augmentée de métadonnées, et orientée objet (Muller et al., 2017).

Toutefois, le changement de paradigme principal entre le CAD et le BIM réside dans l'utilisation et le comportement des données d'une maquette numérique. Un dessin CAD est destiné à être interprété par les fonctions cognitives d'un *humain* ; tandis qu'une maquette BIM, si elle se doit d'être appréhendable par un cerveau humain, est aussi destinée à être interprétée par un *ordinateur*. C'est ici que s'étoffe la notion de *collaboration BIM* (Figure 1) incluant échanges et interprétations hybrides (cognitives et algorithmiques) de données. C'est aussi en ce sens qu'une maquette BIM est plus proche d'une forme de simulation que d'une représentation (Girard, 2014).

En pratique, ce qui est appelé *le BIM* est une méthodologie ou un processus de création et d'utilisation d'une maquette BIM pour la conduite d'un projet. Les différents acteurs, au lieu de s'échanger des dessins CAD, éditent collectivement des bases de données BIM. Concrètement, en 2021, chaque équipe édite une maquette BIM orientée métier ; les différentes maquettes sont ensuite assemblées et constituent la maquette fédérée, qui regroupe les différentes disciplines d'un projet. Le terme *maquette BIM* est donc potentiellement ambigu : à l'échelle d'une équipe, il peut désigner une maquette métier ; à l'échelle d'un projet, il peut désigner une maquette fédérée – ou une des maquettes métier qui le constitue. Par ailleurs la taille d'une maquette, métier ou fédérée, est très variable selon la taille du projet concerné, sa phase, et selon son niveau de développement (LOD, *Level of Development*), c'est-à-dire, selon le degré de richesse géométrique et sémantique de ses objets BIM ; elle peut être contenue dans un fichier, ou dispatchée dans un ensemble de fichiers dont la taille peut dépasser les 100 Go. Ainsi, le terme de maquette BIM doit être entendu comme un ensemble de données BIM, cohérent pour une entité donnée : un projet, un métier, un fragment de projet ; ce terme implique divers niveaux de granularité.



above: Interpretation, or at least discussion, on the project site of the Pavilion Zürichhorn, Switzerland, in 1960. In the possible to real paradigm, interpretation is necessary to construct an actual building from a set of design possibilities. As there is a gap in the transfer of static information between the architect and the general contractor, it is incredibly difficult to ensure the contractor has a comprehensive understanding of the design intent, and the architect of the construction techniques and methods. Interpretation leads to errors in the field, or situations where certain components or construction sequences need rethinking, both of which can be costly. This, unfortunately, has happened to the best of us! Pictured are Willy Boesiger, Editor of *Oeuvre Complète*, City Architect Adolf Wasserfallen, Le Corbusier, Inspector of Public Parks Pierre Zbinden, and the gallery owner Heidi Weber. © Rene Burri/Magnum Photos.

Figure 1 Une allégorie de la collaboration BIM (R.Garber, 2009)
 La question de l'interprétation cognitive des informations de projet (photo), et une proposition de prise en charge par des processus algorithmiques (diagramme) Source : (Garber, 2009)

Selon la phase du projet, une maquette BIM a différentes visées. En phase de conception, elle alimente l'élaboration du projet, et permet la simulation de différents scénarii (de partitionnements d'espace, de performances structurelles, acoustiques, thermiques, etc.). En phase d'exécution, le niveau de définition des modélisations BIM est augmenté, afin d'anticiper les incohérences et d'éviter les reprises sur le chantier – et mieux maîtriser le processus de construction. Au moment de la livraison d'un projet, la maquette dite *as built* est censée modéliser fidèlement le projet *tel que construit* ; une maquette *as built* idéale devrait être un nuage de points 3D du projet, augmenté de sémantique. En réalité, on parle plutôt sur le terrain de maquette de DOE (*Dossier des Ouvrages Exécutés*) ou de DOE numérique, qui est une version de la maquette d'exécution contenant les mises à jour liées à l'exécution *réelle* du projet, qui diffère toujours, dans une certaine mesure, de l'exécution *planifiée*. Enfin, la maquette d'exploitation est censée permettre de piloter l'utilisation d'un bâtiment ; sa version 4.0², le jumeau numérique (*Digital Twin*), est censée être alimentée par les différentes informations collectées par les capteurs et autres dispositifs de l'IoT (*Internet of Things*, ou Internet des objets), afin de monitorer en temps réel l'exploitation du bâtiment.

Autour du BIM, divers métiers se sont créés, avec les *AMO BIM* (Assistants à la Maîtrise d'Ouvrage), qui aident un client à définir une stratégie BIM ; les *BIM managers*, qui édictent dans des *conventions BIM* les règles de création et de gestion des maquettes numériques au sein d'un projet donné, impliquant diverses équipes ; les *BIM coordinateurs*, qui font un travail similaire, au sein d'une équipe ou d'une entreprise ; les *modeleurs BIM*, qui ont remplacé les dessinateurs-projeteurs 2D – sans compter les éditeurs de logiciels et leurs armées de formateurs BIM. Ces nouveaux rôles, voire parfois nouveaux métiers, sont très spécialisés, assez obscurs pour des non-sachants ; ils relèvent de positions d'expert dans le « Far-West » que constitue

² « Le concept d'industrie 4.0 ou industrie du futur correspond à une nouvelle façon d'organiser les moyens de production. Cette nouvelle industrie s'affirme comme la convergence du monde virtuel, de la conception numérique, de la gestion (opérations, finance et marketing) avec les produits et objets du monde réel » Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Industrie_4.0.

l'industrie naissante du BIM – dans laquelle malheureusement peu de contre-expertise existe encore, le BIM étant un domaine encore trop peu mûr.

Dans une comparaison avec les autres industries, le BIM est souvent vu comme le PLM (*Product Life-cycle Management*) de l'industrie du bâtiment (Sattler & Maigne, 2018) – toutefois, comme nous le verrons dans la section suivante, cette industrie a ses spécificités propres, qui limitent cette comparaison.

1.2 Spécificités de l'industrie du bâtiment

Peu automatisée, avec de faibles marges et une faible productivité, ses délais et coûts souvent dépassés, l'industrie du bâtiment est souvent considérée comme archaïque – ce qui peut être expliqué par différents aspects clefs de cette industrie.

1.2.1 Prototype permanent

Tout d'abord, il est courant d'entendre que, contrairement aux autres industries, l'industrie du bâtiment consiste à construire des prototypes à chaque nouveau projet (Muller et al., 2017). Cette affirmation est discutable théoriquement, si l'on considère le nombre de composants standardisés dans un bâtiment donné ; la seule véritable variable physique étant le site de construction, et les intempéries d'un chantier, que l'on ne retrouverait pas en usine. Elle est d'autant plus discutable si l'on considère l'histoire moderne de l'architecture, qui au début du XX^{ème} siècle, a vu émerger une forte volonté de normer et d'industrialiser la conception et la production de bâtiments. La variable qui, en réalité, plus qu'un site de projet ou une intempérie – éléments dont l'imprévisibilité est somme toute prédictible, ou pour le moins anticipable – change quasiment systématiquement d'un projet à l'autre, c'est la variable organisationnelle : les montages financiers, les dispositions contractuelles, les différentes entreprises, et les organisations humaines.

1.2.2 Forte fragmentation

En effet, l'industrie du bâtiment est très fragmentée et diverse, composée (environ à 95 %) d'une vaste majorité de moyennes, petites et très petites entreprises (PME et TPE), (C. M. Eastman et al., 2011; Howard et al., 1989). Typiquement, sur un projet donné, un très grand

nombre d'entreprises vont s'interfacer ; or ces entreprises n'ont parfois jamais travaillé ensemble, et sont très variées en termes de métiers – disciplines ou domaines, de savoirs, de styles de management, de modèles économiques, de compétences digitales, de qualifications, et même de langages (liés au caractère international de certains grands projets, ou au fait que les ouvriers du bâtiment sont souvent immigrés). Ainsi, miser sur la capitalisation du savoir ou mener une conduite du changement est ardu dans l'AEC – et ce même au sein de grands groupes dits « majors », comme en France Bouygues construction ou Vinci, qui sont souvent composés de multitudes de TPE et PME pas forcément intégrées. Ce milieu très hétérogène, paradoxalement, impliquerait un fort besoin collaboratif ; mais, dans une sorte de cercle vicieux, c'est justement cette diversité qui freine la collaboration.

1.2.3 Faible technologisation

Cette fragmentation est souvent invoquée pour expliquer pourquoi l'industrie AEC est globalement très en retard en termes de digitalisation. Les causes sont sûrement multiples, mais il semble que l'industrie AEC est en retard en termes de technologies en général. À cet égard, au tout début de son livre *The Second Digital Turn – Design Beyond Intelligence* (Carpo, 2017), l'historien Mario Carpo expose cet étrange rapport que l'architecture entretient avec la technologie, faite d'allers et de retours, de retards, et d'ellipses : le fameux *De Architectura* de Vitruve est, au moment de sa rédaction, un traité d'architecture déjà obsolète en termes de technologies, oubliant les arches et les voûtes de l'ingénierie romaine ; l'architecture de la renaissance a fait l'impasse sur la plupart des innovations et prouesses techniques de l'ère gothique ; et la période moderne en architecture a tenté de rattraper 100 ans de retard en termes de mécanisation, d'automatisation et de production de masse. Le *digital* étant ni plus ni moins une technologie, il n'est pas surprenant que l'industrie du bâtiment soit l'une des moins digitalisées au monde – elle l'est même moins que l'agriculture (McKinsey Global Institute, 2017), comme l'indique la Figure 2.

Lower digitization in construction relative to other industries has contributed to the productivity decline

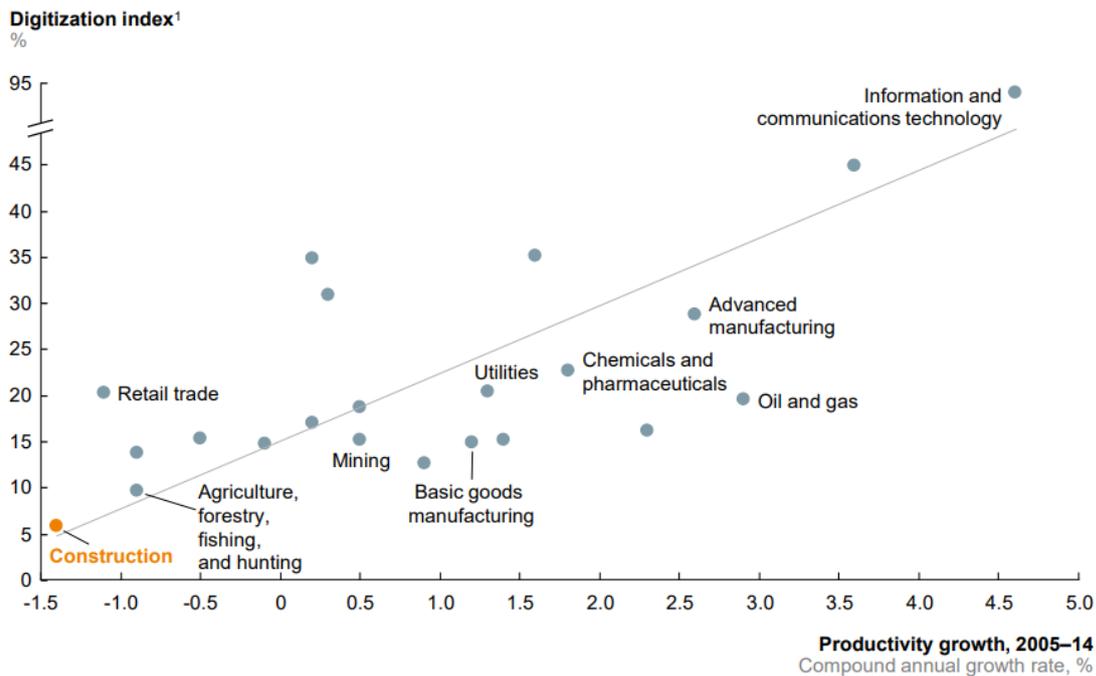


Figure 2 Le manque crucial de digitalisation et de productivité dans l'AEC (McKinsey, 2015)
Source : rapport sur la digitalisation et la productivité entre 2005 et 2014, McKinsey
<https://www.mckinsey.com>

1.2.4 Modèles économiques sinueux

La fragmentation de l'industrie AEC conduit à des modèles économiques réputés non vertueux. Traditionnellement, dans le monde occidental, un projet de bâtiment est globalement organisé autour de deux phases globales (la conception, puis la construction), et autour de trois acteurs majeurs : un client ou commanditaire (la maîtrise d'ouvrage), un architecte (la maîtrise d'œuvre) et une entreprise de construction (constituée d'une entreprise générale ou d'un groupement de plusieurs entreprises). Ces organisations se retrouvent dans beaucoup de pays – avec des variations mineures ; par exemple, dans le monde anglo-saxon, l'architecte va beaucoup plus loin dans l'exécution, et est responsable du dessin à un niveau de détail élevé ; tandis qu'en France, l'architecte s'arrête plus tôt, et passe cette responsabilité à l'entreprise de construction.

Ces écosystèmes économiques créent parfois une divergence d'intérêts. Par exemple, un maître d'ouvrage n'a pas forcément un intérêt économique à ce qu'un bâtiment soit qualitatif sur la durée, mais son intérêt réside en une livraison en temps et en heure ; un architecte a intérêt à ce

qu'un bâtiment soit beau et qualitatif plutôt que livré à temps ; une entreprise de construction a un intérêt vital dans la solidité physique de la construction, puisque, comme l'architecte, il a une garantie décennale, mais pas dans l'aspect esthétique du bâtiment ni dans une collaboration parfaite avec la maîtrise d'œuvre – puisqu'il peut facturer des travaux supplémentaires à chaque modification de projet en cours de chantier par l'architecte.

Ainsi, l'aspect prototypaire, la forte fragmentation, la faible technologisation et la sinuosité des modèles économiques de l'industrie du bâtiment constituent un terrain particulier, plutôt chaotique, pour sa digitalisation – dont le BIM est la plus récente illustration, et dont nous allons dresser l'historique dans la section suivante.

1.3 Bref historique du BIM

Le BIM s'inscrit dans le sillon de la transformation digitale de l'industrie du bâtiment, qui s'est largement faite par infiltration des technologies héritées d'industries plus précocement digitalisées : manufacturières, automobiles, aéronautiques (Figure 3).

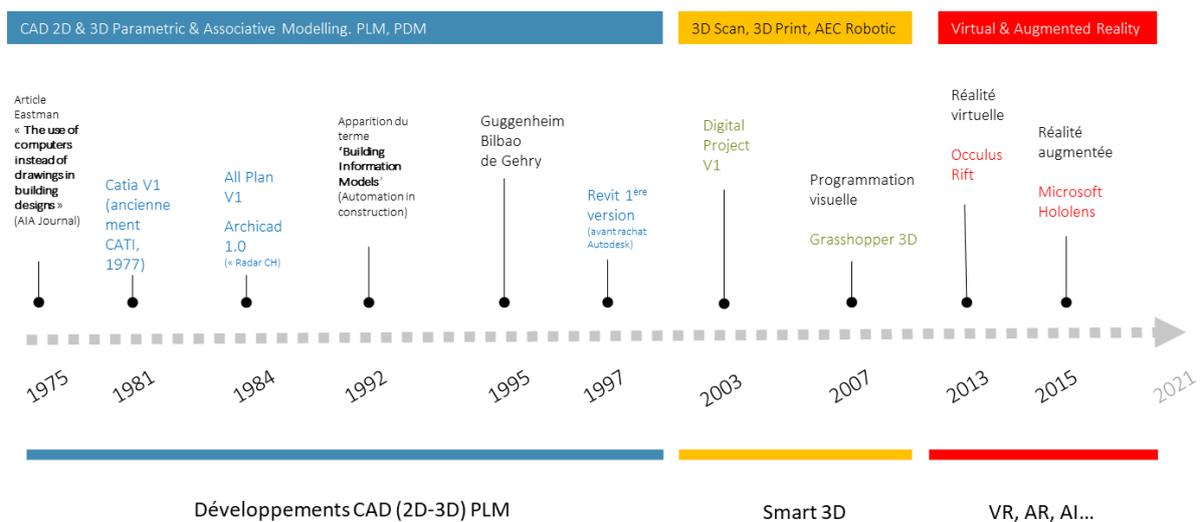


Figure 3 Frise chronologique des logiciels PLM, CAD et BIM

1.3.1 Les années 1970/80 : prémices

En 1974, Charles Eastman publie un article au sujet de ce qui allait devenir le BIM (l'acronyme n'existant pas encore à l'époque) : *An Outline of the Building Description System* (C. M. Eastman et al., 1974). Y sont exposées les bases du BIM telles qu'on les connaît aujourd'hui :

l'utilisation d'une base de données graphique pour décrire un bâtiment, de géométries 3D associées à des métadonnées, la possibilité de créer automatiquement des dessins 2D extraits de cette base de données, l'extraction de données non géométriques, et à certains égards, les prémisses conceptuelles de la modélisation orientée objet (avec le binôme *templates* et *instance*). La suite de cette recherche est publiée en 1975 dans un article au titre radical : *The use of computers instead of drawings* (C. M. Eastman, 1975), et contient des figures de ce qu'on appellerait aujourd'hui des maquettes numériques – bien au-delà de simples modélisations 3D (Figure 4).

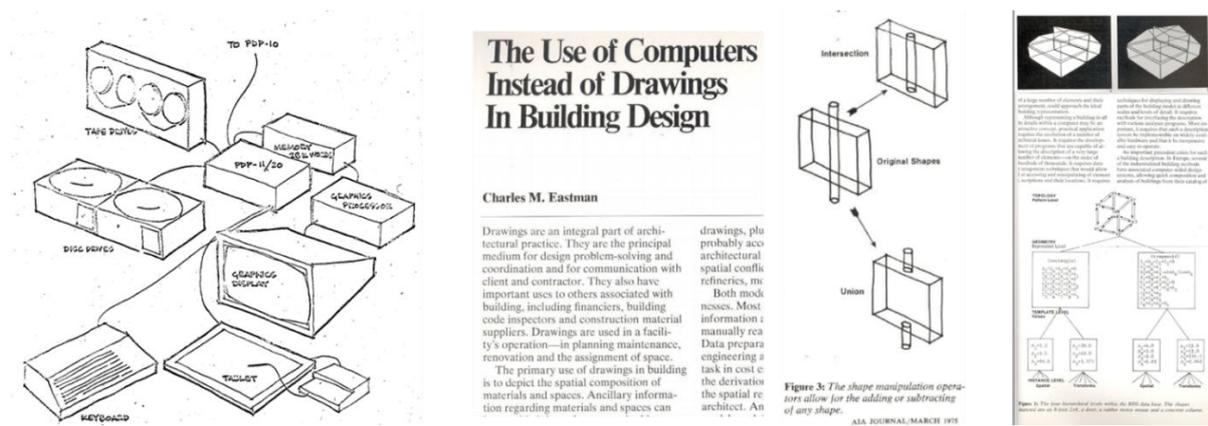


Figure 4 Le remplacement du dessin par la computation (C.Eastman, 1975)
Source : (C. M. Eastman, 1975)

Pourtant, malgré ces recherches précoces, la digitalisation de l'industrie du bâtiment prendra du temps. Une première brique technologique arrive à la fin des années 1980, qui voit l'industrie du bâtiment adopter le dessin technique CAD (*Computer-Aided Design*), précédemment développé dans les industries déjà digitalisées. Le dessin CAD consiste à numériser le dessin 2D, en reproduisant digitalement la logique physique de la superposition de calques qu'on trouve dans le dessin traditionnel : on superpose des couches d'information, et un calque est assigné à un métier ou à une catégorie d'éléments. Le logiciel emblématique de cette ère est Autocad (par l'éditeur Autodesk), aujourd'hui encore largement utilisé dans les agences d'architecture ; il est utilisé pour *dessiner* des *représentations* – c'est une digitalisation des processus traditionnels.

1.3.2 Les années 1990 : explorations

De même que le dessin CAD, les maquettes CAD 3D existent déjà depuis la fin des années 70, mais n'infusent dans l'industrie du bâtiment qu'à partir des années 80. À titre d'exemple, le logiciel CATIA, développé par Dassault Aviation en 1977 (en développement interne, avant la création de Dassault Systèmes en 1981) est, comme son acronyme l'indique (Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée), un logiciel de modélisation 3D originellement développé pour la conception de l'avion Mirage (Figure 5). Ce logiciel est à la fois un logiciel CAD, mais aussi un logiciel de CAM/CAE (*Computer Aided Manufacturing/Computer Aided Engineering*) et de PLM.

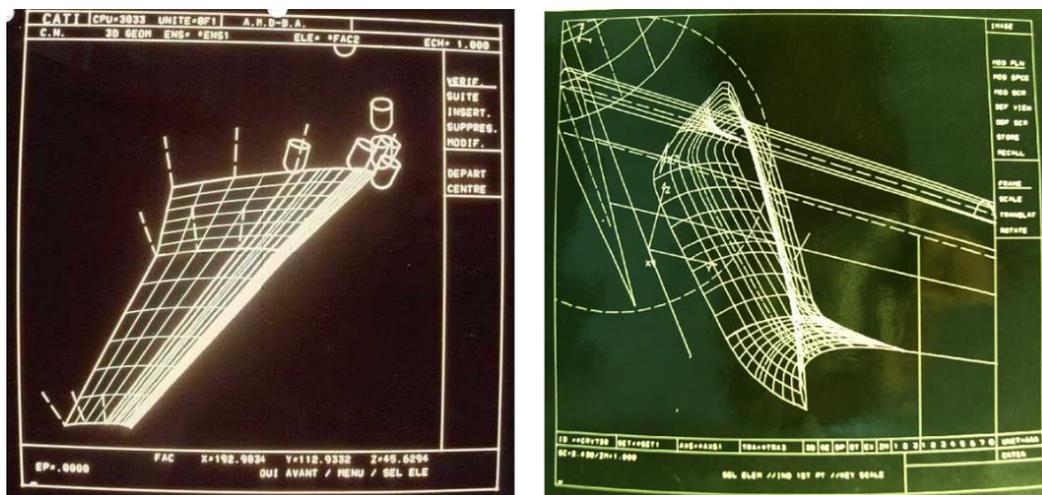


Figure 5 Captures d'écran du logiciel CATIA V2, 1983

En 1992, l'architecte Frank Gehry utilise expérimentalement CATIA pour concevoir et construire la sculpture *El Peix* à Barcelone pour les Jeux olympiques (Figure 6). Cette sculpture monumentale en métal, avec sa géométrie courbe et continue, n'était pas appréhendable avec les outils CAD 2D traditionnels, et nécessitait l'utilisation d'un logiciel 3D doté d'un moteur géométrique puissant, permettant aussi la manipulation de métadonnées, et la gestion fine des interactions de projet depuis la conception jusqu'à la fabrication, tout le long de la chaîne d'approvisionnement. Frank Gehry réitère l'expérience CATIA pour le musée Guggenheim à Bilbao en 1997, qui sera livré en temps et en heure, et sans dépassement de coût ; puis pour la plupart des bâtiments qu'il construira par la suite (dont le Walt Disney Concert Hall à Los Angeles en 2003, ou la fondation Louis Vuitton à Paris en 2014) (Gehry et al., 2020).

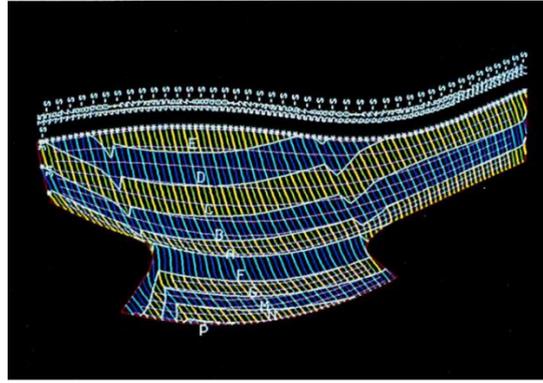


Figure 6 Peix, Frank Gehry, 1992, maquette CATIA
(source : haut : <https://mafana.wordpress.com/2011/10/03>
bas : (<https://www.architecturaldigest.com/gallery/best-of-frank-gehry-slideshow>)

Si Frank Gehry est considéré comme l'un des pionniers du BIM, il est lié à d'autres architectes précurseurs des années 90, explorant aussi des outils 3D non originellement développés pour l'industrie du bâtiment. L'architecte Greg Lynn s'empare du logiciel Maya (développé par Alias Systems Corporation, puis racheté bien plus tard par Autodesk en 2005), un logiciel 3D originellement dédié aux jeux vidéo, films d'animation et cinéma, et l'utilise, via son interface de scripting MEL, pour concevoir des projets aux morphologies courbes, avec une réflexion sur la variabilité des composants (*Citron House*, New York, 1994, et *Embryological House* en 1997 - Figure 7). Il conceptualise les nouvelles morphologies courbes et continues que ces outils permettent de concevoir, qu'il nomme *blobs*. Durant la même période, l'architecte Zaha Hadid, explorera aussi ce type de morphologies, et utilisera à la fois Maya, CATIA, et Rhinoceros 3D. Créé par McNeel en 1994, ce dernier permet de modéliser des courbes et surfaces mathématiquement précises, basées sur une géométrie NURBS (*Non-Uniform Rational Basis Spline*). Il est originellement pensé pour le design industriel (voitures, navires) et la joaillerie.

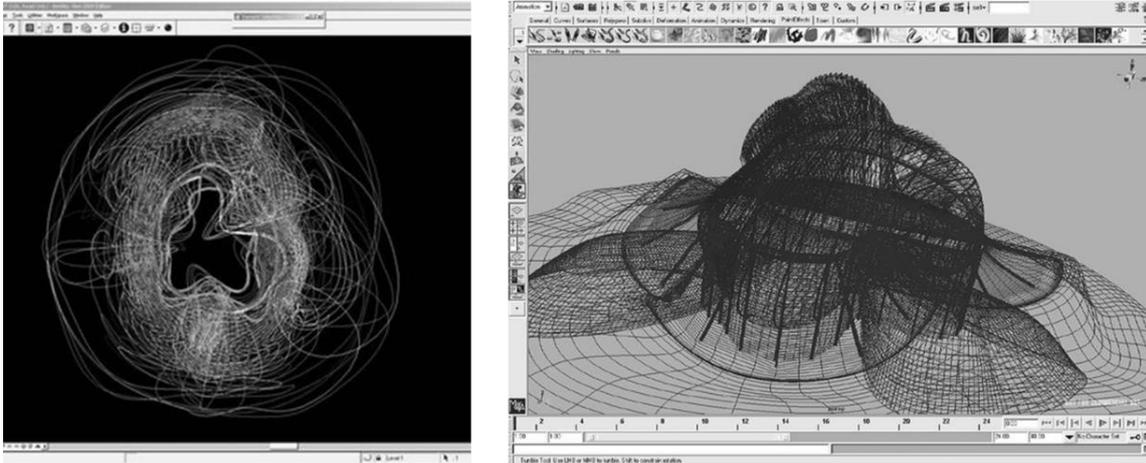


Figure 7 Embryological House, Greg Lynn, 1997
 Source : (Bird & LaBelle, 2010)- © Greg Lynn

Ces initiatives ont pour point commun d'explorer la variabilité d'un design pensé comme un système. Via la conception de bâtiments aux morphologies chahutées, Frank Gehry veut surtout montrer que leur processus de conception et de construction n'est pas ontologiquement différent d'un processus traditionnel ; qu'elles en sont une simple variation. Greg Lynn, avec le projet *Embryological house*, va explorer l'infinie variabilité d'un système – l'idée étant de concevoir un maximum de morphologies différentes sur la base d'un set fixe de variables (ainsi, 50 000 maisons différentes sont conçues en utilisant un ensemble strictement identique de composants initiaux). C'est l'idée d'*Architectures non standards*, explorée plus tard en 2003 dans une exposition au centre Pompidou à Paris. D'après Mario Carpo, c'est dans ces années-là que la notion de *customisation digitale de masse* est inventée, précisément par cette communauté d'architectes et de designers. Cette notion émergera plus tard dans les années 2010 dans d'autres industries, notamment avec l'avènement de l'industrie dite 4.0 :

« Digital mass customization is one of the most important ideas ever invented by the design professions [...]. And for better or worse, digital mass customization was *our* idea: it was developed, honed, tested and conceptualized in a handful of schools of architecture in Europe and in the United States in the 1990s. » (Carpo, 2017)

Si une fascination ou tout au moins un goût pour les géométries fluides est sûrement à l'œuvre dans l'émergence de ces architectures, celles-ci sont surtout la démonstration visuelle la plus

simple et directe d'un chamboulement plus profond : un manifeste ou une démonstration de l'idée qu'on peut concevoir et produire différemment via la computation.

En parallèle, plus pragmatiquement et plus silencieusement (Carpo, 2017), le terme BIM émerge. L'une des premières publications scientifiques à mentionner la notion de *Building Information Modeling* est publié en 1992 (van Nederveen & Tolman, 1992), et propose un modèle de maquette numérique collaborative basée sur différentes vues pour les différentes disciplines – ce qui est encore un vœu pieux en 2021, et préfigure les standards que sont les MVD (*Model View Definition*) développées par buildingSmart quelques années plus tard – que nous évoquerons à la section suivante. En 1994 naît l'IFC (*Industry Foundation Classes*), un format initialement créé par Autodesk, dérivé du format STEP (*Standard for the Exchange of Product model data* - un standard dans les industries manufacturières, automobiles, aéronautiques), rendu neutre et ouvert en 1997 à la création de l'IAI (*International Alliance for Interoperability*, qui deviendra en 2005 buildingSmart), un consortium à but non lucratif, incluant notamment Autodesk, Bentley et Nemetschek.

1.3.3 Les années 2000 : ébullition

Jusqu'en 2000, le BIM était à l'état de recherche dans le monde académique, et exploré sur quelques projets d'exception ; il était à peine nommé tel quel. Les années 2000 sont le moment de l'apparition du BIM sur la scène professionnelle plus globale.

Ces années voient tout d'abord le début de la démocratisation des logiciels 3D dans l'industrie du bâtiment. À titre d'exemple, le logiciel Sketch Up (apparu dans les années 2000, racheté par Google en 2006 puis Trimble en 2012) va désacraliser la 3D et permettre au grand public de modéliser très facilement une maison, un bâtiment, un morceau de ville. Le logiciel Rhinoceros 3D est de plus en plus utilisé dans la communauté des architectes et des ingénieurs, et est peu à peu enseigné dans les écoles d'architecture. Des logiciels BIM, au sens précédemment évoqué d'outils de modélisation 3D orientés objet, commencent à être utilisés beaucoup plus couramment, comme ArchiCAD (Graphisoft, racheté par Nemetschek en 2006), AllPlan (Nemetschek), ou Revit (acheté par Autodesk en 2002).

En 2002, Gehry Technologies est créée à partir de la cellule R&D (*Research and development*) de Gehry Partners, l'agence d'architecture de Frank Gehry, et commercialise en 2004 le logiciel

Digital Project : la version AEC-BIM de CATIA V5. Fort d'un partenariat avec Dassault Systèmes, ce spin-off de Gehry Partners va se lancer dans le consulting BIM pour d'autres architectes, sur des projets emblématiques comme le Louvre Abu Dhabi ou le Musée National du Qatar de Jean Nouvel. Gehry Technologies a un rôle de pollinisateur dans le monde des grands projets à géométrie complexe (Gehry et al., 2020). D'autres architectes célèbres, comme Herzog et De Meuron, utilisent Digital Project pour livrer leurs projets – comme c'est le cas pour le Stade National de Pékin, livré en 2008 (Figure 8). Norman Foster, un architecte anglais, conduit dans son agence une aventure similaire à celle de Gehry avec le logiciel Microstation de Bentley ; une cellule R&D (appelée *Modeling Group*) de son agence s'attelle à automatiser ce logiciel originellement CAD, pour créer des maquettes BIM customisées.

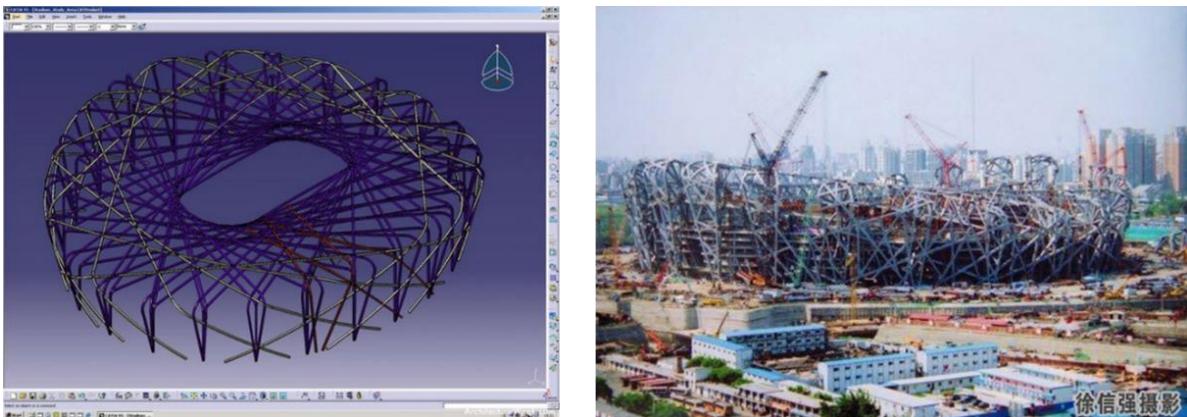


Figure 8 Stade National de Pékin, Herzog et De Meuron, 2008

À gauche : capture d'écran de la modélisation structurelle dans Digital Project (source : <https://beijingbirdsnest.wordpress.com>) ; à droite, photographie du chantier (source : <http://www.chinatoday.com/sports/olympic.bird%27s.nest.construction.pictures.htm>)

En 2007, McNeel lance un plugin gratuit pour Rhino : Grasshopper, qui propose une interface de programmation visuelle, et démocratise ainsi la création d'algorithmes pour générer, notamment, des géométries complexes. Ce plugin est alimenté par une communauté d'architectes et de designers créant et partageant en ligne des *packages* (des modules de scripting). Un engouement se développe pour ces outils, qui sont des émanations directes des prémisses exploratoires des années 90. Ce que Mario Carpo décrira plus tard comme « the new digital style of smooth and curving, « spliny » lines and surfaces » prend son plein essor (Carpo, 2017). L'associé de Zaha Hadid, Patrick Schumacher, donnera même un nom à ce « style » en 2007 : le paramétrisme (Figure 9). Toutefois, la notion même de *style* pour nommer ce courant

est controversée chez les théoriciens de l'architecture – certains y voyant un contresens. Ce courant est, de manière plus neutre, souvent désignée par le terme d'*architecture computationnelle* ou de *digital design*.

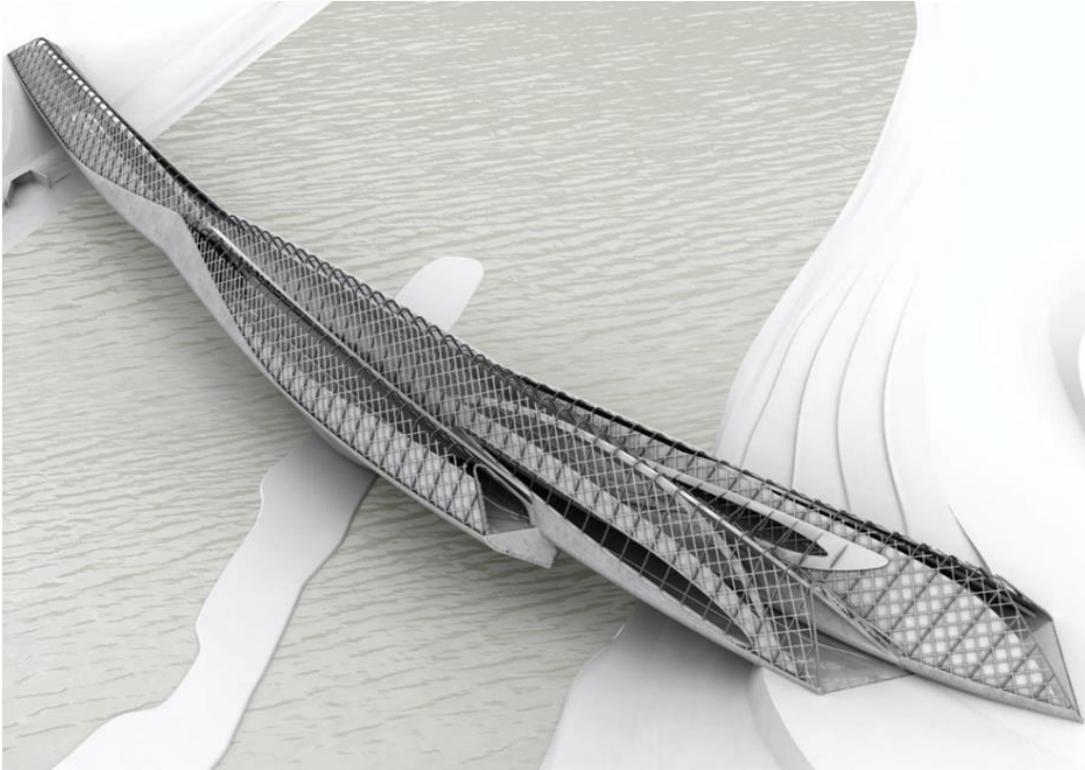


Figure 9 Zaragoza Bridge Pavilion, Zaha Hadid, 2008
Source : <https://www.zaha-hadid.com> © Zaha Hadid

La période des années 2000 est donc marquée par une grande liberté dans la manière d'utiliser les nouvelles générations d'outils 3D et BIM, qui sont tout juste assez matures pour être fonctionnels ; mais encore assez souples pour laisser la place aux initiatives et à leur customisation via l'écriture de code informatique (le *scripting*).

1.3.4 Les années 2010 : stagnation

Les années 2010 voient l'avènement du monopole du logiciel BIM Revit. En effet, si la décennie précédente était dominée par ArchiCAD, Revit commence à dominer le marché du logiciel BIM autour de 2008. Un article d'Artem Boiko (Boiko, 2020) en apporte une illustration avec l'analyse des statistiques Google Trends : en 2020, Revit se taille la part du lion dans le marché du logiciel BIM dans presque tous les pays (Figure 10).

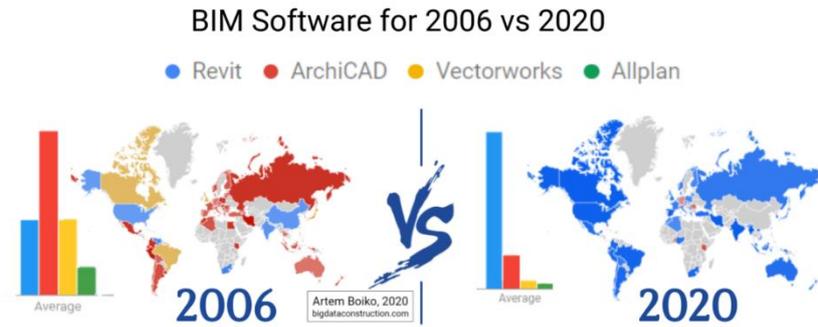


Figure 10 Une illustration du monopole de Revit

Source : <https://www.linkedin.com/pulse/lobbyist-wars-development-bim-part-2-open-vs-closed-revit-boiko-artem/>

Durant ces années, cette situation de monopole semble créer une sorte de gel dans les pratiques BIM – qui, d’aucuns diraient, doit aller de pair avec une forme de maturation du marché. En effet, la philosophie d’un logiciel comme Revit, si pratique et puissant soit-il, est radicalement opposée aux recherches expérimentales des années 90 qui ont infusé dans les années 2000, avec le détournement de logiciels non pensés initialement pour le domaine du bâtiment, et leur automation³ artisanale via l’écriture de scripts.

Dans Revit, Archicad ou All plan, l’utilisateur a à sa disposition un ensemble de composants ou objets BIM, préprogrammés, obéissant à des lois non définies par l’utilisateur, et peu explicitées. Voici un exemple de trois règles dans Revit : un mur est l’hôte d’une fenêtre ; un sol est par défaut horizontal, sinon c’est une rampe ; un mur peut être défini par une génératrice filaire horizontale tant que celle-ci est composée de segments et de portions d’arcs, mais dès lors que cette génératrice contient des splines (géométrie NURBS), le mur doit être modélisé sur la base d’une surface. La 1^{ère} règle correspond à une règle métier standard ; la 2^{ème} est une règle métier discutable (quid des sols inclinés, non standards ?) ; la 3^{ème} ne correspond à aucune règle métier, juste à une limite du moteur géométrique du logiciel. Si ces composants, contenant des règles métier embarquées, peuvent faire gagner du temps dans certains cas, ils peuvent aussi

³ Nous utiliserons le mot *automation* pour ce qui relève de l’automatisation de processus digitaux, nous référant à la définition suivante : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Automation>.

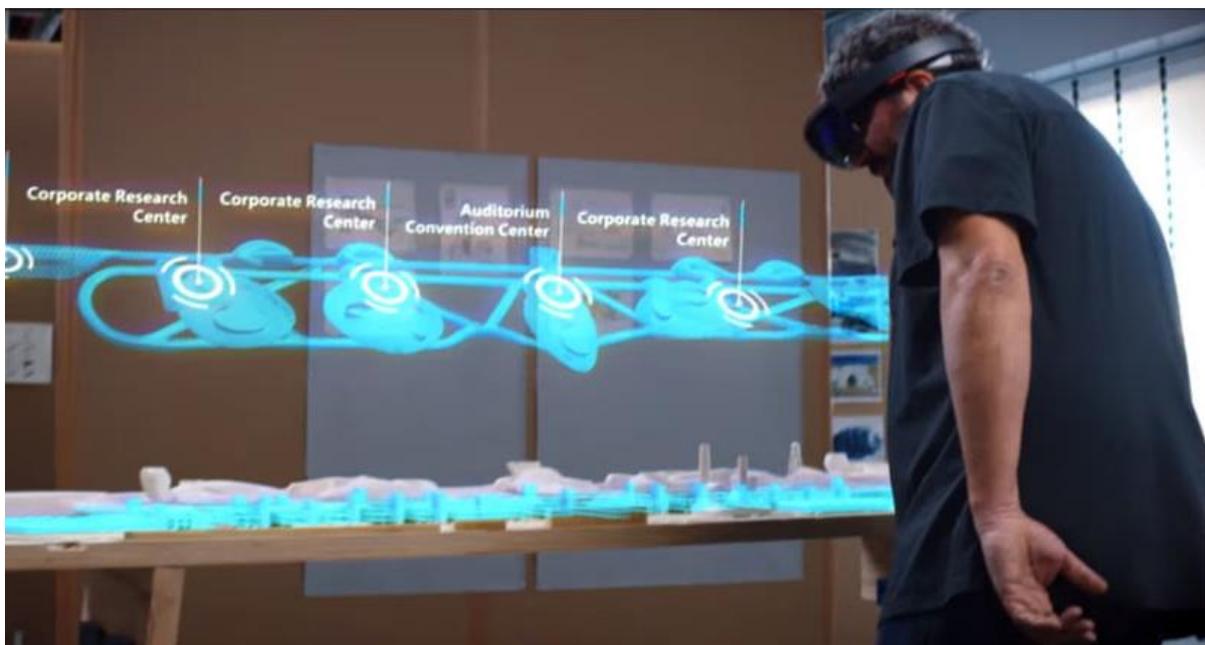
en faire perdre à l'utilisateur qui voudrait justement questionner ces règles métier, et ne rentrerait pas dans les cases préétablies par le logiciel – qu'il aura du mal à customiser pour mener à bien sa modélisation. À titre de comparaison, les composants dans un logiciel comme CATIA s'appellent UDF, pour *User Defined Feature* : dans CATIA un composant est donc ontologiquement customisable ; un utilisateur crée et définit, a priori, en amont, des composants personnalisés. En d'autres termes, les logiques comme celles de Revit se situent à l'exact opposé de celles des prémisses du BIM des années 90 : le logiciel impose un usage selon des règles métier supposées, au lieu d'être un terrain de réinvention de ces règles métier.

Malgré des initiatives d'automation, comme l'interface de programmation visuelle Dynamo (pâle copie de Grasshopper) ou la plateforme de *cloud computing* Forge, Revit est une infrastructure dans laquelle l'utilisateur a peu de pouvoir ou de marge de manœuvre de customisation. De plus, Revit ayant un monopole, l'échange de données ouvertes n'est plus exactement une priorité – et ce malgré le fait qu'Autodesk soit à l'origine de la création du format neutre de l'AEC, l'IFC. À ce sujet, une lettre ouverte (*A community of national and international design practices including: et al., 2020*) a été écrite par un groupement d'agences d'architecture anglaises, dont celle de Zaha Hadid – qui comme vu précédemment, est pionnière en matière de digitalisation dans l'AEC – demandant à Autodesk d'améliorer significativement Revit, sur plusieurs axes : le fonctionnement même de Revit (moteur et fonctionnalités), la transparence sur la gestion des données, l'instauration d'une relation client non prédatrice, mais aussi, et c'est une partie très importante de la lettre, une meilleure interopérabilité :

« Project design outcomes thrive on ever-increasing collaboration between different design disciplines requiring many forms of data interoperability between software platforms as well as compliance to international data standards. Greater collaboration on interoperability between software platforms and providers could lead to a larger market for all, given the industry is on the cusp of a 'design for manufacturing' revolution. [...] It is essential to effect better interoperability between Autodesk products as well as with the rest of the industry. [...] The practices involved in this initiative seek from Autodesk a transparent action plan that is customer centric, non-adversarial, innovative,

progressive, and deliverable that includes: [...] a commitment to continuously improving application, and industry interoperability (including IFC) as well as expanding geometry support and alignment to international data standards. »

Le manque d'interopérabilité BIM, partiellement lié à une situation de monopole, mais aussi à la fragmentation et faible digitalisation de l'AEC, commence donc à être reconnu dans la communauté BIM ; et ceci au moment où arrive dans l'AEC un nouveau lot de technologies, plus immersives voire pervasives, comme les réalités augmentées et virtuelles (Figure 11) l'intelligence artificielle (machine learning, deep learning) – symptômes du second tournant digital (Carpo, 2017), dont Mario Carpo prédit qu'elles vont modifier non plus la manière de construire, mais la manière de penser la conception et la construction. Un fossé immense apparaît ici, entre ces perspectives technologiques, et la réalité du métier au jour le jour, qui voit les acteurs dans l'incapacité d'échanger des sets basiques de données. Comment, dans ce contexte, s'attaquer au problème trivial, et pourtant crucial, de l'interopérabilité BIM ?



*Figure 11 Greg Lynn & HoloLens, 2016
Pionnier de l'exploration digitale, Greg Lynn a utilisé l'outil de virtualité augmentée Microsoft HoloLens pour le design du Pavillon US de la Biennale de Venise en 2016*

1.4 L'interopérabilité BIM

La notion d'interopérabilité recouvre un champ de connaissances très vaste. Elle implique de créer des synergies entre différentes structures – matérielles, digitales, humaines. On parle par exemple d'interopérabilité dans le domaine ferroviaire, entre différents types d'infrastructures ; dans le domaine informatique, entre différents programmes ; dans le domaine du management, entre différentes sociétés. L'interopérabilité relève de problématiques de standardisation à l'échelle mondiale (avec la standardisation par exemple de systèmes de mesures, de structures financières, ou de composants informatiques), et donc, de processus de normalisation, dont peuvent découler des aspects légaux. L'interopérabilité implique également des mécanismes de conversion et traduction, afin de rendre compatibles des structures originellement non alignées. Nous explorerons dans cette section les différents aspects de l'interopérabilité dans le BIM et dans l'AEC.

1.4.1 Caractérisation de l'interopérabilité BIM

Comme vu précédemment, le manque d'interopérabilité est un problème reconnu dans la communauté BIM, avec des fonctionnements en silo, et une communication digne d'une tour de Babel moderne (Belsky et al., 2014). Sur le terrain, les échanges de données se font de manière ad hoc, non normée, impliquent beaucoup de ressaisies de données, de copié-collé successifs écrasés au fil des itérations, à recommencer à chaque modification de projet. Typiquement, un acteur BIM n° 1 recevant le set de données BIM d'un acteur n° 2, d'un autre domaine que le sien, va copier-coller voire ressaisir les données de cet acteur, pour deux raisons : la 1^{ère}, c'est le frein technique : la donnée n° 1 n'est pas informatiquement compatible avec son logiciel métier n° 2. La 2^{de} est psychologique, organisationnelle : l'acteur n° 2 a besoin à la fois d'appriivoiser et de vérifier la donnée reçue : un post-traitement manuel, ou une remodelisation sera pour lui l'occasion de s'approprier et de mieux connaître cette donnée.

Paradoxalement, l'une des visées du BIM, via la fiabilisation des données et des flux de données, c'est justement l'amélioration des processus collaboratifs de l'industrie du bâtiment. L'image d'Épinal est la suivante : l'ensemble des acteurs d'un projet donné auraient accès, via sa maquette numérique BIM, à l'ensemble des données du projet en temps réel ; et c'est cet accès aux données qui faciliterait la collaboration entre les différents acteurs. Le problème est

qu'un simple *accès* aux données n'est pas suffisant ; il faut pouvoir les *interpréter* et les *utiliser* – et c'est un des aspects fondamentaux de la notion d'interopérabilité qui se pose ici.

En effet, l'interopérabilité est définie ainsi par l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) en 1990 (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1990) :

« [Interoperability is] the ability of two or more systems or components to exchange information and to *use* the information that has been exchanged. »

L'organisme ISO (*ISO/IEC 2382-1:1993, Information Technology - Vocabulary - Part 1: Fundamental Terms*, 1993) définit ainsi l'interopérabilité :

« [Interoperability is] the capability to communicate, execute programs, or transfer data among various functional units in a manner *that requires the user to have little or no knowledge of the unique characteristics of those units.* »

L'interopérabilité est donc effective quand elle permet à un utilisateur (1) d'*utiliser* la donnée d'un autre utilisateur (2) *sans en avoir une connaissance a priori*. Traduits en termes métiers, et dans une situation pratique : une situation d'interopérabilité serait celle où un ingénieur structure pourrait utiliser les données BIM produites par un architecte, sans avoir de connaissance préalable de la manière dont elles sont structurées.

D'après l'EIF (*European Interoperability Framework*)⁴ l'interopérabilité peut-être décomposée en trois niveaux : un niveau technique (données), un niveau sémantique (information) et un niveau organisationnel (processus, personnes, organisation, dispositions contractuelles) – cette décomposition est reprise par Paviot (Paviot et al., 2011) au sujet de l'interopérabilité dans le PLM. Une autre classification est proposée par Grilo (Grilo & Jardim-

⁴ European Interoperability Framework - White Paper-, 2004, http://www.urenio.org/e-innovation/stratinc/files/library/ict/15.ICT_standards.pdf

Goncalves, 2010), qui décompose l'interopérabilité BIM en deux niveaux : un niveau technologique et un niveau métier (*business*). En mettant en regard ces deux schémas, on peut supposer que le niveau sémantique serait une couche mixte technologique et métier (Figure 12). Les interactions métier sont divisées par Grilo en cinq niveaux pour le BIM, du plus simple au plus imbriqué : communication, coordination, coopération, collaboration, et « channel » (flux de données).

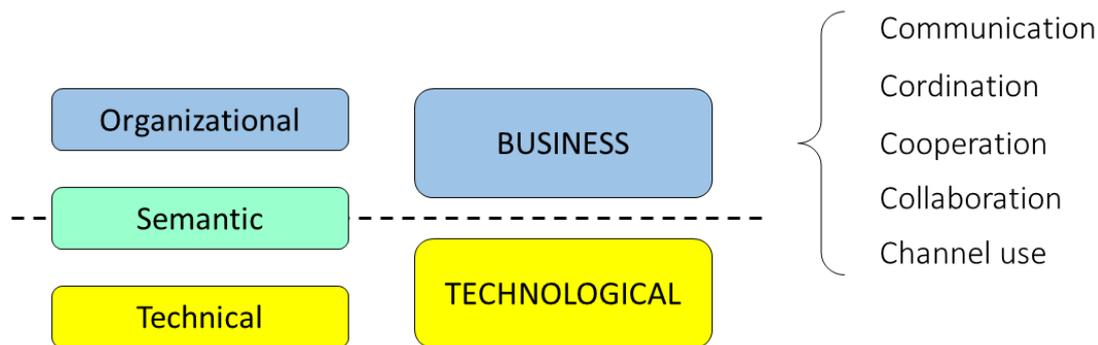


Figure 12 Les différents niveaux d'interopérabilité
EIF 2004 (à gauche), Grilo 2010 (à droite)

Attardons-nous sur ce terme de *métier* – défini ainsi par Paviot dans sa thèse sur l'interopérabilité dans le PLM (Paviot, 2010) :

« Le terme de *métier* est régulièrement utilisé dans le domaine industriel, souvent d'ailleurs pour désigner l'utilisateur d'une solution informatique, en opposition aux personnes chargées de la déployer : on parlera alors d'*hommes du métier* ou de *besoins métier*. [...] Le *métier* regroupe l'ensemble des savoirs et savoir-faire mobilisés par un opérateur pour mener à bien les activités relatives à un domaine identifié. »

La couche d'interopérabilité métier BIM est donc afférente à l'ensemble des *savoirs et savoir-faire* mobilisés par les acteurs de l'AEC pour mener leurs projets de construction ; ces savoirs sont d'ordre technique, communicationnel, organisationnel, contractuel, économique. L'interopérabilité métier englobe tout le champ de connaissances et de pratiques de l'AEC, et n'est donc pas assimilable au seul aspect *humain* (communicationnel) – et ce d'autant plus que ces *savoirs* dit *métier* sont de plus en plus encapsulés digitalement dans des programmes

informatiques. En revanche, plus trivialement, comme vue précédemment, une maquette BIM a pour vocation d'être interprétée à la fois par les fonctions cognitives d'un *humain* et par un *ordinateur*. Autour d'une maquette BIM, trois modes d'interactions coexistent donc : entre humains, entre humain et ordinateur, et entre ordinateurs (Figure 13).

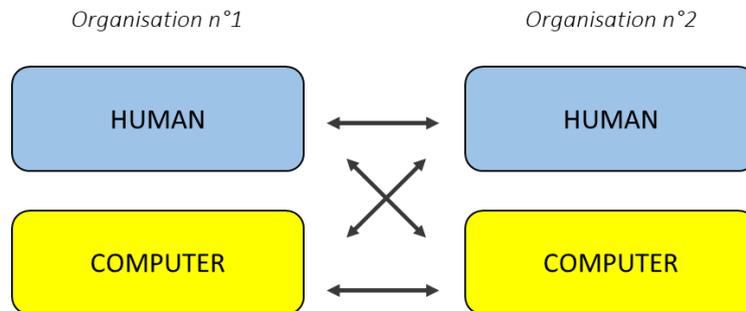


Figure 13 Collaboration hybride : cognitive et computationnelle

On notera que les mots *interopérabilité* (inter-opérer) et *collaboration* (*co-laborare* en latin, soit co-travailler) ont des significations étymologiques très proches – de même que les mots *interaction* et *coopération*. Ces quatre mots désignent peu ou prou une action partagée entre différentes entités. Il semble que, dans le monde professionnel, le mot *interopérabilité* est souvent utilisé pour désigner l'interopérabilité technologique, tandis que le mot *collaboration* désigne au sens large l'interopérabilité métier. Pour plus de simplicité, nous reprendrons ici ces terminologies usuelles.

Selon un rapport sur la valeur commerciale du BIM sorti en 2012, une « meilleure interopérabilité » (McGraw - Hill, 2012) est identifiée comme le 2nd besoin le plus important dans le champ du BIM. Dans ce même rapport, 79 % des utilisateurs BIM identifient « l'amélioration de l'interopérabilité entre plusieurs logiciels » comme un facteur déterminant pour améliorer les bénéfices du BIM. Le manque d'interopérabilité BIM serait à l'origine d'un fardeau économique (Hu et al., 2016), et son coût a été estimé à 15,8 milliards de dollars en 2004 par le US National Institute of Standards and Technologies (NIST) (Gallaher et al., 2004), là où en comparaison, il ne coûterait qu'un milliard par an à l'industrie automobile (Grilo & Jardim-Goncalves, 2010). Sans surprise, l'interopérabilité a été identifiée comme un sujet de recherche très prisé (Santos et al., 2017), avec le plus grand nombre de papiers publiés dans le domaine du BIM entre 2005 et 2015.

À ce jour, le manque d'interopérabilité BIM a donc été identifié comme un obstacle depuis plus de 15 ans – à la fois dans le monde professionnel et académique. Cet obstacle affecte directement l'un des aspects les plus importants du BIM : la collaboration. En effet, si un acteur BIM n'est pas en mesure d'importer ou d'exporter des informations robustes et fiables d'une maquette BIM donnée, il ne peut pas baser sa collaboration sur cette maquette. Comment ces problèmes sont-ils, en 2020, adressés dans la communauté BIM ?

1.4.2 Solutions existantes aux problèmes d'interopérabilité technologiques

Le problème de l'interopérabilité technologique est globalement adressé par deux leviers dans l'AEC : un format d'échange ouvert et neutre et les plateformes collaboratives.

Le format IFC (ISO 16739), maintenu par buildingSmart International, a été créé en 1997 et est devenu la norme de facto dans l'industrie AEC pour l'échange de données. La diversité des métiers de cette industrie entraîne un grand nombre de concepts IFC (environ 800, un des plus grands modèles de données EXPRESS (C. Zhang et al., 2015)), et cette richesse a un prix : elle crée des redondances. Il existe donc différentes façons de décrire une information dans le schéma IFC, ce qui peut entraîner une ambiguïté dans la modélisation des données et une perte de données pendant les échanges. En conséquence, le format IFC n'est pas assez fiable pour les acteurs au quotidien, et il est souvent délaissé en pratique au profit de formats propriétaires. Deux autres standards ont pourtant été instaurés par buildingSmart pour consolider les échanges IFC : les IDM (*Information Delivery Manual*), qui sont des cahiers des charges pour l'élaboration de MVD (*Model View Definition*). Une MVD « définit un sous-ensemble du schéma IFC, nécessaire pour satisfaire une ou plusieurs exigences d'échange de l'industrie AEC » (*Model View Definition (MVD) - An Introduction*, n.d.). Une MVD peut être générique (comme la vue *Coordination View*, qui vise à être appréhendée par tous les acteurs de l'AEC) ou spécifique à un métier précis (comme la vue *Structural Analysis*, qui cible le domaine structurel). Le développement de MVD est la méthode proposée par buildingSmart pour améliorer les échanges intermétier dans le BIM via l'IFC.

Les plateformes BIM collaboratives, ou CDE (*Common Data Environment*) sont des espaces de stockage sur le web permettant aux utilisateurs de partager des données BIM entre différentes équipes au sein d'un projet. Outre les fonctionnalités de stockage, des outils collaboratifs

supplémentaires sont généralement disponibles, tels que la révision des fichiers, le suivi de modifications, l'annotation des maquettes et la gestion des droits d'accès pour les différents membres d'un projet en fonction de leur rôle et de leur statut. En effet, les acteurs BIM d'un métier donné sont à la fois créateurs de données BIM pour leur métier, et utilisateurs de données BIM des autres métiers ; ils sont respectivement propriétaires et consommateurs de données, et des droits d'accès très stricts sont essentiels pour délimiter les régimes de propriété liés aux données – et les questions de propriété intellectuelles afférentes. Malheureusement, ces plateformes ne sont généralement pas en accès libre et utilisent des formats propriétaires ; ce qui peut sembler aller à l'encontre du but initial de ces technologies, censées soutenir une approche collaborative et intégrative, car elle peut imposer un monopole aux fournisseurs de logiciel (Petri et al., 2017) – ce qui tendrait paradoxalement à renforcer les problèmes d'interopérabilité.

1.4.3 Solutions existantes aux problèmes d'interopérabilité métier

Si l'industrie AEC est, comme mentionné précédemment, très fragmentée et hétérogène, plusieurs mouvements sont à l'œuvre pour résoudre les problèmes d'interopérabilité métier.

Dans un article paru en 2020, au sein d'un volume de la revue *Architectural Design* sur la disruption dans l'industrie AEC, Dennis Sheldon (Gehry et al., 2020) revient sur la vision originale des premières maquettes BIM de Frank Gehry, censées servir la *livraison* d'un projet, depuis la conception jusqu'à la construction ; censées faire converger les différents acteurs et leurs intérêts, et fluidifier la collaboration, via la mise en place d'un *master-model*, celui de l'architecte, qui prime, et fait foi – consolidant au passage la position d'auteur et de décideur de l'architecte, statut durement acquis depuis la Renaissance (Carpo, 2017). Mais Sheldon relève que finalement, au fil des ans, au lieu de bouleverser l'écosystème du bâtiment, le BIM classique s'est peu à peu adapté à la fragmentation de l'industrie :

« BIM of course continues to expand as an approach to delivering projects, although the promise of a fully integrated process driven by design into production remains to be broadly achieved in the industry. In many ways, the fragmentation of the industry disconnects and power struggles have been translated from traditional practices to the new tools. »

Dans le même numéro de cette revue, Greg Lynn (Lynn, 2020) enjoint les architectes à devenir plus « entrepreneurs », et notamment à cesser de considérer que leur travail s'arrête à la conception ; et Phil Bernstein (Bernstein, 2020) pousse ses étudiants en architecture à s'intéresser aux nouveaux écosystèmes de l'AEC – et à comment le digital peut les bouleverser. Il déplore lui aussi que le BIM n'ait pas créé de véritable disruption :

« While CAD (and, to a lesser extent, scripting) brought us some formal exuberance, and BIM the tantalising prospect of data-driven design, contractors viewing a BIM-generated PDF on their iPads while on construction sites is much more a convenience than a disruption. That the drawing they are using is relatively free of coordination errors seems like a small-bore victory. »

Le BIM, au lieu de bouleverser les fastidieux modes de collaboration actuels, vient tenter de se conformer à ces écosystèmes traditionnels, de s'y glisser – et par là même, échoue à améliorer toute collaboration ou workflow ; tout se passe comme si le problème avait été pris à l'envers. Une solution serait de bouleverser les business modèles actuels ; c'est ce que tentent de nouveaux acteurs, comme Lendlease, Laing O' Rourke ou Katterra (Sénémaud, 2020) – et il semble en effet qu'une grande vague disruptive soit à venir (McKinsey, 2020). Katterra⁵, une start-up née en 2015, à renforts de levées de fond spectaculaires, développe son propre logiciel de gestion de projet, et s'organise selon un modèle intégré verticalement, très fortement digitalisé, depuis la conception (architecture et ingénierie) à la construction (de la production de matériaux à l'assemblage, avec toute la gestion de la chaîne d'approvisionnement). Ce nouveau profil d'entreprise AEC s'inscrit, avec un saut d'échelle notable, dans la lignée d'initiatives amorcées dans les années 2000, avec des acteurs comme SHoP Architects ou Design to Production, qui revendiquent une vision holistique du projet, et dynamitent les barrières séquentielles entre la conception et la fabrication – vision directement héritée des pionniers digitaux des années 90 évoqués précédemment.

⁵ <https://katterra.com/>

Ces nouveaux types d'entreprises AEC relèvent de modes de gestion intégrés, où un projet est piloté de manière globale et digitale. La question de l'intégration est clef pour comprendre ces disruptions à venir – d'autant plus qu'elle se situe aux antipodes des modes de fonctionnement traditionnels de l'industrie du bâtiment. Elle est intimement liée à l'approche dite d'*ingénierie concourante* ou *simultanée*, qui consiste à intégrer en amont d'un projet tous les acteurs, dès le départ, pour atteindre collectivement un objectif clairement explicité. Cela implique d'abandonner la gestion de projet séquentielle, et de travailler en temps réel, par itérations à granularité variables – et souvent, via des processus de simulation d'hypothèses de design et d'optimisation multiobjectifs et multi-métiers.

La question générale de l'interopérabilité BIM se pose donc selon un double angle, technologique, et métier, dans le contexte d'une industrie archaïque au bord d'une potentielle vague disruptive.

1.5 Conclusion

Le BIM, dont les premières expérimentations digitales eurent lieu dans les années 90, avec le balbutiement de ce qui deviendra deux décennies plus tard la *digital mass customisation*, a atteint une phase stationnaire de développement dans les années 2010. Cette phase peut être perçue comme une première forme de maturité pour cette technologie, impliquant une stabilisation des pratiques, des consensus entre les acteurs, mais aussi un plus faible niveau d'expérimentations, un monopole logiciel, un problème reconnu d'interopérabilité, et un faible niveau collaboratif.

Ce manque d'interopérabilité est perçu par les acteurs de l'AEC comme un frein à la pratique du BIM – et coûte très cher à l'industrie AEC. L'interopérabilité implique tant des questions technologiques de modèles de données ou de compatibilité informatique, que des questions organisationnelles de modèles d'affaires, de gestion de projet, de compétences humaines. Des solutions technologiques, existent – avec par exemple un format neutre et ouvert, l'IFC, ou l'utilisation de plateformes dites collaboratives – mais semblent encore insuffisantes et se heurtent à la fragmentation structurelle de l'industrie du bâtiment.

Dans le chapitre suivant, nous montrerons comment cette question d'interopérabilité et de collaboration BIM est abordée dans la littérature scientifique, et analyserons les propositions candidates à la résolution de ce problème.

Chapitre 2. État de l’art sur l’interopérabilité et la collaboration BIM

Le BIM étant un vaste champ de recherche académique, un grand nombre de revues de littérature scientifique traitent de ce sujet, et évoquent de près ou de loin la problématique de l'interopérabilité et de la collaboration. Certaines d'entre elles abordent la question de l'interopérabilité sous l'angle d'une discipline particulière, avec par exemple les échanges de données autour des maquettes BIM de béton préfabriqué (Belsky et al., 2014), ou l'intégration BIM et SIG (Systèmes d'Information Géographique) (Wang et al., 2019). D'autres revues abordent la question dans le contexte du développement durable, et évoquent les relations entre les maquettes BIM et les outils de simulation énergétique (Chong et al., 2017; Sanhudo et al., 2018; Andriamamonjy et al., 2019; Kamel & Memari, 2019) ; d'autres encore soulèvent le problème de l'interopérabilité entre le BIM et les systèmes d'exploitation et maintenance des bâtiments (Ilter & Ergen, 2015; Pärn et al., 2017; Wong et al., 2018; Matarneh et al., 2019; Gao & Pishdad-Bozorgi, 2019). Certaines revues de littérature adoptent un angle technologique et se concentrent sur des outils d'interopérabilité spécifiques comme l'IFC (Laakso, 2012), ou les synergies entre la recherche académique et la normalisation BIM (Laakso & Nyman, 2016). D'autres examinent l'échange de données BIM via les technologies du web sémantique dans l'AEC (Pauwels et al., 2017), ou abordent l'intégration du BIM et de l'IoT (Tang et al., 2019).

Au contraire de ces revues de littérature très spécifiques, certaines ont une approche plus holistique du sujet de l'interopérabilité BIM. Les liens entre l'interopérabilité technologique et l'interopérabilité métier sont par exemple abordés dans le contexte de l'utilisation du BIM par les PME (Abuelmaatti, 2014), et certains facteurs-clés de management, favorables à la collaboration numérique, sont mis en avant. Une étude analyse un échantillon de protocoles BIM développés pour des gros projets et des grands comptes, et révèle que les modalités d'interopérabilité et les modes de collaboration sont des sujets cruciaux, mentionnés dans 100% des protocoles étudiés (Sacks et al., 2016). Une autre étude (Hassan Ibrahim, 2013) passe en revue les différentes façons dont la collaboration numérique BIM est mise en œuvre sur des

grands projets : celle-ci n'est jamais réalisée de manière intégrée, si ce n'est, et très rarement seulement, via une intégration partielle, limitée à une phase ou à un sujet spécifique.

Dans une analyse bibliométrique des articles de recherche sur le BIM publiés entre 2005 et 2015 (Santos et al., 2017), une section sur « l'environnement collaboratif et l'interopérabilité » met en évidence un intérêt croissant pour ce sujet. Elle est divisée en quatre sous-catégories : « interopérabilité et IFC », « BIM sémantique et ontologie », « environnement collaboratif », « gestion des connaissances et de l'information ». Dans une cartographie bibliométrique de la connaissance BIM (X. Li et al., 2017), l'interopérabilité est mentionnée comme l'un des plus importants sujets de recherche BIM, et « l'interopérabilité universelle » est identifiée comme un sujet clé des années 2012 - 2013. De même, dans une revue scientométrique sur la recherche BIM (Zhao, 2017), un record d'occurrence du mot « interopérabilité » est observé entre 2010 et 2012. Dans une revue sur les facteurs critiques de succès du BIM (Antwi-Afari et al., 2018) la « collaboration entre les acteurs de l'AEC » et « l'amélioration de l'échange d'informations et de la gestion des connaissances », c'est-à-dire respectivement l'interopérabilité métier et technologique, sont identifiées comme deux des cinq principales métriques pour mesurer l'efficacité d'une implémentation BIM. Similairement, la collaboration et l'interopérabilité sont considérées comme des sujets clés pour l'industrie de la construction et du transport dans une méta-analyse de 2018 (Abdal Noor & Yi, 2018).

Si, à ce jour, aucune revue de la littérature ne se concentre exclusivement sur l'interopérabilité et la collaboration BIM, ce sujet est régulièrement évoqué dans les états de l'art généraux sur le BIM. Nous mènerons ainsi dans ce chapitre un état de l'art sur ce sujet, que nous circonscrirons aux phases de conception et de construction d'un bâtiment ; c'est-à-dire, les phases où les données BIM sont les plus intensément créées, manipulées, utilisées (Figure 14).

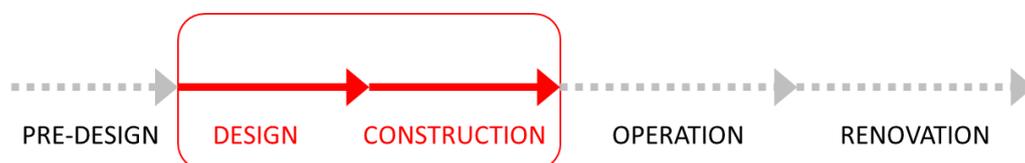


Figure 14 Le découpage en phase d'un projet de bâtiment

Cet état de l'art se fera en trois volets, suivant trois périodes. Le 1^{er} volet couvre la période de 2013-2018. Comme indiqué précédemment, 2013 est un moment où la problématique de

l'interopérabilité connaît son 1^{er} pic dans la recherche universitaire (X. Li et al., 2017; Santos et al., 2017; Zhao, 2017), coïncidant avec un plateau de démocratisation du BIM et l'apparition des premières plateformes dite de collaboration BIM ; et 2018 correspond à la date de démarrage de la présente thèse. Le 2^{ème} volet couvre une période s'étendant de la fin des années 80 jusqu'aux années 2000 – date d'apparition de l'acronyme BIM dans l'industrie AEC. En effet, après la plongée dans la littérature scientifique récente, un retour en arrière aux origines du BIM nous a semblé nécessaire, afin d'investiguer notre problématique sous un angle historique. Le 3^{ème} volet couvre une période correspondant à l'élaboration de cette thèse de doctorat, soit entre 2019 et 2021 ; il s'agira d'une actualisation de l'état de l'art original. Ce découpage de l'état de l'art en trois volets (original, anachronique, actualisé) n'est pas classique, mais il suit un processus de réflexion de trois ans, qu'il nous a semblé important de restituer fidèlement.

2.1 État de l'art original, 2013-2018

Dans cette section, nous analyserons les différentes façons dont la collaboration et l'interopérabilité BIM sont abordées dans la littérature scientifique entre 2013 et 2018, afin d'identifier les tendances, les lacunes et les perspectives de recherche liées à cette problématique (Sattler, Lamouri, Pellerin, Deneux, & Maigne, 2019). Nous examinerons comment la question de l'interopérabilité BIM dans un contexte de collaboration est traitée dans la recherche : comment les acteurs de l'AEC collaborent-ils aujourd'hui autour des maquettes BIM ? Comment s'échangent-ils des données BIM ? Quels sont les problèmes d'interopérabilité spécifiques qu'ils rencontrent ? Comment les résolvent-ils ?

2.1.1 Méthodologie, corpus, cadre d'analyse

La constitution du corpus commence classiquement avec une requête en anglais dans une base de données universitaire – SCOPUS. Afin d'étudier le lien entre l'interopérabilité et la collaboration dans le BIM, le sujet a été circonscrit par deux types de mots-clés : le 1^{er} ensemble est relatif à l'interopérabilité technologique - *conversion, IFC, MVD* - et le 2nd est lié à la collaboration humaine, ou l'interopérabilité métier (*exchange, cooperation, coordination, collaboration, interaction*); enfin certains mots se réfèrent à la fois à l'aspect métier et technologique, comme *intégration* et bien sûr, *interopérabilité*. La recherche a été limitée à

certaines domaines de connaissance (ingénierie et informatique), à certaines dates (2013 à 2018 inclus, pour les raisons mentionnées précédemment) et à la langue (anglaise, puisque la recherche dans ce domaine est largement internationale). La chaîne de recherche (*research string*) obtenue est la suivante :

TITLE-ABS-KEY (BIM AND (interoperability OR interoperable) AND (conversion OR exchange OR translation OR MVD OR ifc OR integration OR integrated OR collaboration OR collaborative OR cooperative OR cooperation OR coordination OR interaction)) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR,2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,2015) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,2014) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,2013)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE,"ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE,"re")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE,"English"))

La Figure 15 résume le processus de constitution du corpus. La chaîne de recherche a donné une collection de 124 articles ; sur cette base, après analyse de l’abstract, deux types d’exclusions ont été mises en place : thématiques et méthodologiques.



Figure 15 Constitution du corpus sur l’interopérabilité et la collaboration entre 2013 et 2018

Exclusions thématiques : comme indiqué dans le Tableau 1, 31 articles ont été exclus du corpus quand ils remplissaient une de ces deux conditions ; d’une part, si l’article sortait du

cadre pur de l'interopérabilité, et traitait cette question de trop loin, ou de manière trop générale ; d'autre part, si l'article abordait la question de l'interopérabilité et de la collaboration à des phases trop en amont ou trop en aval de la conception et de la construction – comme les phases dites de *pre-design*, avant le démarrage de la conception, avec les problématiques d'interopérabilité entre le BIM et les SIG, ou à la toute fin de la construction, la phase opérationnelle, avec les problématiques d'interopérabilité entre maquettes BIM et logiciels d'exploitation et maintenance du bâtiment (ou les *Facilities Management*, FM)

Tableau 1 Exclusions thématiques

| CAUSE DE L'EXCLUSION | Nombre |
|---|---------------|
| Phase pre-design (BIM & SIG) | 10 |
| Phase opérationnelle (exploitation, FM) | 17 |
| Hors sujet industrie AEC | 2 |
| Hors sujet interopérabilité | 2 |
| Total | 31 |

Exclusions méthodologiques : Seuls les articles applicatifs ont été conservés sur les 93 articles restants : 13 articles états de l'art (corpus de connaissance, revue de littérature, revue de cas d'usage) ont donc été exclus du corpus (Tableau 2), d'autant plus que ceux-ci avaient déjà été étudiés au préalable pour bâtir ce corpus de recherche.

Tableau 2 Exclusions méthodologiques

| TYPE D'ARTICLE | Nombre |
|---|---------------|
| Article | 80 |
| Processus | 8 |
| Processus + Application | 68 |
| Analyse et test d'outils | 4 |
| Reuves | 13 |
| Corpus de connaissance ("Body of Knowledge", BOK) | 2 |
| Revue de littérature | 6 |
| Revue de cas d'usage | 5 |
| Total | 93 |

Le corpus recense ainsi un petit nombre d'articles : 80 au total, qui ont été soigneusement étudiés et décortiqués. La Figure 16 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre l'augmentation des publications sur l'interopérabilité et la collaboration BIM entre 2013 et 2018, confirmant l'intérêt croissant de la recherche pour ce sujet.

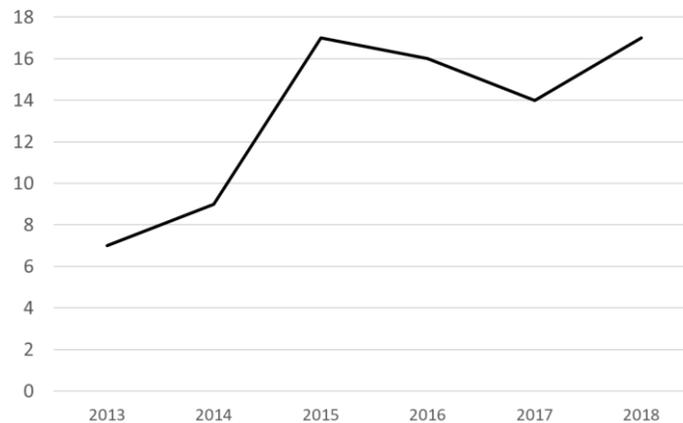


Figure 16 Augmentation des publications sur l'interopérabilité et la collaboration entre 2013 et 2018

Le corpus a ensuite été analysé via trois cadres d'analyse : trois catégorisations ont été mises en place afin d'appréhender cette littérature scientifique. Ces catégories sont globalement mutuellement exclusives, mais lorsqu'un article pouvait être attribué à plusieurs catégories, la catégorie la plus saillante a été attribuée. Le résultat de catégorisation est soigneusement détaillé dans le tableau en annexe.

Les trois cadres analytiques impliquent trois questions basiques, qui pourraient être appliquées à tout problème :

- (1) **Dans quel contexte** le problème est abordé ? Dans notre cas, dans quel contexte AEC particulier le défi de la collaboration et de l'interopérabilité BIM est-il soulevé ?
- (2) **Quel est le problème, comment est-il caractérisé** ? Dans notre cas, pour quels objectifs de collaboration les acteurs BIM ont-ils besoin d'interopérabilité ?
- (3) **Comment le problème est-il résolu** ? Dans notre cas, quel est l'éventail des solutions proposées dans la littérature scientifique pour améliorer l'interopérabilité et la collaboration BIM ?

2.1.2 Cadre d'analyse n°1 : Les différents contextes AEC

Chacun des articles du corpus aborde le défi de l'interopérabilité et de la collaboration dans le cadre d'un contexte spécifique, c'est-à-dire : un type de bâtiment, une phase précise du cycle conception-construction, ou un métier particulier ; parfois, ce contexte est générique, et la question est adressée au niveau de l'industrie AEC dans son ensemble. D'un point de vue méthodologique, il convient de préciser que nous avons attribué ces catégories de contexte de deux manières : directement (si l'article traite explicitement d'un contexte AEC en particulier) ou indirectement (si l'article aborde la problématique au niveau générique de l'AEC, mais prend un contexte spécifique comme étude de cas).

Les premières conclusions générales de cette analyse sont les suivantes : (1) le défi de la collaboration et de l'interopérabilité BIM est soulevé de manière inégale suivant le contexte AEC – et cette section en détaille la répartition (2) près de 20% des articles ne s'appuient pas sur un contexte précis et visent à résoudre le défi au niveau générique de l'industrie AEC.

Tableau 3 Catégorisation suivant le contexte AEC

| CONTEXTE AEC | Number | % |
|---|-----------|-------------|
| 1. Analyses énergétiques | 21 | 26% |
| 2. Toute discipline, bâtiment classique | 18 | 23% |
| 3. Structure | 9 | 11% |
| 4. Structure en béton pré-fabriquée | 9 | 11% |
| 5. Optimisation Multi-critère | 7 | 9% |
| 6. Gestion de construction et de chantier | 6 | 8% |
| 7. Infrastructure de transports | 5 | 6% |
| 8. HBIM (<i>Heritage BIM</i>) | 2 | 3% |
| 9. Building code & regulation | 1 | 1% |
| 11. Bâtiments modulaires | 1 | 1% |
| 10. Bâtiments à géométrie complexe | 1 | 1% |
| Total général | 80 | 100% |

2.1.2.1 Catégories métier fortement représentées

2.1.2.1.1 Analyses énergétiques

La première catégorie saillante est celle du domaine de la performance énergétique : 21 articles sont concernés (26%). Il est intéressant de noter qu'une des perspectives de recherche d'un état de l'art de 2013 (Hassan Ibrahim, 2013) portait sur la nécessité de « l'utilisation des technologies numériques intégrées pour la conception et la construction écologique » ; il semble que cette recommandation ait eu un écho. Les articles abordent la question de l'évaluation de la performance énergétique via l'utilisation de données BIM (Arayici et al., 2018; Cemesova et al., 2015, 2015; J. Choi et al., 2016, 2018; M. Choi et al., 2018; El Asmi et al., 2015; J. B. Kim et al., 2015; Ladenhauf et al., 2016; Nizam et al., 2018; Shadram et al., 2016; Shadram & Mukkavaara, 2018; Yang et al., 2018; Zhong et al., 2018), de l'attribution d'un score de qualité environnemental à un bâtiment sur la base d'une maquette BIM (Alwan et al., 2015; Raffee et al., 2016), considérant aussi bien l'énergie émise lors de la phase de construction que lors de la phase opérationnelle du bâtiment (Shadram & Mukkavaara, 2018). La question de la modélisation énergétique est soulevée (Guzmán Garcia & Zhu, 2015) et un cousin spécialisé du BIM voit le jour : le BEM, pour *Building Energy Modeling* (Y.-J. Kim, 2015).

La raison évidente de cette forte représentation du sujet énergétique est l'actualité brûlante du sujet environnemental : les simulations énergétiques sont requises de plus en plus tôt dans les phases de construction. Une autre raison peut toutefois être invoquée : l'analyse énergétique d'un bâtiment nécessite de considérer des ensembles de données très divers en termes de granularité (puisque'il faut traiter des objets abstraits et génériques comme les zones, les enveloppes, et des objets concrets et détaillés comme des terminaux électriques), et en termes de discipline (données météorologiques, données SIG, données MEP) ; une interopérabilité poussée semble donc nécessaire pour connecter ces ensembles de données très hétérogènes.

2.1.2.1.2 Structure et préfabrication

La deuxième catégorie saillante, avec 18 articles (22%) est celle du domaine structurel. Dans cette catégorie, la moitié des articles portent sur la discipline structurelle globale, et interrogent l'interopérabilité des données entre les maquettes BIM architecturales et structurelles (Hu et al., 2016; Muller et al., 2017; Shin, 2017; Solnosky & Hill, 2013), la transformation automatique

de maquettes BIM en modèles de calcul structurels (Liu et al., 2016; Ramaji & Memari, 2016, 2018b), et la surveillance de la performance ou santé structurelle d'un bâtiment (SHM, *Structural Health Monitoring*) (Rio et al., 2013; Theiler & Smarsly, 2018). L'autre moitié concerne les structures en béton préfabriqué (Afsari, Eastman, & Castro-Lacouture, 2017; Belsky et al., 2014, 2016; Costa & Madrazo, 2015; M.-K. Kim et al., 2015; Y.-C. Lee, Eastman, & Solihin, 2016; Y.-C. Lee, Eastman, Solihin, et al., 2016; Y.-C. Lee et al., 2018; Venugopal et al., 2015).

Une explication à la prédominance du sujet de la préfabrication béton dans les études d'interopérabilité BIM est la complexité des modélisations BIM pour cette discipline : elle implique de traiter à la fois des éléments discrets et des matériaux continus, différents niveaux de granularité, diverses règles d'assemblage (adjacence, chevauchement, etc.) et de très faibles tolérances. La conception d'une maquette BIM pour la préfabrication étant un défi en soi, l'échange de telles données afférentes l'est tout autant. L'US Precast Concrete Institute (PCI) et le National BIM Standards (NBIMS) ont lancé un grand nombre de recherches pour normaliser l'approche de l'interopérabilité BIM dans ce domaine très enclin à l'automatisation.

2.1.2.2 Catégories métier émergentes

2.1.2.2.1 Multi-criteria performance assessment

Sept articles (9%) traitent de l'interopérabilité dans un contexte d'optimisation multicritère, (Chardon et al., 2016; Ciribini et al., 2016; K. P. Kim & Park, 2018; Woo & Menassa, 2014; Zanchetta et al., 2017), abordant de manière prospective les défis la conception multidisciplinaire (Díaz et al., 2017; B. Li et al., 2017). Ces articles marquent l'émergence de l'ingénierie concourante, qui, via l'intégration simultanée de contraintes et règles métier très tôt dans la phase de conception (plus tôt que dans une temporalité traditionnelle), vise à évaluer en amont les performances d'un bâtiment, et à optimiser son processus de conception et de construction. Ce domaine émergent implique la combinaison d'ensembles de données très hétérogènes en termes de sémantique, de niveau de développement (LOD) et de granularité, d'où la nécessité d'instaurer de solides systèmes d'interopérabilité.

2.1.2.2.2 Construction, gestion de chantier

Cette catégorie comprend six articles (8%) traitant du contrôle qualité sur un chantier (Hernández et al., 2018; Xu et al., 2018), de la gestion de la chaîne d'approvisionnement (Čuš-Babič et al., 2014), et des flux de données liés aux objets connectés, aux technologies émergentes comme l'IoT, la réalité augmentée et virtuelle (Dave et al., 2016; Patti et al., 2017; Zekavat et al., 2014). Comme dans l'ingénierie concourante, l'utilisation du BIM pour suivre les activités de construction implique la capacité de connecter des ensembles de données très divers, avec des sémantiques, des LOD et des granularités différentes, et exige donc un très fort niveau d'interopérabilité.

2.1.2.2.3 Infrastructures de transport

Cette catégorie comprend cinq articles (6%), sur l'interopérabilité BIM pour des projets de ponts (Karaman et al., 2013; Petri et al., 2017), de tunnels (Hartmann et al., 2017), et de terminaux d'aéroport (J. Zhang et al., 2017). L'utilisation du BIM pour ce type de projet est une tendance croissante (Costin et al., 2018), et implique de traiter des volumes de données importants. Le volume des échanges de données nécessaires et leurs différents LOD justifient le besoin de processus de collaboration robustes.

2.1.2.3 Catégories métier sous-représentées

Certains contextes AEC sont peu représentés dans le corpus analysé, comme la construction modulaire (Ramaji & Memari, 2018a), ou le HBIM (*Heritage BIM*, soit le BIM pour la rénovation de bâtiments historiques), avec deux articles (Brumana et al., 2018; Quattrini et al., 2017). Néanmoins, le HBIM pourrait être considéré comme un laboratoire pour BIM, car il doit faire face à un défi inversé : la maquette BIM d'un projet traditionnel évolue de la conception à la construction par une augmentation de LOD, alors qu'une maquette HBIM commence d'emblée avec un LOD élevé et doit évoluer vers une simplification de modèle, afin de rendre les données utilisables. De nouveaux concepts ont vu le jour avec le domaine du HBIM, tels que le niveau de géométrie (LOG, *Level of Geometry*), le niveau de précision (LOA, *Level of Accuracy*), le niveau d'information (LOI, *Level of Information*). Cela ouvre la voie à la transformation et simplification automatisée de modèles, qui sont nécessaires dans tous les

projets pour la communication multidisciplinaire, et pas seulement dans le domaine de la rénovation historique ; le BIM pourrait beaucoup apprendre du HBIM.

Par ailleurs, un seul article du corpus traite de l'interopérabilité BIM dans le cadre de contrôles de conformité vis-à-vis des normes de construction (Malsane et al., 2015) : la question de la vérification de réglementation dans les maquettes BIM en est encore à ses balbutiements. Pourtant, les maquettes BIM sont suffisamment riches en données pour accueillir des processus de *rule-checking* (vérification de règles). De même, un seul article traite de l'interopérabilité pour les bâtiments à géométrie complexe (Ryu et al., 2016). Cela pourrait s'expliquer par la faible proportion de ce type de bâtiments dans l'AEC, mais reste surprenant. En effet, comme vu au chapitre 1, la conception de bâtiments aux géométries non orthogonales, non standards, est une tendance émergente dans l'AEC, rendue possible par des technologies telles que le scan 3D, la fabrication additive ou la robotique. Or la plupart des logiciels de modélisation BIM courants ne prennent pas en charge ce type de géométrie, à l'instar de Revit, dont le moteur géométrique est très limité (à titre d'exemple, toute géométrie basée sur des splines dans Revit a des comportements imprédictibles). En résulte un fort besoin de passerelles entre des outils NURBS (comme Rhino) et les outils BIM classiques.

Si le sujet de l'interopérabilité et de la collaboration est abordé à travers divers métiers et disciplines de l'industrie AEC, l'accent est mis sur le domaine de l'évaluation énergétique et des domaines structurels ; l'optimisation multicritère des performances, la gestion des opérations de construction et le domaine des infrastructures de transport sont des tendances en hausse ; il semble que la catégorie des bâtiments à géométrie complexe pourrait bénéficier d'une plus grande attention. Le contexte d'émergence de la question de l'interopérabilité étant dressé, la question suivante peut être abordée : pourquoi les acteurs du BIM ont-ils besoin d'interopérabilité, et plus précisément, pour quels objectifs de collaboration ?

2.1.3 Cadre d'analyse n°2 : Les visées collaboratives de l'interopérabilité

Ce deuxième cadre d'analyse balaie le corpus en adoptant le prisme suivant : dans quels buts les acteurs BIM ont-ils besoin d'améliorer l'interopérabilité ? En d'autres termes : pour un ensemble de données BIM, quelles opérations de collaboration justifient un besoin

d'interopérabilité pour un utilisateur (Sattler, Lamouri, Pellerin, & Maigne, 2019) ? Comme le montre le Tableau 4, sept grandes familles de besoins collaboratifs ont été établies, suivant une catégorisation en gradient, progressant de l'échange le plus basique (traduction) au plus complexe (intégration) : convertir, retrouver, réutiliser, vérifier, liasonner, combiner des données, et combiner des plateformes de données.

Tableau 4 Catégorisation suivant les buts collaboratifs de l'interopérabilité

| Buts collaboratifs de l'interopérabilité | Nombre | % |
|--|-----------|-------------|
| 1. Convertir des données | 7 | 9% |
| 2. Retrouver des données | 4 | 5% |
| 3. Réutiliser des données | 9 | 11% |
| 4. Vérifier des données | 8 | 10% |
| 5. Lier des données | 25 | 31% |
| 6. Combiner des données | 21 | 26% |
| 7. Combiner des plateformes de données | 6 | 8% |
| Total général | 80 | 100% |

2.1.3.1 Conversion : l'accès aux données BIM

Dans cette 1ère catégorie, qui collecte sept articles (9%), **les acteurs ont besoin d'accéder à un ensemble de données BIM et l'ouvrir dans un format qu'ils peuvent manipuler – généralement un format ouvert.** Le défi est de passer d'un modèle de données à l'autre ; l'accent est presque exclusivement mis sur le format IFC. Ces articles traitent de sujets tels que la sérialisation des données IFC pour un échange dans un format web (Afsari, Eastman, & Castro-Lacouture, 2017), la compression des fichiers IFC pour éliminer les redondances sémantiques (Sun et al., 2015), la fiabilité de l'IFC dans les modélisations structurelles (Muller et al., 2017; Solnosky & Hill, 2013). Trois articles (Belsky et al., 2014; Y.-C. Lee, Eastman, & Solihin, 2016; Venugopal et al., 2015) se concentrent sur l'amélioration de la robustesse et de la fiabilité des MVD. **Toutefois, les échanges BIM ne transitent pas tous par l'IFC – mais aussi par des formats propriétaires.**

2.1.3.2 Retrouver des données BIM : la question des requêtes

Dans cette 2^{ème} catégorie, les acteurs ont besoin de retrouver un ensemble précis de données BIM au sein d'un ensemble plus vaste. Le défi technique est le suivant : comment interroger efficacement un ensemble de données BIM ? Seuls quatre articles (5%) traitent de cette

question, via notamment la nécessité d'interroger une maquette BIM (Gómez-Romero et al., 2015; Jiang et al., 2015), de retrouver des données au sein d'une maquette HBIM à LOD variables (Quattrini et al., 2017), et d'intégrer des résultats de requêtes de données hétérogènes dans un fichier IFC (Karan et al., 2015). **Le besoin sous-jacent est, pour un acteur BIM, de manipuler des données BIM émanant d'un autre métier que le sien** ; par conséquent, sans connaître le logiciel d'édition de ces données BIM, ni être un expert en schéma IFC. Actuellement, sur le terrain, ces opérations se font de manière ad hoc et non robustes : les acteurs extraient, copient-collent, ou ressaisissent les données dont ils ont besoin. **Il semble qu'en facilitant la recherche et l'identification de données BIM, on faciliterait la collaboration BIM.**

2.1.3.3 Réutiliser la donnée : empêcher la ressaisie de données BIM

Dans cette 3^{ème} catégorie, collectant neuf articles (11%) les acteurs ont besoin d'utiliser des données BIM créées par un autre métier que le leur – sans avoir à les ressaisir ni à les reprendre. Le thème général de la collaboration ou coopération est abordé, via par exemple, la question d'une utilisation plus accrue et effective de la maquette BIM structurelle au sein d'un projet (Shin, 2017), ou un questionnement sur les objets BIM les plus susceptibles d'être des vecteurs de collaboration multi-métier (Karaman et al., 2013).

Plus précisément, l'interrogation suivante est soulevée : comment transformer un ensemble de données d'un métier à un autre ? Six articles (Hu et al., 2016; Ladenhauf et al., 2016; Liu et al., 2016; Ramaji & Memari, 2016, 2018b; Ryu et al., 2016) traitent de la question de transformer une maquette BIM générale à faible LOD en une maquette BIM métier à LOD plus élevé. Il est à noter que la plupart de ces articles, lorsqu'ils évoquent une maquette BIM générique ou neutre, sans en spécifier le métier, se réfèrent à une *maquette de coordination BIM* ou *maquette architecturale BIM*. Par défaut, dans ce corpus, une *maquette BIM* désigne donc la maquette BIM originale, c'est-à-dire celle qui est réalisée par un architecte lors de la phase de conception, sur laquelle chaque corps de métier basera sa maquette lors de la phase de construction. Cela suggère que la maquette BIM de l'architecte est la référence du projet, la maquette par défaut, et correspond à l'approche du *master-model* de Frank Gehry évoqué au chapitre 1. Cette maquette n'est pas pour autant neutre ; les objets y sont modélisés suivant une structuration propre à l'architecte, qui diffèrent par exemple de celle d'un ingénieur. La notion de *master-*

model suggère toutefois qu'ontologiquement une maquette BIM est faite pour être comprise, appréhendée par tous les métiers, comme une base pour la collaboration.

Au-delà de la question de la traduction métier, le défi est abordé d'un point de vue plus générique à travers la question d'enrichissement sémantique (Belsky et al., 2016) : comment la maquette BIM d'un métier n°1 peut-elle être enrichie d'une sémantique donnée, afin d'être *comestible* pour un métier n°2 ? Cette attente correspond à la nécessité d'éviter la ressaisie de données entre les acteurs BIM : l'acteur n°1 envoie une maquette BIM à l'acteur n°2, qui doit tout d'abord extraire les données qui l'intéressent, les transformer selon une structuration de donnée qui convient à son métier, les enrichir avec ses modélisations métier, et les renvoyer à l'acteur n°1. **Les opérations d'extraction, transformation, et enrichissement, si elles sont manuelles, peuvent être chronophages, constituer une source d'erreur – et sont à recommencer lors de toute itération de projet. Normer et automatiser ces trois opérations pourraient minimiser de manière significative les ressaisies de données dans la collaboration BIM, et faciliter l'utilisation de données exogènes par les acteurs BIM.**

2.1.3.4 Vérifier des données BIM : la question de la validation

Dans cette 4^{ème} catégorie, collectant huit articles (10%), les acteurs ont besoin de valider des ensembles de données BIM. Deux types de validation existent : celle de la structure des données et celle de leur contenu. Le 1^{er} type de validation implique par exemple la vérification d'un IFC en regard de sa classification (Koo & Shin, 2018), ou vis à vis de MVD particulières (Y.-C. Lee, Eastman, Solihin, et al., 2016; Y.-C. Lee et al., 2015, 2018; C. Zhang et al., 2015). Cela correspond au besoin de vérifier, pour un fichier BIM donné, sa structuration interne, et sa conformité avec les attentes définies dans la convention BIM ou par l'usage. Le 2nd type de validation, du contenu des données ou de l'information, implique par exemple la validation d'une maquette BIM en regard de normes et réglementation de bâtiment (Malsane et al., 2015), vis-à-vis du coût d'un bâtiment attendu un client (Zanchetta et al., 2017) ou des performances environnementales (Zhong et al., 2018). **Seulement trois articles sont concernés, ce qui confirme un point évoqué dans le cadre d'analyse n°1 : la vérification du contenu basée sur des données BIM en est encore à ses balbutiements.**

2.1.3.5 Connecter des données BIM : lier deux maquettes de différents métiers

Dans cette 5^{ème} catégorie, les acteurs ont besoin de créer des liens persistants entre deux maquettes BIM de différentes disciplines. La différence avec le simple besoin d'*utilisation* de données, évoqué dans la section 2.1.3.3, est la suivante : dans celle-ci, la question était posée *passivement* pour éviter les ressaisies de données. Dans celle-là, la question est posée activement, dans l'optique de créer un pont robuste et réutilisable entre deux métiers AEC.

Deux modes de connexion entre les données BIM d'un métier n°1 et d'un métier n°2 sont abordés : le mode amont, avec des questions telles que « comment structurer une maquette BIM afin qu'elle puisse servir de base de données pour le monitoring structurel du bâtiment ? » (Rio et al., 2013; Theiler & Smarsly, 2018), ou « comment représenter des voies piétonnes dans le schéma IFC ? » (J. K. Lee & Kim, 2014) c'est-à-dire : comment structurer un modèle en amont pour l'adapter à un métier spécifique ? Et le mode aval, avec des questions comme « comment baser une évaluation énergétique sur une maquette BIM » (Ahn et al., 2014; Cemesova et al., 2015; J. Choi et al., 2016, 2018; El Asmi et al., 2015; Guzmán Garcia & Zhu, 2015; H. Kim & Anderson, 2013; J. B. Kim et al., 2015; Nizam et al., 2018; Shadram et al., 2016; Shadram & Mukkavaara, 2018), c'est-à-dire : comment extraire et transformer, à partir de la maquette BIM d'un métier n°1, les informations appropriées qui serviront de base à l'élaboration de la maquette BIM d'un métier n°2 ?

Cette catégorie est la plus importante, avec 25 articles (31%). Elle suggère un besoin important d'utiliser les données BIM comme vecteurs de collaboration entre plusieurs domaines, et soulève la question de l'encapsulation des connaissances métier dans les maquettes BIM.

2.1.3.6 Combiner des données BIM : interactions de données hétérogènes

Dans cette 6^{ème} catégorie, les acteurs ont besoin de combiner des données BIM de sources hétérogènes ; c'est-à-dire, de centraliser, d'entrecroiser et faire interagir différents jeux de données. Cette question est similaire à celle de la catégorie précédente, mais avec un saut d'échelle : il s'agit de relier des données provenant de plus de deux sources – et donc plus de deux métiers. La question est abordée sur trois niveaux différents.

Niveau conception : dans cette 1^{ère} sous-catégorie, divers ensembles de données doivent être combinés pour évaluer une performance de coût ou de dépense énergétique (Chardon et al., 2016; Gupta et al., 2014; Woo & Menassa, 2014) pendant la phase de conception.

Niveau construction : dans cette 2^{ème} sous-catégorie, la combinaison des données a lieu lors de la phase de construction, et les données BIM alimentent des processus liés au contrôle qualité (Hernández et al., 2018; M.-K. Kim et al., 2015), au contrôle des risques (Du et al., 2016), à la logistique (Čuš-Babič et al., 2014), notamment via le déploiement de nouvelles technologies liées au big data et à l'industrie 4.0 (Dave et al., 2016; Patti et al., 2017). Dans cette phase, en plus d'être très hétérogènes en termes de sémantique et de granularité, les ensembles de données ont un LOD plus élevé et sont donc plus volumineux que dans la phase de conception, ce qui augmente le défi de la combinaison des données.

Niveau générique : dans cette 3^{ème} sous-catégorie, le besoin de combinaison des données est interrogé sous l'angle organisationnel. L'accent est mis sur les verrous conceptuels et structurels qui empêchent la fluide combinaison des données BIM (Hartmann et al., 2017), et sur le défi que représente la mise en œuvre de maquettes BIM multi-métier (Díaz et al., 2017; Fuchs & Scherer, 2017; Perisic et al., 2016). Le besoin d'alignement sémantique entre les différents métiers est évoqué (Niknam & Karshenas, 2017), de même que la nécessité d'aborder la question des interactions humaines autour des maquettes BIM (Das et al., 2015; Qing et al., 2014) ; dans cette lignée, une étude élabore un quotient de mesure de l'interopérabilité sur un projet, alliant des considérations organisationnelles et techniques (Grilo et al., 2013). **Il semble clair dans la littérature que la combinaison de données, qui peut être considérée comme le plus haut niveau d'échange de données, n'est pas une question purement technique, mais dépend également des interactions permises par les modèles d'affaires en place, et les dispositions humaines qui en découlent.**

Avec 21 articles, soit 26% du corpus, ce besoin de combinaison de données BIM est bien représenté dans la littérature, à de multiples niveaux, ce qui suggère un fort besoin dans l'AEC non seulement de mise en place de logiques de collaboration multi-métier, mais aussi de confrontation et d'analyse automatisées de données inter-domaines.

2.1.3.7 Combiner différentes plateformes de données BIM

Dans cette 7^{ème} section, les acteurs ont besoin de naviguer entre différentes plateformes collaboratives BIM hébergées sur le cloud. On pourrait considérer qu'on a à nouveau un saut d'échelle avec le besoin évoqué dans la catégorie précédente : l'interopérabilité est abordée au niveau de l'outil collaboratif lui-même, et non plus au niveau des données.

Divers besoins sont abordés, comme celui, trivial mais nécessaire, d'une connexion internet robuste sur un chantier de construction pour permettre la collecte de données *as built* en direct et synchronisées via Wi-Fi (Zekavat et al., 2014), du type de cloud à instaurer (Petri et al., 2017; J. Zhang et al., 2017), ou celui d'interfaces utilisateurs plus optimales, adaptées à des revues de maquettes interdisciplinaires (B. Li et al., 2017). Une nouvelle question est soulevée : comment permettre l'interopérabilité entre différentes plateformes de collaboration BIM (Afsari, Eastman, & Shelden, 2017) ? Ces plateformes sont originellement censées résoudre des problèmes d'interopérabilité et de collaboration en permettant à différentes maquettes BIM d'être partagées, visualisées et modifiées en ligne. Mais en réalité, comme il s'agit généralement de plateformes propriétaires, développées par les éditeurs des principaux logiciels de modélisation BIM, elles ne sont pas ouvertes à d'autres formats que les leurs ; et le problème d'interopérabilité a en fait simplement été déplacé du niveau des *fichiers* vers celui des *plateformes*. Cette section contient un faible nombre d'articles, tous très récents (2017 - 2018) : il s'agit d'un nouveau champ de recherche, soulevant l'interrogation suivante : les plateformes collaboratives BIM peuvent-elles et doivent-elles être interopérables ?

Pour conclure cette section, **différents besoins justifient la mise en place de processus d'interopérabilité, du besoin le plus basique consistant à convertir des données, à des besoins plus complexes de combiner différents sets de données. L'enjeu n'est pas uniquement pour un acteur de lire les données BIM d'un autre acteur, mais bien d'utiliser et de traiter ces données. Alors que des efforts considérables sont déployés pour relier les données d'un métier à un autre et combiner des données provenant de différentes sources, il semble que la pratique élémentaire consistant à rechercher et retrouver des données BIM ne soit pas assez abordée dans la littérature scientifique.** La question du « pourquoi » ayant été abordée, la question du « comment » peut suivre : comment la communauté scientifique suggère-t-elle de résoudre le problème de l'interopérabilité et de la collaboration BIM ?

2.1.4 Cadre d'analyse n°3 : Les méthodes de résolution des problèmes d'interopérabilité BIM

Cette section analyse les solutions proposées dans la littérature scientifique pour résoudre les problèmes d'interopérabilité et de collaboration BIM. Trois catégories de résolution des problèmes sont mises en œuvre : (1) l'approche en amont, dans laquelle la responsabilité de l'intégrité de l'échange de données est placée du côté de l'émetteur de ces données (2) l'approche en aval, dans laquelle la responsabilité de l'intégrité de l'échange est placée du côté du récepteur, et (3) l'approche holistique, qui considère le *flux* de données en soi, plutôt que la perspective de l'émetteur ou du récepteur. Le corpus est analysé à travers ces trois approches.

Tableau 5 Catégorisation suivant les méthodologies de résolution

| SOLUTION D'INTEROPERABILITE | Nombre | % |
|---|-----------|-------------|
| 1. Approche en amont | 7 | 9% |
| 1.1 Amélioration de modèles de données | 2 | 3% |
| 1.2 Extensions IFC et MVD | 4 | 5% |
| 1.3 Amélioration de la création de MVD | 1 | 1% |
| 2. Approche en aval | 22 | 28% |
| 2.1 Déduction et transformation automatiques de données | 12 | 15% |
| 2.2 Validation de fichiers IFC et de MVD | 5 | 6% |
| 2.3 Améliorations des conversions | 3 | 4% |
| 2.4 Requêtes de données BIM | 2 | 3% |
| 3. Approche holistique | 51 | 64% |
| 3.1 Articulation de données | 18 | 23% |
| 3.2 Centralisation de données | 14 | 18% |
| 3.3 Orchestration de workflows | 10 | 13% |
| 3.4 Web sémantique & ontologies | 9 | 11% |
| Total général | 80 | 100% |

2.1.4.1 Approche en amont

Dans cette catégorie, collectant sept articles (9% du corpus), la responsabilité de l'intégrité d'un échange de données est placée au niveau de l'émetteur, qui doit s'assurer que les données livrées peuvent être consultées et utilisées par le récepteur. Les solutions se concentrent sur la

structuration des données *en amont*, afin de permettre un échange robuste et fiable *en aval*, et la problématique est la suivante : comment structurer idéalement les données ?

L'IFC étant de facto le standard neutre de l'AEC depuis plus de 20 ans, l'idée de créer un nouveau modèle de données est presque inexistante dans le corpus, à l'exception de la suggestion d'une nouvelle structuration de données pour les modélisations structurelles (Solnosky & Hill, 2013). En revanche, beaucoup d'articles étudient des pistes d'amélioration de l'IFC, via la question de la modélisation IFC de la circulation dans un bâtiment (J. K. Lee & Kim, 2014), ou d'extensions du modèle IFC afin d'intégrer les données collectées par les capteurs structurels (Rio et al., 2013; Theiler & Smarsly, 2018) ou améliorer les catalogues d'objets BIM (Gökçe et al., 2013). D'autres articles abordent les améliorations des MVD pour, par exemple, mieux représenter certains types de bâtiments spécifiques (Ramaji & Memari, 2018a), et suggèrent d'en modulariser le développement (Belsky et al., 2014). En effet, les MVD sont basées sur des exigences d'échange spécifiques : leur implémentation et maintenance est coûteuse et chronophage. En mettant en place des modules d'échange sémantique SEM (*Semantic Exchange Modules*) réutilisables, sortes de briques à assembler pour créer différents MVD pour divers métiers, l'effort de mise en œuvre des MVD pourrait être mutualisé et distribué à travers l'AEC, ce qui permettrait de réduire son coût et d'en faciliter le déploiement (Belsky et al., 2014).

L'approche en amont est presque exclusivement axée sur les standards ouverts (IFC, MVD) et aborde la question de la représentation et de la structuration idéale des données BIM, ou de la manière optimale dont les acteurs BIM devraient créer des vues métier via les MVD. Cependant, le nombre d'articles adoptant cette méthode de résolution *en amont* diminue avec le temps, ce qui suggère que cette approche, si elle est nécessaire, n'est pas suffisante pour résoudre le défi de l'interopérabilité BIM.

2.1.4.2 Approche en aval

Dans cette catégorie, la responsabilité de l'intégrité de l'échange de données est placée du côté du récepteur, et la perspective est inversée par rapport à la catégorie précédente. Les solutions consistent à optimiser l'utilisation *en aval* d'un ensemble de données BIM reçues.

2.1.4.2.1 Déduction et transformation automatique de données

Une 1^{ère} méthodologie suggérée est l'approche par déduction et transformation automatique de données ; 12 articles (15% du corpus) sont concernés. **Le principe est d'inférer un contenu sémantique implicite à partir de données BIM explicites**, comme présenté dans une étude sur un modèle de béton préfabriqué (Belsky et al., 2016), dans lequel des joints et agrégations de dalles sont détectés par inférence de règles métier et géométriques, afin de l'enrichir sémantiquement. **Cet article insiste sur le changement de paradigme opéré en plaçant la responsabilité sur l'application réceptrice – et évoque notamment le pragmatisme de cette approche : l'acteur qui a besoin d'une donnée structurée d'une certaine manière est le mieux placé pour mettre en place cette structure.** Cette approche est également développée, avec la mise en place d'échanges d'informations interprétées IIE (*Interpreted Information Exchange*) (Ramaji & Memari, 2016, 2018b) pour capturer des informations qui pourraient être considérées comme *latentes* dans une maquette BIM, telles que les données géométriques filaires (points et lignes) nécessaires à un modèle d'analyse structurelle. Le processus est double : (1) extraction des données appropriées, c'est-à-dire le modèle 3D géométrique filaire ; (2) transformation de ces données pour les adapter à un schéma géométrique d'analyse structurelle, c'est-à-dire fusionner des points et recomposer des segments afin d'obtenir un réseau orthogonal de lignes verticales et horizontales connectées. Dans ce cas, le processus consiste en une transformation géométrique de données BIM, transformation orientée vers un métier précis. Un processus similaire est présenté dans une étude sur la simplification géométrique d'une maquette BIM pour nourrir une analyse de performance énergétique par zones dans un bâtiment (Ladenhauf et al., 2016). Ici le terme simplification est trompeur : par exemple, un ingénieur acousticien ne se réfèrera pas aux mêmes zones qu'un ingénieur thermicien, et la *simplification* est en réalité la *transformation* d'une géométrie afin de coller à la structuration de données précise attendue par un métier.

On recense dans le corpus d'autres cas de transformation de maquettes BIM pour des métiers spécifiques : pour le domaine structurel (Hu et al., 2016; Liu et al., 2016) et le domaine de l'analyse énergétique (Ahn et al., 2014; J. Choi et al., 2016; Guzmán Garcia & Zhu, 2015). Une étude aborde le sujet de la transformation de modèles 3D en maquettes BIM (Ryu et al., 2016), et développe un outil utilisant un langage de programmation visuelle pour automatiser la

transformation d'un modèle géométrique 3D (créé dans Rhino) en une maquette BIM IFC. **On notera que c'est un besoin fort dans le champ du BIM, notamment dans les agences d'architecture utilisant des modeleurs 3D comme Rhino** ; le plugin Rhino Inside, dont la version bêta est sortie en 2019, permet désormais via Rhino-Grasshopper, ouvert dans l'environnement de Revit, de transformer des géométries surfaciques ou solides en objets BIM.

2.1.4.2.2 Validation de fichiers IFC et de MVD

Une autre méthodologie de résolution des problèmes d'interopérabilité consiste à permettre la vérification et la validation de fichiers IFC ; cinq articles (6% du corpus) sont concernés – dont certains répondent aux problématiques évoquées en miroir dans la section 2.1.3.4). Un effort important a été fait pour valider des fichiers IFC en regard de leur MVD d'extraction, avec la proposition d'un processus de validation de MVD modulaire (Y.-C. Lee, Eastman, Solihin, et al., 2016) et le développement de règles logiques pour vérifier syntaxiquement et sémantiquement une instance IFC par rapport à une MVD via une interface user-friendly (Y.-C. Lee et al., 2018). Une approche machine learning a été développée (Koo & Shin, 2018), avec la création d'un algorithme d'apprentissage pour la détection d'éléments IFC mal classifiés. Le machine learning (Wikipedia, n.d.) ou apprentissage automatique en français, est le champ d'étude des algorithmes capables d'*apprendre* automatiquement à analyser des larges sets de données. Intrinsèquement liée au big data, cette technologie se base sur une approche mathématique et statistique des données ; elle consiste notamment à reconnaître des patterns ou effectuer des prédictions à partir de données *expérimentées* ou *analysées (appries)* par des algorithmes. **L'utilisation de l'intelligence artificielle pour la vérification de données BIM semble être prometteuse – mais est encore très peu développée.**

2.1.4.2.3 Amélioration des conversions

Des méthodologies plus classiques, telles que l'amélioration des processus de conversion de données, sont également présentes dans le corpus (3 articles, soit 4%), avec par exemple, une évaluation sur cinq ans de l'amélioration des conversions IFC pour le domaine structurel (Muller et al., 2017), la proposition d'un algorithme de compression supprimant les informations redondantes d'un fichier IFC reçu (Sun et al., 2015), ou l'utilisation de JSON

(*JavaScript Object Notation*) comme langage pour traduire l'IFC dans un format web compatible (Afsari, Eastman, & Castro-Lacouture, 2017). **Cette méthodologie se distingue de la méthode en amont : elle concerne des outils développés en aval, pour les destinataires d'une maquette BIM, afin qu'ils puissent transformer et améliorer des données BIM reçues.**

2.1.4.2.4 Requêtes de données BIM

En écho à la problématique liée au besoin de retrouver des données BIM, soulevée dans la section 2.1.3.2, deux articles (3% du corpus) abordent la question de l'interopérabilité BIM via le levier technique de l'interrogation de données : par la création d'un outil qui automatise la génération de requêtes sur des données BIM, et qui peut être mis en place par un utilisateur n'ayant pas de compétences en programmation (Jiang et al., 2015), ou via l'utilisation de requêtes informelles, via des processus de logique floue (*fuzzy logic*) (Gómez-Romero et al., 2015). Comme mentionné précédemment, la recherche de sets de données précis au sein de larges ensembles BIM correspond à un fort besoin sur le terrain, dans le monde quotidien des acteurs et utilisateurs BIM ; faciliter et démocratiser l'action de requêter une maquette BIM pourrait combler ce besoin. Le très faible nombre d'articles abordant la question des requêtes BIM suggère une lacune dans la recherche à ce sujet.

2.1.4.3 Approche holistique

Dans cette catégorie, les méthodologies de résolution des problèmes d'interopérabilité et de collaboration ne considèrent pas l'angle de l'émetteur ou du récepteur des données, mais celui de l'échange de données en soi, c'est-à-dire du flux de données, et non pas simplement les données d'entrée ou de sortie.

2.1.4.3.1 Articulation de données

Cette méthodologie de résolution concerne 18 articles (23 %), et porte sur l'articulation de différents sets de données. Les méthodes mises en place pour articuler les données sont diverses, impliquant par exemple l'utilisation d'un driver géométrique – une spline 3D – afin de fédérer les échanges BIM autour de la maquette d'un pont en structure métallique (Karaman et al., 2013), la création d'une bibliothèque d'objets BIM pour faciliter les traductions semi-

automatiques du BIM au BEM (J. B. Kim et al., 2015), la création d'un modèle d'objet BIM sémantiquement riche, avec encapsulation de savoirs liés aux réglementations, servant de base à un processus de vérification de la conformité d'un bâtiment (Malsane et al., 2015), ou l'utilisation d'un système de classification standard comme médiateur pour permettre la vérification de certaines performances d'un bâtiment sur la base de sa maquette BIM (Zanchetta et al., 2017).

Certains outils sont basés sur l'open BIM, avec par exemple un cadre automatisé d'évaluation de la qualité de la construction, basé sur l'IFC (Xu et al., 2018), tandis que d'autres sont explicitement basés sur les API⁶ de logiciels propriétaires (Shin, 2017), comme ce plugin automatisant le traitement de données BIM à injecter dans un moteur de simulation énergétique (M. Choi et al., 2018).

Le défi ultime dans un cadre d'articulation de données est la possibilité de mettre en place des scénarii d'allers-retours : d'appréhender de multiples itérations, et de ne pas se contenter d'un échange *one-shot*. La question des échanges bilatéraux entre deux ensembles de données BIM n'est soulevée que dans deux articles, dont l'un met en évidence la boucle de rétroaction brisée lors d'échanges entre des données IFC et gbXML (K. P. Kim & Park, 2018), l'autre exposant la connexion bilatérale entre un module d'optimisation multi-objectif et une maquette BIM, avec import du résultat de l'optimisation dans la maquette BIM originale (Shadram & Mukkavaara, 2018). Comme vu dans la section précédente, la question d'automatiser le passage de données d'une maquette n°1 à une maquette n°2 est abordée dans la littérature ; mais deux questions afférentes ne sont que trop peu traitées : celle de la récurrence (le passage d'un jeu de données de la maquette n°1 vers la maquette n°2 peut arriver plus d'une centaine de fois en une phase de projet) et celle de l'aller-retour (des données de la

⁶ Un API, pour *Application Programming Interface*, est l'interface qu'un logiciel met à disposition afin de pouvoir être manipulé voire automatisé par un autre logiciel ; c'est, d'après Wikipedia, « un ensemble normalisé de classes, de méthodes, de fonctions et de constantes qui sert de façade par laquelle un logiciel offre des services à d'autres logiciels. Elle est offerte par une bibliothèque logicielle ou un service web, le plus souvent accompagnée d'une description qui spécifie comment des programmes consommateurs peuvent se servir des fonctionnalités du programme fournisseur. » https://fr.wikipedia.org/wiki/Interface_de_programmation

maquette n°1 vers la n°2 ; mais également de la réinjection des données de la maquette n°2 vers la n°1). **Il semble que la question de la récurrence et de la bidirectionnalité des échanges entre plusieurs maquettes BIM métier pourraient recevoir plus d'attention scientifique.**

2.1.4.3.2 Centralisation des données

Une 2^{ème} approche, collectant 14 articles (18%), est basée sur les technologies de centralisation et de distribution des données BIM. Certains articles traitent des différentes modalités de cloud à adopter, privé (J. Zhang et al., 2017) ou fédéré (Petri et al., 2017). D'autres articles évoquent la création de plateformes collaboratives BIM (Ding & Xu, 2014), dont certaines ne limitent pas leur fonction à la centralisation de données BIM, mais incluent d'autres types d'inputs comme les données CAD et les données ERP (Čuš-Babič et al., 2014), les données environnementales et les données collectées par différents types de capteurs (Hernández et al., 2018; Woo & Menassa, 2014) et par les objets connectés IoT (Dave et al., 2016), et les données d'évaluation du cycle de vie (Nizam et al., 2018; Qing et al., 2014). Enfin, la question ultime des plateformes BIM, évoquée précédemment dans la section 2.1.3.7, est celle de leur interconnexion – soit celle de l'interopérabilité entre différents outils de centralisation de données BIM (Afsari, Eastman, & Sheldon, 2017).

Les plateformes collaboratives actuelles, couramment utilisées dans le BIM sur le terrain, se limitent encore trop souvent au stockage cloud des maquettes, à la possibilité de les visualiser, commenter, annoter, et de créer des révisions informatiques de fichiers. Elles impliquent encore une collaboration à faible granularité, s'arrêtant à la frontière des fichiers stockés en ligne, selon une logique traditionnelle de silos. Dans une maquette BIM métier n°1, les jeux de données ne sont pas connectés aux jeux de données connexes ou afférents d'un métier n°2. Par exemple, l'objet "mur" lui-même apparaîtrait dans deux maquettes BIM, le modèle structurel et le modèle architectural : ils ne sont pas connectés mais dupliqués, voire ressaisis ; si l'un est modifié, l'autre ne suit pas. Les plateformes collaboratives ne résolvent donc pas encore la question du découplage et de l'interconnexion de données BIM hétérogènes – alors même que le format et l'interface d'une plateforme web permettraient, théoriquement, de s'affranchir des logiques de conteneurs par fichiers, et de raisonner en termes de bases de données plutôt qu'en termes de silos. **Ainsi, les fonctionnalités présentées plus haut, visant à traiter**

automatiquement des données à granularités variables, dans un cadre décloisonné, améliorerait considérablement les plateformes BIM actuelles.

2.1.4.3.3 Orchestration de workflows

Une 3^{ème} approche (10 articles, 13%) aborde le défi de l'interopérabilité et de la collaboration via **la mise en place de workflows BIM. Cette approche va au-delà des questions d'articulation et de centralisation des données BIM, et considère l'organisation du travail dans sa globalité ; en d'autres termes, elle considère l'interopérabilité métier, et non uniquement l'interopérabilité technologique.**

Ainsi, l'accent est mis par exemple sur la nécessité de calquer les workflows BIM sur l'organisation du travail humain, avec la prescription de spécifications d'interopérabilité et de cadres inter-organisationnels basés sur des IDM⁷ (Arayici et al., 2018). D'un point de vue plus technique, la question de l'interface collaborative homme-machine est abordée (B. Li et al., 2017), avec la proposition d'une interface multi-utilisateurs et multi-métiers pour la visualisation de maquettes BIM, dans le but de faciliter les revues de modèles dans le contexte de l'ingénierie simultanée.

La collaboration interdisciplinaire est abordée via une approche multi-maquettes dans quatre articles. Un cadre conceptuel multi-maquettes basé sur un modèle IFC central est développé, auquel sont liés des modèles de simulation (Gupta et al., 2014) ; un cadre multi-maquettes de données liées (*Linked Data*) est développé, homogénéisant l'accès aux données plutôt que leur *format*, afin de créer des liens entre différentes maquettes métier (Fuchs & Scherer, 2017) ; une approche similaire est utilisée via un cadre flexible et distribué intégrant plusieurs langages spécifiques métier DSL (*Domain-Specific Languages*), orchestrant différentes maquettes et logiciels via des fonctions d'extensibilité (Perisic et al., 2016). Une étude examine cinq logiciels de modélisation BIM, et démontre qu'aucun ne répond aux exigences requises pour être connectés à un prototype d'outil intégratif PIDO (*Process*

⁷ Un IDM (*Information Delivery Manual*) est un standard élaboré par buildingSmart, qui sert de base à la création de MVD. <https://www.buildingsmart.org/standards/bim-standards/information-delivery-manual/>

Integration Design Optimization) d'optimisation multidisciplinaire de la conception (MDO, *Multi-disciplinary Design Optimization*) (Díaz et al., 2017). Une telle intégration nécessiterait une amélioration de l'interopérabilité des objets BIM, notamment via une plus grande paramétrie et associativité.

Peu d'articles abordent le défi des liens paramétriques entre différentes maquettes BIM ; d'après Costa et al. (Costa & Madrazo, 2015), "des efforts supplémentaires sont nécessaires pour fournir des descriptions paramétriques des produits d'une manière plus standardisée". De même, le triple manque (1) d'interopérabilité des composants ou objets BIM, (2) de capacité d'automatisation des outils BIM, et (3) de paramétrisation des maquettes BIM est identifié comme un grand frein technique aux échanges de données et à l'intégration BIM en général (Díaz et al., 2017).

Il est clair que des liens doivent être établis entre les objets BIM de différentes maquettes, afin d'assurer une continuité dans les données, de permettre la propagation automatique des modifications de projets – et éviter ainsi les ressaisies de données. Les maquettes BIM sont généralement déjà paramétriques, mais ce paramétrisme devrait être étendu au niveau d'un projet, d'une maquette fédérée entre les différentes équipes et les différents métiers, et au-delà des frontières des fichiers. Un objet BIM donné pour le métier n°1 devrait être paramétrable et connecté à son objet BIM apparenté ou à un groupe d'objets afférents dans le métier n°2.

Une prise de recul est effectuée par Hartmann (Hartmann et al., 2017), qui présente **trois indicateurs de qualité BIM contradictoires : le degré de représentation sémantique, l'exhaustivité conceptuelle, et la facilité d'implémentation ou d'usage de ce modèle (praticabilité)** (Figure 17). Ces trois tendances sont mutuellement conflictuelles ; par exemple, augmenter le degré de représentation sémantique d'un objet BIM de type *mur* nécessite d'introduire différents sous-systèmes de représentation, afin englober la richesse sémantique de cet objet dans son ensemble, et les différents points de vue nécessaires pour l'appréhender. Or cette multiplicité sémantique, combinant différents aspects d'un même objet, pourrait être considérée comme une redondance au sein d'un modèle conceptuel ; à l'opposé, décrire un mur de manière conceptuellement pure fera diminuer son degré de représentation sémantique ; et une augmentation générale des degrés de représentation sémantique et de pureté conceptuelle

aboutira respectivement à des modèles d'information trop lourds ou trop rigides, et donc difficiles à appréhender et manipuler. Par exemple, la représentation IFC d'un mur est très riche, et inclut de nombreux concepts ; mais un ingénieur structure a besoin de réduire cette représentation pour obtenir un modèle structurel conceptuellement pur ; la redondance de l'IFC, tout comme l'aridité du modèle conceptuel structurel, rendront ces informations difficilement praticables pour un utilisateur.

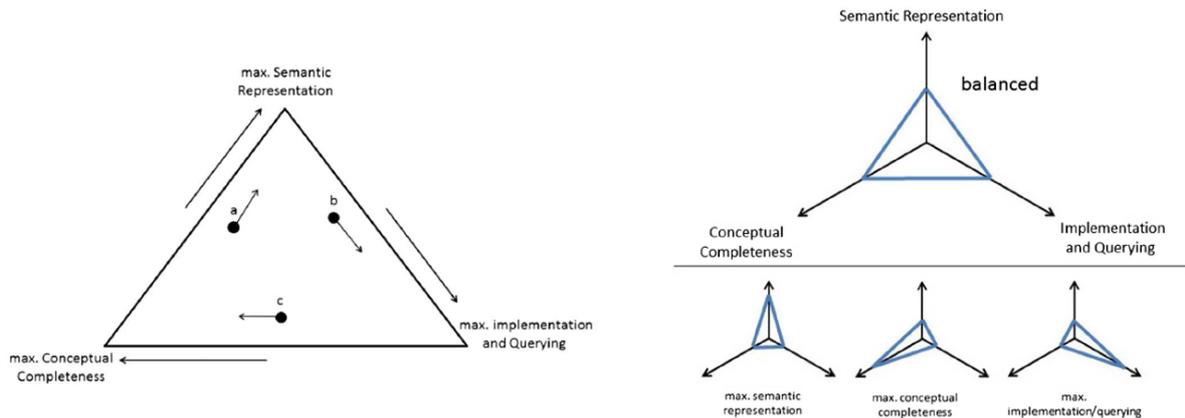


Figure 17 Les trois qualités contradictoires d'un modèle d'information BIM selon Hartman (2017)
 Source : *Information Model Purposes in Building and Facility Design*, Hartman et al.
 (Hartmann et al., 2017)

La tension entre ces trois tendances (sémantisme, conceptualisation, praticabilité) devrait donc être prise en compte dans les processus d'échange de données BIM. En d'autres termes, tout workflow d'interopérabilité devrait considérer le fait qu'une maquette BIM est une superposition, et dans le meilleur des cas, une combinaison, de deux types de modèles (sémantiques, conceptuels) ; en conséquence, une meilleure interopérabilité – et donc une meilleure praticabilité – impliquerait de permettre une meilleure navigation entre la richesse sémantique et l'aridité conceptuelle de différentes maquettes BIM.

2.1.4.3.4 Web sémantique et ontologies

Une 4^{ème} approche est l'utilisation des technologies du web sémantique et d'ontologies, évoquée dans neuf articles (11%). Le web sémantique est une technologie visant à « rendre une donnée interprétable par une machine » (Wikipedia, n.d.), impliquant l'utilisation d'ontologies et de langages DL (*Description Logic*) comme le RDFS (*Resource Description Framework Schema*) ou le OWL (*Web Ontology Language*). Le web sémantique implique l'utilisation de données

liées (*Linked Data*, ou web des données en français), les modèles de données devenant des ontologies. En informatique, une ontologie permet de décrire explicitement, formellement et sans ambiguïté un domaine de connaissances (plusieurs définitions scientifiques existent, confrontées par Fortineau dans sa thèse sur la modélisation d'ontologies pour le PLM (Fortineau, 2013)).

Dans le corpus étudié, les technologies du web sémantique sont utilisées pour formaliser (Venugopal et al., 2015) et générer des MVD (Y.-C. Lee, Eastman, & Solihin, 2016). Elles sont également utilisées pour représenter des données HBIM (Quattrini et al., 2017), pour créer des liens dynamiques entre des logiciels de modélisation BIM et des catalogues d'objets (Costa & Madrazo, 2015), et pour générer des données IFC d'après des requêtes hétérogènes dans le langage SPARQL (*Protocol and RDF Query Language*) (Karan et al., 2015). Une approche plus générique est suggérée pour permettre aux différents métiers de l'AEC d'interagir : la création d'une ontologie partagée BIM (BIMSO, *BIM Shared Ontology*) (Niknam & Karshenas, 2017) pour représenter les concepts communs aux différentes disciplines de l'AEC. Cette ontologie partagée agit comme un médiateur sémantique pour aligner diverses ontologies métier. **L'utilisation des technologies du web sémantique est très récente : les dates de publication des articles sont réparties entre 2015 et 2018, et semble prometteuse, comme l'indique une revue de littérature dédiée** (Pauwels et al., 2017).

Pour conclure cette section, **trois approches existent pour résoudre les problèmes d'interopérabilité et de collaboration, et semblent évoluer avec le temps (Figure 18) : les approches en amont et en aval sont peu à peu remplacées par une approche plus holistique, qui aborde le défi de l'interopérabilité et de la collaboration via le flux de données lui-même, et non via l'angle de données d'entrée ou de sortie. Alors que les questions de centralisation, articulation et transformation de données reçoivent beaucoup d'attention scientifique, les méthodologies d'orchestration de workflow, en lien avec l'organisation du travail, relèvent d'une tendance qui gagnerait à prendre de l'ampleur. En effet, c'est une méthodologie qui aborde l'interopérabilité sous un angle global, considérant les aspects organisationnels et technologiques via un large spectre, s'étendant de l'organisation du projet aux échanges de données. Enfin, alors que l'utilisation du web sémantique dans le BIM est une piste prometteuse, une méthodologie de résolution des**

problèmes d'interopérabilité reçoit très peu d'attention, alors qu'elle est la racine de toute action de collaboration BIM : c'est la question triviale des requêtes BIM.

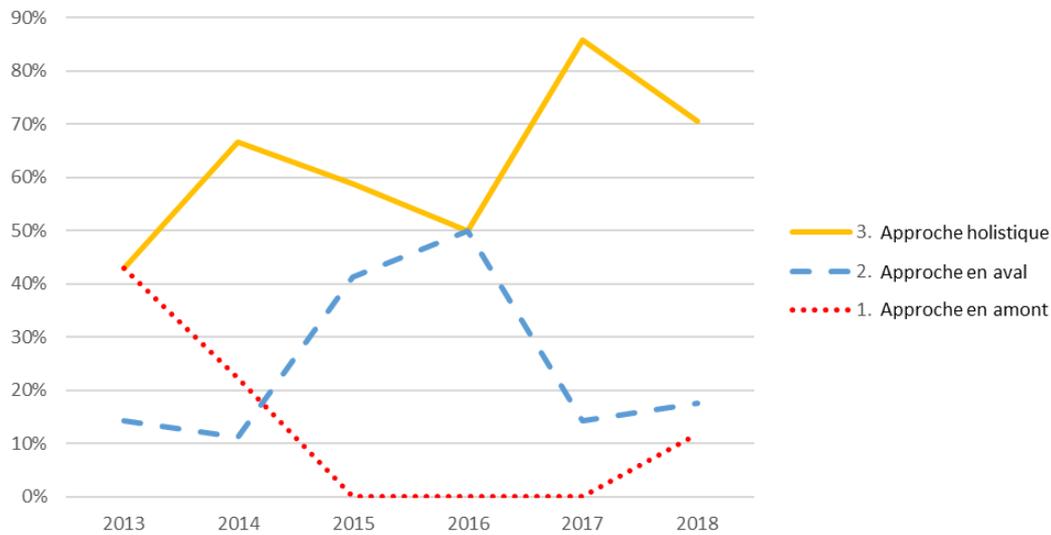


Figure 18 Evolution des approches de résolution des problèmes d'interopérabilité et de collaboration BIM

2.1.5 Discussion

2.1.5.1 Tendances de recherche

Comme cette revue l'a mis en lumière, les questions d'interopérabilité et de collaboration BIM sont largement abordées dans la littérature. De nombreux efforts sont déployés, d'une part, pour connecter différents sets de données BIM métier en automatisant la transformation de données entre une maquette et une autre, et éviter la ressaisie de données, et pour combiner automatiquement des données provenant de différentes sources. D'autre part, la collaboration BIM sur le cloud est en plein essor, et les données BIM sont de plus en plus partagées sur le web.

Cependant, comme vu précédemment, la collaboration BIM n'a toujours pas atteint un niveau satisfaisant : sur le terrain, les échanges de données BIM sont encore basés sur l'envoi de gros fichiers, qui reste l'unité de collaboration entre les différents métiers. Des niveaux de maturité du BIM ont été définis par le *Bim Industry Working Group* en 2011 (Figure 19) dans un document officiel du gouvernement britannique, dans lequel le niveau trois du BIM est

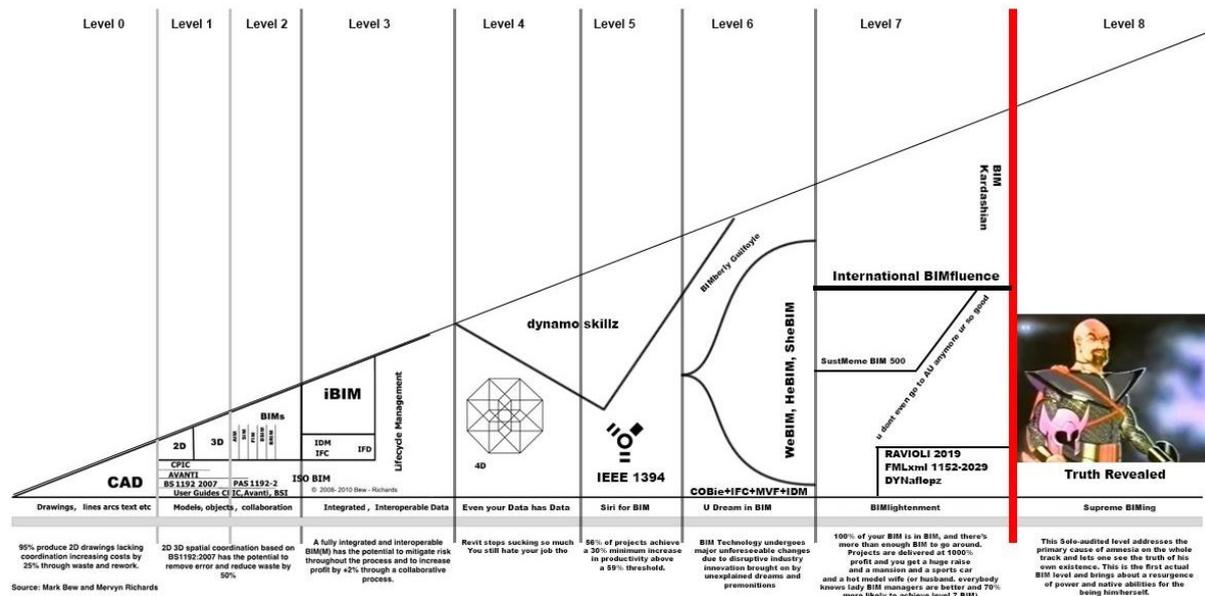


Figure 20 Parodie des niveaux de maturité de BIM, par le compte twitter BIM Level 8
 Source : <https://twitter.com/bimlevel8>

En effet, d'après Hartmann (Hartmann et al., 2017), un *malentendu conceptuel* persiste à propos des maquettes BIM, « à savoir qu'il n'y a jamais eu un seul ensemble d'informations ou même un seul modèle d'information qui répondrait aux besoins de toutes les parties prenantes d'un projet. » Dans cette optique, le *modèle unique* invoqué dans le BIM de niveau 3 ne peut en aucun cas être une maquette ni un *fichier* BIM cloisonné ; il doit être compris comme un ensemble à haute granularité de modèles métiers interconnectés, stockés dans des bases de données cloud, avec une gestion précise des droits d'accès des utilisateurs et des workflows afférents. **Cela implique que différentes équipes manipulent et utilisent les données originales d'autres équipes, sans aucune ressaisie ni duplications de données ; cela requiert une interopérabilité bidirectionnelle (avec envoi d'inputs, et renvoi d'outputs) et dynamique (avec des liens persistants entre les objets), la paramétrie et l'associativité des données au sein de plusieurs maquettes, et la fédération de maquettes via des bases de données centralisées.**

À ce jour, ce type de cadre hautement collaboratif n'est pas mis en œuvre dans l'AEC, à l'exception (1) des maquettes BIM basées sur des méthodologies PDM/PLM, utilisant des outils logiciels hérités des industries plus digitalisées, comme CATIA, 3D Experience (Dassault Systèmes) ou Microstation (Bentley Systems), qui présentent des structures de données

arborescentes customisables à haute granularité permettant la co-modélisation multi-métier (2) de l'utilisation d'outils collaboratifs comme Flux.io⁸, une plateforme permettant l'interopérabilité dynamique BIM, ou un outil similaire comme Speckle⁹. **Cette revue de littérature montre que la voie vers une meilleure performance collaborative dans le BIM est ouverte par la convergence de différentes tendances, telles que l'utilisation de bases de données, la déduction et la transformation automatiques de données, les stratégies d'extensibilité des modèles de données, les cadres de travail multi-modèles, les optimisations multidisciplinaires et l'essor des technologies du web sémantique.**

2.1.5.2 Lacunes de recherche

Cependant, trois lacunes de recherche apparaissent en creux de cette revue de littérature. Tout d'abord, les notions de collaboration et d'interopérabilité sont trop rarement abordées conjointement. **Il semble que la question de la collaboration (interopérabilité métier) soit moins fréquemment abordée que celle de l'interopérabilité (interopérabilité technologique) ; et ces deux niveaux sont souvent déconnectés, décorrélés l'un de l'autre.** Très peu d'articles adoptent ce double angle en prenant en compte à la fois les aspects métiers et technologiques et la manière dont ils s'influencent mutuellement. **L'interopérabilité technique ne pouvant à elle seule résoudre les problèmes d'interopérabilité métier, et réciproquement, la question de l'interrelation entre ces deux types d'interopérabilité pourrait être davantage traitée. Elle peut être décomposée en deux sous-questions en miroir : (1) quel type de processus de collaboration (économiques, organisationnels, contractuels, humains) peut améliorer l'interopérabilité BIM ? (2) Quel type de processus digital peut améliorer la collaboration autour du BIM ?**

Cette 1^{ère} question vise à déterminer quel serait l'environnement type qui permettrait à une interopérabilité technique d'advenir. Quel type d'environnement commercial, contractuel, organisationnel pourrait le permettre ? Quel type d'organisation de projet favoriserait des

⁸ https://twitter.com/flux_io. This platform closed in April 2018.

⁹ <https://speckle.works/>

échanges robustes ? La 2^{nde} problématique questionne les utilisations de l'interopérabilité qui ont un réel impact sur la collaboration. Par exemple, comment les ingénieurs structure utilisent-ils réellement les MVD IFC *Structural Analysis* ? Comment la collaboration évolue-t-elle avec l'utilisation des technologies du web sémantique sur un projet donné ? Comment les acteurs du BIM réagissent-ils à un outil d'interopérabilité spécifique et comment cela reconfigure-t-il les pratiques collaboratives ? Alors que de nombreux nouveaux outils BIM dits *collaboratifs* sont mis sur le marché chaque jour, il serait intéressant de mesurer leur impact réel sur les organisations de projet. Aucun article n'aborde cette question, et de nouvelles études sont nécessaires pour fournir ce type de vision des impacts mutuels entre l'interopérabilité et la collaboration.

La 2^{ème} lacune dans la recherche concerne l'interrogation de données BIM. Il semble que ce besoin très élémentaire ait reçu peu d'attention dans la littérature scientifique. Très peu d'articles traitent de la difficulté de rechercher et retrouver des données BIM précises au sein d'un ensemble plus vaste. L'objectif collaboratif de récupération de données BIM (2^{ème} cadre analytique) n'est abordé que dans quatre articles, et l'approche de résolution par requêtes BIM (3^{ème} cadre analytique) est adressé par seulement deux articles. **Néanmoins, à notre connaissance, cette question correspond à un besoin fort sur le terrain du BIM en 2021 dans l'AEC. En effet, les acteurs BIM reçoivent souvent des fichiers BIM volumineux et ont besoin d'en extraire des informations spécifiques, sans avoir à naviguer dans la totalité d'une maquette BIM, ce qui est chronophage, source d'erreurs humaines, et requiert des compétences spécifiques (une compréhension de la structure d'une maquette BIM, par exemple). La réponse technologique à ce besoin organisationnel est de permettre d'interroger des données BIM – soit de formuler des requêtes BIM. Si une maquette BIM peut être interrogée efficacement, de manière robuste et fiable, le résultat de ces interrogations peut alors devenir l'unité d'échange BIM.** D'une certaine manière, c'est l'objectif initial d'une MVD : interroger et extraire les données nécessaires à un métier, pour un besoin spécifique. Cependant, comme mentionné précédemment, les développements de MVD sont coûteux, et malheureusement, tous les échanges BIM ne sont pas basés sur l'IFC. **Et si, au lieu d'échanger des fichiers, les acteurs BIM échangeaient des résultats de requêtes ? Et s'ils pouvaient effectuer les requêtes eux-mêmes ?** C'est ce qui se fait de façon informelle tous les jours sur le terrain dans le BIM, mais pas de façon robuste : les acteurs échangent des

fichiers BIM et en font des extractions partielles et manuelles. Si cela pouvait se faire de manière formelle, normée, la collaboration pourrait gagner en fluidité et en fiabilité.

La 3^{ème} lacune dans la recherche concerne l'interopérabilité BIM pour les bâtiments à géométrie complexe, qui est abordée dans très peu d'articles. Comme vu au chapitre 1, au cours des années 1990 et 2000, l'industrie de l'AEC a ouvert la voie et exploré une nouvelle gamme de techniques de représentation, de simulation, de fabrication et de construction, avec l'émergence du design computationnel. Les nouvelles technologies telles que le scan 3D, la photogrammétrie numérique, la robotique et la fabrication additive ont changé la façon dont les bâtiments peuvent être fabriqués et assemblés ; avec les logiques de customisation digitale de masse évoquée au chapitre 1, la géométrie orthogonale, plane, régulière, n'est plus une nécessité. Cela peut être considéré comme un changement de paradigme dans l'industrie du bâtiment. **Malheureusement, les logiciels BIM les plus utilisés ne prennent en charge que la géométrie basique, limitée aux surfaces planes et aux courbures simples. Par conséquent, les maquettes BIM dont la géométrie échappe à ces limites sont généralement éditées sur un mode mixte, entre un logiciel de modélisation NURBS ou free-form et un logiciel BIM classique, ce qui crée un fort besoin de passerelle d'interopérabilité entre ces deux outils. Étant donné l'importance du *Digital Turn* (Carpo, 2017) dans l'AEC, ce sujet pourrait faire l'objet d'une attention accrue dans le domaine de la recherche sur l'interopérabilité BIM.**

Ces perspectives et lacunes de recherche étant exposées, un saut dans le passé nous semble nécessaire pour comprendre comment ces questions étaient traitées dans une littérature scientifique plus ancienne.

2.2 État de l'art anachronique, 1989-1999

Nous étant attachés à remonter cette double piste de la collaboration digitale et métier dans le BIM, nous avons vu que ces deux aspects de la question ne sont que trop rarement traités de manière concourante : il y a une division dans l'approche même du sujet, avec certains travaux exclusivement dédiés à l'interopérabilité technique, et d'autres à la collaboration (aspect communicationnel, organisationnel, contractuel, économique).

Une plongée dans le passé pouvant parfois éclairer de manière surprenante le présent (et le futur), nous nous sommes demandé ce que donnerait cette même question au sujet de la collaboration et de l'interopérabilité BIM durant la période de gestation du BIM – dans les années 90 (Sattler, Lamouri, & Pellerin, 2020). Quid des perspectives sur la collaboration digitale dans le bâtiment, à une époque où le BIM en était encore à ses balbutiements ? Comment ce regard rétroactif peut-il éclairer les problématiques actuelles ? Pour répondre à cette question, nous avons mené une brève et restreinte revue de littérature, dont nous détaillerons la méthodologie dans la prochaine sous-section.

2.2.1 Méthodologie, corpus, cadre d'analyse

Durant la constitution du corpus de littérature scientifique, nous avons rencontré un premier obstacle méthodologique : notre question frise l'anachronisme. En effet, avant 2000, le BIM tel que nous le connaissons aujourd'hui n'existait pas ; comme vu au chapitre 1, il s'est développé dans le cercle des grands projets complexes de la 1^{re} décennie des années 2000, et démocratisée dans la décennie suivante (Sattler & Maigne, 2018). Dans les années 90, le BIM était en gestation, sous la houlette d'architectes pionniers comme Frank O. Gehry, Greg Lynn, Norman Foster ou Zaha Hadid.

Ainsi l'acronyme *BIM* avait une prégnance trop faible avant 2000, et pour évoquer la *collaboration BIM*, nous avons utilisé son synonyme de l'époque : le mot *intégration*. L'intégration désigne le processus qui consiste à articuler différents sous-systèmes en un système centralisé – en d'autres termes, il s'agit de transformer un système fragmenté en un système symbiotique (Burbidge et al., 1987). Comme le BIM, l'intégration relève à la fois d'un pendant organisationnel et digital.

Afin de collecter des articles, nous avons lancé deux groupes de mots-clefs dans la base de données SCOPUS, afférents à l'industrie du bâtiment en phase conception et construction (*AEC, Building Industry, Design and Construction*) et les différentes déclinaisons du mot intégration (*Integration, Integrated, Integrate*). Nous avons limité notre recherche aux articles publiés avant l'an 2000, que nous situons donc comme la date symbolique de naissance du BIM. Enfin, nous avons limité l'occurrence des mots cibles aux titres des articles, afin d'obtenir un échantillon certes restreint, mais pertinent et resserré. Notons que la présente recherche peut

être considérée comme un pré-échantillonnage, préalable à une étude plus vaste de la littérature scientifique à mener dans de futurs travaux. La chaîne de recherche est la suivante :

```
TITLE (( AEC OR "building industry" OR "design and construction" ) AND
(integration OR integrated OR integrate) ) AND PUBYEAR < 2000 AND
(LIMIT-TO ( SUBJAREA , "ENGI" ) OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP" ))
AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar")) AND (LIMIT-TO ( LANGUAGE ,
"English"))
```

Cette recherche a donné 19 articles, dont nous avons manuellement exclu six articles non afférents à l'industrie du bâtiment. Une lecture soignée de chaque article a fait émerger six thèmes récurrents, par les prismes desquels le corpus a été analysé.

2.2.2 Comparaison aux industries digitalisées

Il est courant d'évoquer le BIM comme un descendant du PLM – méthode de conception et gestion digitale de produit implémentée dans les industries manufacturières, automobiles et aéronautiques. Que nous dit ce corpus quant à ce référentiel pour l'industrie du bâtiment ?

Dans un article de 1987 (Howard et al., 1989), Howard commence avec ce constat : l'industrie du bâtiment est très fragmentée, et c'est une des causes de son retard en termes de digitalisation. Beaucoup serait à apprendre des industries manufacturières ou automobiles. Une emphase est mise sur un besoin urgent de gagner en productivité – productivité qui baisse dans le bâtiment, mais qui augmente dans les autres industries (Reinschmidt et al., 1991). Plusieurs articles (Alfares, M., Seireg, A., 1996; Yamazaki, 1992) évoquent directement la possibilité d'adapter le CIM (*Computer Integrated Manufacturing*) en CIC (*Computer Integrated Construction*). La Figure 21 montre qu'un modèle CIC implique d'interfacer intimement des processus et des données – ce qui aujourd'hui encore dans le BIM en 2021 est un vœu pieux. Au-delà du CIM, la notion d'ingénierie concourante (Evbuomwan & Anumba, 1998), alors implantée dans l'industrie manufacturière, semble aussi être candidate pour une application dans le bâtiment. Par ailleurs, le terme de *product-modeling*, venant du PLM, est dérivé en *project-modeling* (Luiten et al., 1998) : une appropriation directe de ce concept par l'industrie du bâtiment.

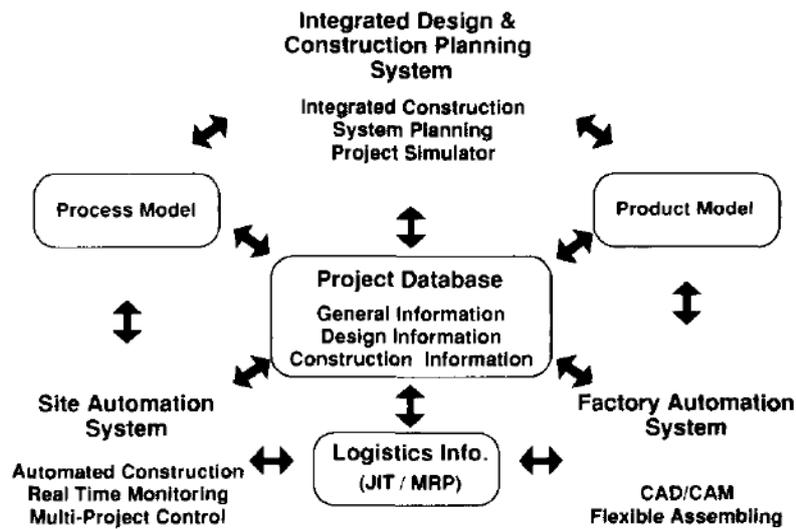


Figure 21 Vue conceptuelle du CIC - Computer Integrated Construction (Yamakazi, 1992)
Source: (Yamakazi, 1992)

Si les précédents articles invoquent généralement la fragmentation comme élément différenciant l'industrie du bâtiment des autres industries, Eastman (C. M. Eastman et al., 1993) insiste sur l'aspect holistique du projet de construction, basé sur une multiplicité de disciplines interconnectées, et propose d'approcher le sujet de l'intégration dans la construction via l'idée de *matrice*. Autre prise de distance vis-à-vis des autres industries : le bâtiment serait en retard en termes de digitalisation justement parce qu'on aurait voulu calquer ses déploiements digitaux sur le modèle du PLM (El-Bibany & Paulson, 1994), sans analyser sa capacité de se conformer à ce modèle. Par exemple, l'industrie du bâtiment n'est pas assez centralisée (Norton et al., 1995), ce qui n'est pas le cas de l'industrie manufacturière. Similairement, d'après Brown (Brown et al., 1995), le *product-modeling* n'est pas adapté au bâtiment, avec sa grande variété de métiers et de niveaux de détails. D'après lui, les développements digitaux dans l'AEC devraient être pensés via une approche globale, à l'échelle de l'industrie, et non via une approche locale par projet.

Ainsi, la question de l'intégration dans le bâtiment, originellement liée à une comparaison avec les industries plus digitalisées, se libère progressivement de ce référentiel, et est traitée sous l'angle de ses spécificités : une industrie décentralisée, impliquant une importante variété de métiers.

2.2.3 Conjonction de l'organisationnel et du digital

Comme mentionné plus haut, la conjonction des aspects organisationnels et technologiques fait défaut aujourd'hui dans le traitement du sujet de la collaboration BIM. Ce constat était-il valable à l'époque de la gestation du BIM ?

Howard (Howard et al., 1989) décrit le paradoxe suivant : l'introduction des ordinateurs dans l'industrie du bâtiment a modifié les manières de générer des documents à l'*intérieur* de certaines organisations, mais pas les méthodes d'échanges de données à l'*extérieur*, au-delà de certaines frontières organisationnelles, c'est-à-dire entre plusieurs entreprises. Il donne l'exemple de deux bureaux d'études, dont l'un produit des documents CAD, qui sont « dé-CADés » par le second via une impression papier, qui devra être re-digitalisée et éventuellement « re-CADée » par le premier lors d'une future itération. Paradoxalement, la digitalisation dans le bâtiment crée donc une couche supplémentaire de fragmentation, entre les digitalisés et les autres – ce qui ne va pas exactement dans le sens de l'intégration. Trente ans plus tard, ce constat est toujours valable au sujet du BIM : les entreprises qui n'utilisent pas de maquettes numériques extraient des données 2D des maquettes et produisent hors du circuit BIM. Howard émet donc l'idée que l'intégration dans l'AEC devrait induire de nouvelles dispositions économiques et organisationnelles, insufflées par les voies industrielles, mais aussi académiques.

Cette nécessité de modification structurelle de l'industrie du bâtiment pour supporter la digitalisation est actée dans la littérature (Fenves et al., 1990; Reinschmidt et al., 1991). Si la visée est bien, *in fine*, un système intégré de production *totale*, où le travail manuel serait réduit et beaucoup de tâches automatisées (Alfares, M., Seireg, A., 1996), il est préconisé d'appliquer l'intégration aux phases de conception et d'ingénierie, avant de l'étendre à la construction via la robotique, alors peu implantée dans le bâtiment (Yamazaki, 1992). Norton (Norton et al., 1995) évoque l'importance de se pencher sur les interfaces homme-machine, et de mettre en place de nouveaux cadres et processus de travail. D'après El-Bibany (El-Bibany & Paulson, 1994), une distinction s'impose entre intégrations logicielles et la collaboration humano-digitale ou homme-machine (*human-computer-based collaboration*). D'après lui, les précédentes recherches se concentrent sur le 1^{er} volet et pas assez sur le 2nd ; et la question de

la mise en œuvre d'une intégration technique dans l'organisation dynamique de l'industrie du bâtiment reste à résoudre.

Kiwan (Kiwan & Munns, 1996) souligne l'importance de créer une adhésion des utilisateurs aux systèmes digitaux. Une solution proposée est de calquer les processus digitaux sur les processus existants, à savoir les processus papier, afin de réduire la courbe d'apprentissage pour les utilisateurs. Il semble que cette préconisation ait été suivie, de fait ou à dessein, si on considère que les workflows BIM sont toujours basés sur les processus 2D, et que les plans et coupes restent les seuls documents contractuels utilisés pour la construction en 2021 en France. Plus ambitieux, Luiten (Luiten et al., 1998), conseille de faire découler les processus digitaux des activités cognitives à l'œuvre dans la conception et la construction – soit de s'appuyer sur la manière dont les professionnels « parlent et pensent ». Il évoque aussi un plan progressif de déploiement de processus collaboratifs digitaux : à l'intérieur d'une société, puis entre deux sociétés partenaires, puis entre plusieurs sociétés. Il est intéressant de noter que plus de 20 ans plus tard, la collaboration BIM fonctionne essentiellement dans le 1^{er} cas de figure : la collaboration inter-équipes et inter-métiers est toujours fastidieuse, traitée de manière ad hoc, et basée sur l'échange de silos de données. L'implémentation de l'ingénierie concurrente change, elle, radicalement la donne, et impose d'adopter des nouveaux processus économiques et organisationnels pour soutenir l'intégration (Evbuomwan & Anumba, 1998).

Il semble clair que dans les années 90, la mise en œuvre des processus collaboratifs digitaux n'était pas envisagée sans une évolution importante et conjointe des modalités de fonctionnement de l'industrie du bâtiment. La Figure 22 illustre cette approche, où les architectures de données sont mises en regard avec les processus de gestion de projet. **Or, cette conjonction des aspects technologiques et organisationnels est justement ce qui fait défaut aux réflexions similaires de la fin des années 2010.**

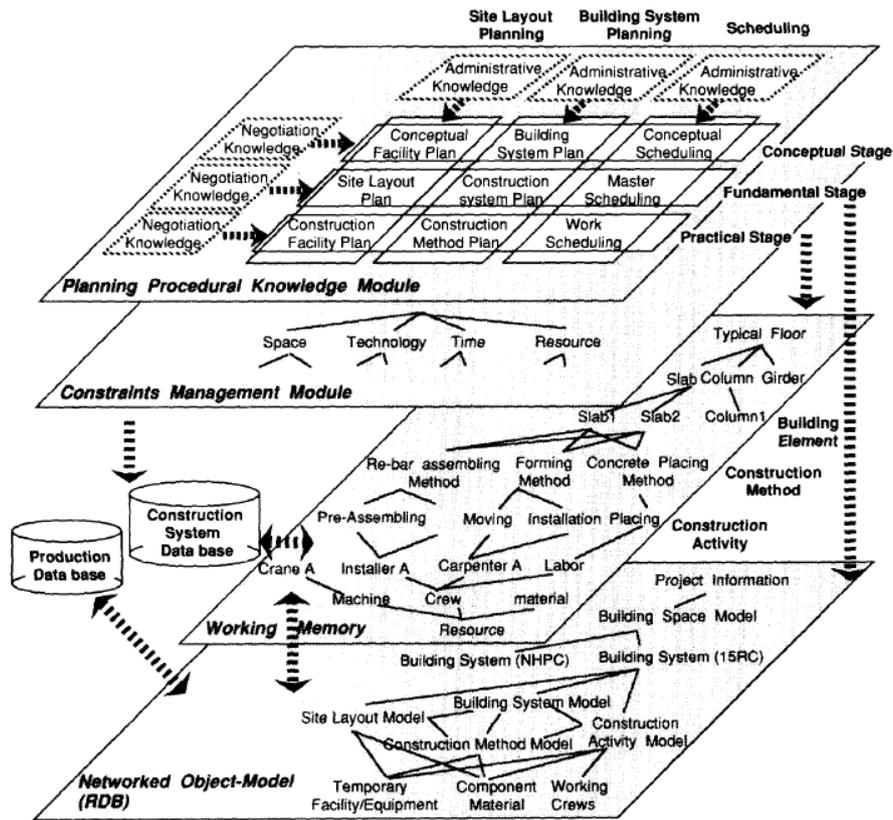


Fig. 3. System architecture.

Figure 22 Architecture du système CIC (Yamazaki, 1992)
Source : (Yamazaki, 1992)

2.2.4 Temporalités

Associée à une hausse de productivité, la pratique du BIM est souvent la promesse d'une accélération du processus de projet, et d'une diminution des délais – promesse non forcément tenue en pratique. L'analyse des temporalités évoquées dans notre corpus suggère trois catégories de temporalités associées à l'intégration.

Le 1^{er} besoin, c'est de *gagner du temps* (Fenves et al., 1990) : réduire les temps de construction (Howard et al., 1989), augmenter les vitesses d'assemblage, accélérer les cadences et la productivité (C. M. Eastman et al., 1993), supprimer tout délai, tout devant arriver « juste à temps » (Alfares, M., Seireg, A., 1996) – en un mot, ne pas « gâcher » de temps (Brown et al., 1995). C'est la 1^{ère} promesse de l'intégration : améliorer la productivité.

Le 2^{ème} besoin, lié au 1^{er}, c'est que tout arrive plus *tôt* (Alshawi & Underwood, 1996; Norton et al., 1995; Yamazaki, 1992) : l'idée est de procéder, en amont du projet, à des analyses et à des développements qui auparavant se faisaient en aval du projet. C'est la base de l'ingénierie concourante, qui ne peut se faire sans processus intégratif. Grâce à cette capacité d'intégrer dès la conception des paramètres qui auparavant n'étaient appréhendables que plus tardivement, beaucoup de décisions de conception sont prises plus tôt.

Le 3^{ème} besoin, en conséquence, c'est le *temps réel* (Howard et al., 1989), l'idée qu'à tout moment le processus de design peut-être impacté par un nouveau paramètre et que le processus de simulation peut être relancé (El-Bibany & Paulson, 1994; Luiten et al., 1998) : c'est le temps simultané (Evbuomwan & Anumba, 1998). Paradoxalement, c'est aussi le temps du *retour en arrière* : on peut toujours revenir une étape en amont, changer un paramètre et relancer un calcul. C'est enfin le temps *continu* qui sera évoqué des décennies plus tard au sujet l'industrie 4.0. D'après Luiten (Luiten et al., 1998), l'intégration devrait transformer le processus de construction en un « processus continu d'échange d'information, à travers lequel tous les acteurs seront impliqués à tout moment ».

En conclusion, il semble que dès les années 90, la promesse du temps réel et de la continuité temporelle se soit immiscée dans les considérations technologiques. En pratique, si on s'en est rapprochés, il semble que nous sommes aujourd'hui encore trop loin d'une telle temporalité : les projets BIM suivent toujours des enchaînements de phases top-down, par à-coups, et les différentes équipes ne collaborent pas en temps réel, mais via des soumissions séquentielles de silos de données (Ciribini et al., 2016).

2.2.5 Modèles de données

Au fil de notre corpus, un questionnement émerge – celui des modèles de données pour l'industrie du bâtiment.

Fenves (Fenves et al., 1990) propose un système intégré impliquant sept logiciels travaillant ensemble. Il se concentre sur l'idée d'articulation entre plusieurs systèmes, érigeant l'échange de données en atome du processus intégratif. Cette approche sera plus tard décriée par Norton (Norton et al., 1995), car jugée trop mécaniste et rigide. De plus, Norton souligne un manque

crucial dans l'industrie du bâtiment : celui d'un domaine de données commun – manque également décrit par Kiwan (Kiwan & Munns, 1996).

Un des freins évoqué à ce manque de modèle de données, outre le faible degré de standardisation de l'industrie du bâtiment, c'est la nature même de l'activité de conception, qui serait « à la fois la définition d'un domaine de discours, et l'exploration de ce domaine » (C. M. Eastman et al., 1993). De plus, l'unicité de chaque bâtiment mènerait de fait à explorer des pistes de conception ad hoc. Il est donc nécessaire d'après Eastman d'utiliser et construire des modules CAD modulaires et personnalisables. El-Bibany (El-Bibany & Paulson, 1994) évoque lui aussi la haute incertitude des modes de collaboration dans l'industrie du bâtiment, ainsi que celle du projet lui-même. Brown (Brown et al., 1995) rappelle que l'activité de conception est « marquée par la constante génération de nouvelles tâches cibles et de nouvelles contraintes liées à ces tâches ». Ainsi l'incertitude structurelle inhérente à tout projet de construction peut-elle compliquer la tâche de trouver un modèle de données commun à l'industrie du bâtiment.

Toutefois, un modèle émerge et s'impose dans la 2nde partie des années 90 : celui du modèle de données orienté objet (Brown et al., 1995; Kiwan & Munns, 1996; Alshawi & Underwood, 1996; Alfares, M., Seireg, A., 1996). Ce modèle permet d'envisager la maquette numérique comme un ensemble d'objets, ayant à la fois une *représentation* et un *comportement*, et pouvant donc encapsuler des règles métier. La modularité des composants (ou objets) ainsi que leur capacité de customisation répond aux exigences mentionnées par Eastman (C. M. Eastman et al., 1993).

Ce consensus a fait son chemin depuis dans l'industrie du bâtiment : la majorité des logiciels de modélisation BIM (comme Revit, ou Tekla) utilisés aujourd'hui sont orientés objet, de même que les logiciels de programmation visuelle comme Grasshopper (qui permet de définir des objets) – et bien sûr, le format standard qu'est l'IFC. Toutefois, il semble que cette recherche de modèles de données ait occulté la nécessité de traiter la question des échanges de données, et on voit aujourd'hui ressurgir dans la littérature BIM l'approche de Fenves (Fenves et al., 1990), avec des approches multi-modèles et multi-disciplinaires (Díaz et al., 2017; Fuchs & Scherer, 2017; Perisic et al., 2016).

2.2.6 Processus dynamiques

On retrouve tout au long du corpus un invariant : la question des liens dynamiques qui composent et environnent la maquette numérique.

Le 1^{er} type de lien, qui peut sembler aller de soi de nos jours, ce qui n'était pas le cas dans les années 90, c'est le lien entre l'utilisateur et la maquette numérique, soit la notion d'*interactivité* (qui semble aujourd'hui désuète, mais a en réalité été remplacée par la notion très en vogue d'*expérience utilisateur*). Plusieurs articles ont recours à ce terme : Fenves (Fenves et al., 1990) parle de représentation graphique interactive ; Norton (Norton et al., 1995), en évoquant une interface homme-machine interactive, rappelle que « l'intervention de l'utilisateur est un ajout souhaitable au système », comme si la communication homme-machine n'allait pas de soi. Cela nous rappelle un temps où les interfaces digitales étaient peu maniables (pas intuitives, et encore moins *user-friendly*).

Le 2^{ème} type de lien, c'est un lien entre les objets digitaux eux-mêmes, qu'on retrouve avec l'utilisation des bases de données relationnelles (Fenves et al., 1990; Reinschmidt et al., 1991), de systèmes de données hiérarchisés (Yamazaki, 1992), établissant des réseaux d'objets liés entre eux, des subtypes/supertypes et systèmes d'héritage (Alshawi & Underwood, 1996). Ceci préfigure les structures de données orientées-objet mentionnées plus haut, et en particulier la naissance du format IFC. Par ailleurs, ces liens peuvent être définis par un modèle de données préalable, mais aussi par l'utilisateur, qui va créer son système de liens, pour répondre à l'aspect ad hoc de chaque projet. (Norton et al., 1995).

Le 3^{ème} type de lien est similaire au second, mais avec une notion d'automatisation plus forte. Les objets deviennent autonomes, et échangent entre eux via des règles et « systèmes experts ». Ainsi, Eastman (C. M. Eastman et al., 1993) envisage que chaque module d'une maquette communique ses « interdépendances » avec tous les autres modules, ce qui 30 ans plus tard dans le monde du BIM, est encore un vœu pieux. El-Bibany (El-Bibany & Paulson, 1994) propose une « représentation unifiée basée sur la contrainte », c'est-à-dire une gestion des objets par des sets de contraintes paramétriques – « dépendances dynamiques de données ». La visée est la propagation automatique de modifications à tous les objets concernés, basées sur des échanges et comportements dynamiques entre les différents modules de données (Brown et al., 1995;

Kiwan & Munns, 1996). Ici est pensée une sorte de paramétrie totale entre objets, multi-métiers, multi-phases.

Cette vision d'une intégration mettant en place un système de liens dynamiques très forts domine dans le corpus – à la fois via une incorporation totale des utilisateurs au système digital, et via une autonomie de ce système. La notion d'objets interconnectés propageant des informations via leurs dépendances à travers les différentes équipes et différentes phases d'un projet n'est toujours pas réalisée aujourd'hui, ni en contexte intra-métier ni en contexte inter-métiers. On notera aussi l'évolution et les glissements sémantiques de ces termes : il semble que la notion d'interopérabilité, massivement convoquée par la littérature scientifique des années 2010, correspondrait à ce qui dans les années 90 était appelé interactivité – mots qui, comme évoqué dans le chapitre 1, ont des significations étymologiques très proches, évoquant peu ou prou l'idée d'une action collective.

2.2.7 Anticipations et prospectives

Notre corpus traitant de l'intégration dans l'industrie du bâtiment, à une époque où sa digitalisation était encore balbutiante, on retrouve au long des articles beaucoup de projections dans le futur. Que nous disent-elles vis-à-vis des développements actuels ?

Howard (Howard et al., 1989) liste les technologies à déployer pour l'intégration dans le bâtiment (Figure 23). La 1^{ère} selon lui est celle des bases de données graphiques et non graphiques ; en 2^{ème} place vient l'intelligence artificielle, puis l'automatisation et la robotique. Ces trois dernières technologies sont, au moment de la rédaction de cette thèse, encore très peu déployées dans le bâtiment, et la 1^{ère}, encore largement sous-exploitée. Howard anticipe les « bases de données de l'an 2000 » qui pourraient conserver toute trace de toute version d'un projet, proposer un système de référencement spatial pour l'automatisation du contrôle des machines de construction, et représenter un modèle *as built* parfait. Considérant qu'en 2021, le versionnement complet d'un projet à un niveau de granularité élevé n'est jamais implémenté, que les chantiers fonctionnent encore largement avec de la main-d'œuvre manuelle, et que faire le pont entre des nuages de points issus de scans 3D et des maquettes numériques orientées objet est encore une bravade, on peut penser qu'Howard a été un peu optimiste. Sur le même ton, Fenves (Fenves et al., 1990) évoque des « experts de substitution » (*surrogate experts*) qui

viennent faire des ponts et agir entre différents logiciels. L'intelligence artificielle, prenant en charge une partie du travail de l'ingénieur, est ici portée au niveau des flux de travail collectif : au niveau des échanges de données. On a donc ici l'idée d'une automation de l'intégralité du processus de conception. Dans la mesure où le *rule checking* automatisé est encore peu mis au point dans le bâtiment, et les workflows encore envisagés de manière ad hoc et manuelle, il semble qu'il y ait encore du chemin à parcourir.

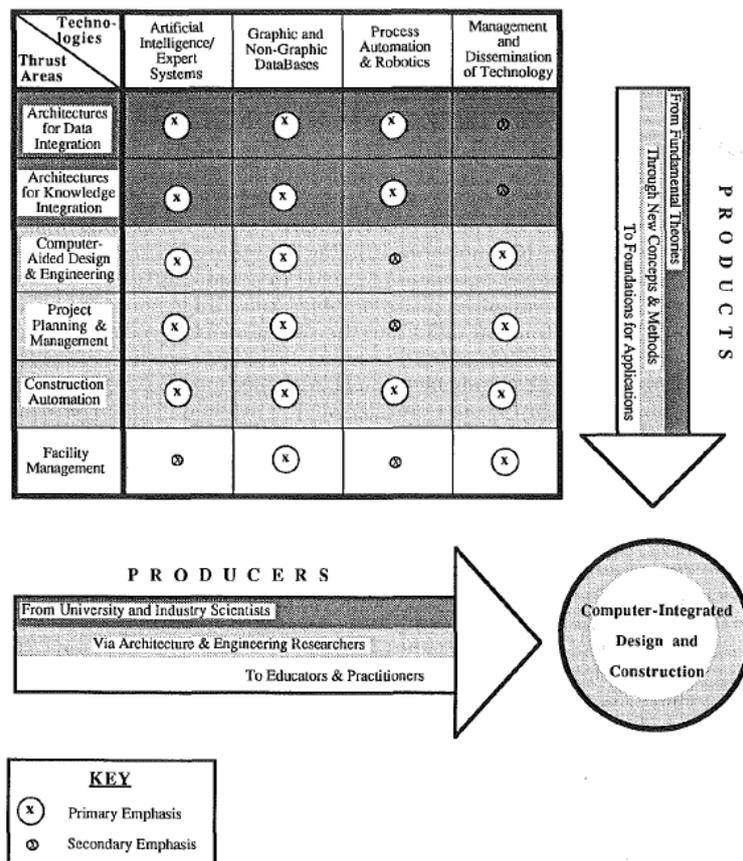


Figure 23 Prospective pour l'intégration digitale dans le bâtiment (Howard, 1989)
Source : (Howard et al., 1989)

Eastman (C. M. Eastman et al., 1993) rêve de l'avènement de logiciels commerciaux dotés de modules intelligents, avec implémentation automatisée de règles métier à différents niveaux : au niveau d'une discipline (structure, plomberie, etc.), et au niveau du programmes des bâtiments (hôpitaux, écoles, etc.). À la lumière de la pratique du BIM en 2021, il semble que ces prédictions se soient partiellement réalisées : comme mentionné plus haut, la plupart des logiciels BIM sont orientés objet, et proposent des « modules intelligents » dans des

bibliothèques de composants BIM. Toutefois, l'intégration automatisée de règles métier ne va pas encore de soi. Tout d'abord, à un niveau de granularité assez bas, comme celui d'un composant de structure par exemple, les objets BIM sont rarement complètement personnalisables, ce qui est source de frustrations ; comme vu dans le chapitre 1, ils peuvent alors être vus comme des obstacles plutôt que comme des outils. Ensuite, l'implémentation de règles métier à un niveau élevé dans la conception (comme la partition d'espace) est encore balbutiante (Morel & Girard, 2017): elle se fait dans certaines agences d'architectures utilisant des outils de programmation comme Grasshopper, mais la partie de la conception qui consiste à analyser des règles (liées au programme, ou à la réglementation urbaine) et à les mettre en œuvre est encore majoritairement manuelle. Ceci est en passe de changer dans les années à venir, en témoignent des outils populaires comme TestFit.io¹⁰, qui mettent en place des routines de partitionnement d'espace automatisées, qui, même si elles sont encore sommaires, montrent qu'une voie vers l'automatisation de ces tâches est ouverte.

On retrouve d'autres considérations qu'aujourd'hui encore on qualifierait de futuristes. Alfares (Alfares, M., Seireg, A., 1996) investigate la possibilité d'automatiser totalement la construction d'un bâtiment en béton armé. Il décrit un cadre où les robots reçoivent des « instructions complètes » depuis une base de données, à travers laquelle toutes les informations transitent. En 2021, on est encore loin de ce stade – le travail sur le chantier reste en grande majorité manuel – et les robots sont rarement présents... Quant à Luiten (Luiten et al., 1998), il expose les prérequis pour l'implémentation de systèmes intégratifs dans le domaine de la conception et construction. Ainsi l'infrastructure logicielle idéale ne devrait requérir aucune interaction humaine pour interpréter ou transférer la donnée...

Les anticipations du corpus nous montrent qu'un rêve d'automatisation plus complet était à l'œuvre dans les années 90, touchant toutes les couches de l'industrie du bâtiment : la conception architecturale, l'ingénierie, la construction.

¹⁰ <https://testfit.io/>

2.2.8 Discussion

Parmi les promesses technologiques formulées dans les années 90, nous avons pu identifier celles qui se sont réalisées – et celles dont la tenue reste à venir. **Le développement d'un modèle de données commun était très manifestement une gageure importante à réaliser à l'époque. Même si l'IFC, format neutre de facto de l'industrie du bâtiment, est aujourd'hui considéré comme imparfait par les industriels, il n'en est pas moins une base commune utilisée actuellement dans la grande majorité des projets BIM, avec laquelle tous les logiciels sont globalement compatibles (même si le degré de compatibilité fait débat). Même constat pour la modélisation orientée-objet, qui est la règle pour les logiciels de modélisation BIM, désormais largement répandus. Étant donné que l'industrie du bâtiment partait de zéro sur ces sujets, un long chemin a été parcouru, et a partiellement porté ses fruits. La prise de distance vis-à-vis des logiques PLM a sans doute été une étape importante pour développer ce modèle de données commun ; toutefois, un retour à ce référentiel pour traiter la problématique des échanges de données de manière globale semble souhaitable.**

Par ailleurs, certaines anticipations de l'époque de la gestation du BIM nous semblent encore futuristes aujourd'hui : le temps réel et continu n'est toujours pas la cadence par défaut des projets de bâtiment, pas plus qu'une interconnexion fine entre les données BIM à travers les différentes équipes n'est mise en place. L'intelligence artificielle est peu employée, si ce n'est dans quelques programmes de recherche de pointe, et les chantiers ne sont ni automatisés ni robotisés. **Il semble qu'une vision plus holistique de l'intégration dans le bâtiment était à l'œuvre dans les années 90 : à la fois dans la vision technologique d'une sorte de paramétrie et interdépendance totale des différentes données, et dans l'articulation de cette vision technologique avec une réforme des dispositions humaines, organisationnelles, contractuelles et économiques de l'industrie du bâtiment.** En témoigne ce diagramme de Brown (Figure 24) qui met en regard, dans une troublante spatialité 3D, les processus de gestion de projet (« *Design, Construction, Procurement*»), les architectures arborescentes de données, et les différentes manières dont les multiples utilisateurs (« *Observer 1, Observer 2*»), vont utiliser ces données – préfigurant les vues métier. **Ce rappel d'une intrication de ces deux aspects, technologique et organisationnel, nous semble crucial aujourd'hui, dans la**

mesure où le développement du BIM se heurte encore régulièrement aux modes opératoires traditionnels toujours à l'œuvre dans le bâtiment – modes qui, malgré la digitalisation, n'ont pas encore été réellement et sérieusement remis en cause.

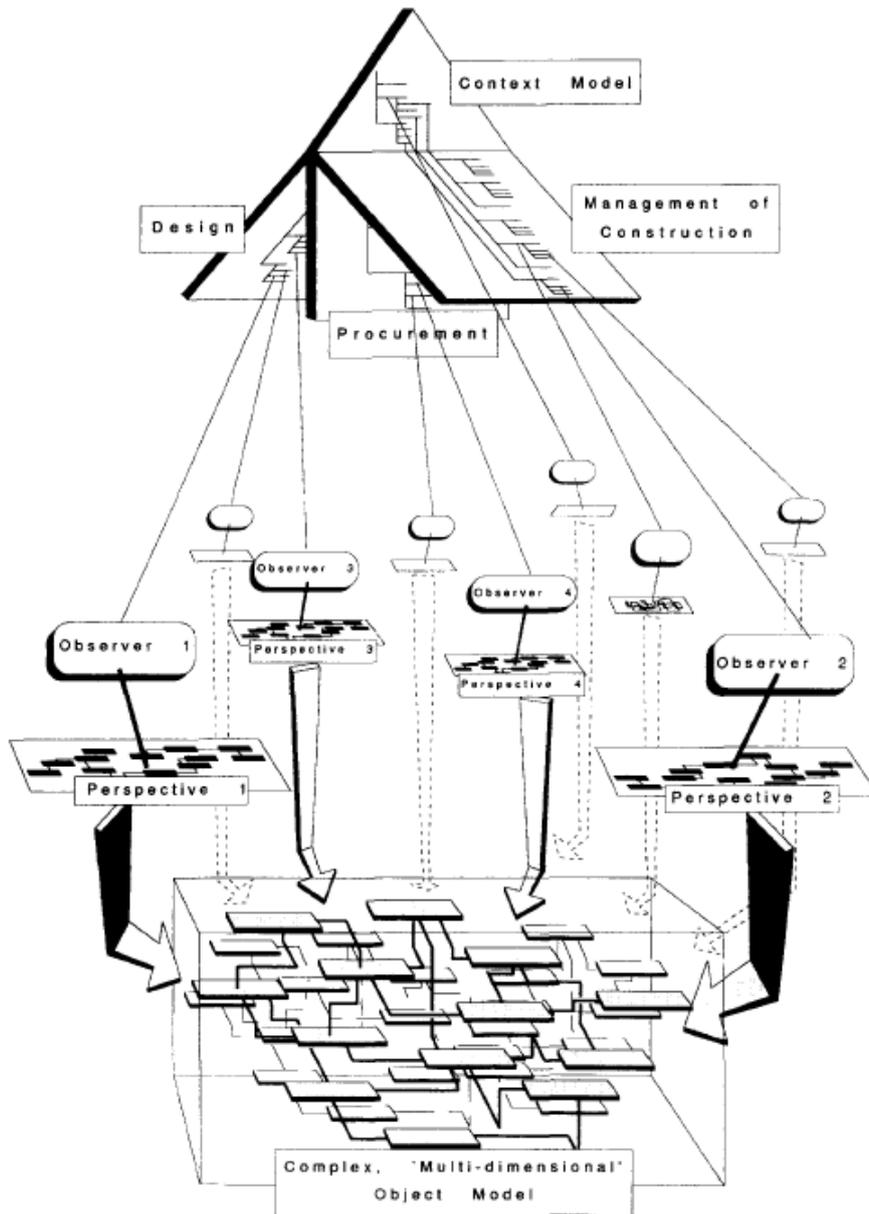


Figure 24 Vision holistique de la collaboration digitale dans le bâtiment (Brown et al, 1995)
Source : (Brown et al., 1995)

2.3 État de l’art actualisé, 2019-2021

Après ce saut dans le passé, un retour au présent s’est avéré nécessaire, afin d’actualiser l’état de l’art original, dont la période d’étude allait jusqu’à 2018. Nous avons donc lancé une dernière chaîne de recherche dans SCOPUS, identique à la chaîne originale, couvrant simplement la période des trois années de la rédaction de cette thèse, soit 2019, 2020 et 2021 :

```
TITLE-ABS-KEY ( BIM AND ( interoperability OR interoperable ) AND  
(conversion OR exchange OR translation OR mvd OR ifc OR integration OR  
integrated OR collaboration OR collaborative OR cooperative OR cooperation  
OR coordination OR interaction) ) AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE , "ar" ) OR  
LIMIT-TO ( DOCTYPE , "re" ) ) AND ( LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2021 ) OR  
LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2020 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2019 ) )
```

Nous avons ainsi collecté 107 articles, et pratiqué le même type d’exclusions que dans l’état de l’art original, lié aux phases AEC traitées (la conception et la construction, excluant donc les questions d’interopérabilité BIM-SIG et BIM-FM) ; en revanche nous avons conservé les revues de littérature, et ajouté un type d’exclusion – nous n’avons conservé que les articles qui traitent directement de la question de l’interopérabilité au niveau général de l’industrie AEC, et exclu les sujets métiers trop spécifiques. Nous avons obtenu un corpus de 18 articles, que nous analyserons ci-dessous, selon un cadre d’analyse en trois catégories : les résolutions d’interopérabilité basées sur une amélioration de la création et utilisation d’IFC ; les résolutions d’interopérabilité technologique allant au-delà de la question de l’IFC ; et les résolutions d’interopérabilité à un niveau organisationnel.

2.3.1 Amélioration de la création et utilisation d’IFC

Dans la suite des travaux sur la vérification de MVD, évoqués précédemment (section 2.1.4.2.2), les efforts de validation d’IFC en regard de certains MVD progressent, en particulier pour les MVD *Coordination View 2.0* et *Cobie (Construction Operations Building Information Exchange)* (Y.-C. Lee et al., 2021) ; les industriels, chercheurs et gouvernements sont notamment enjoins à collaborer pour développer des processus de formalisation des développements de MVD (Y.-C. Lee et al., 2019).

Akanbi et al. (Akanbi et al., 2020) proposent la création d’un algorithme pour automatiser et normaliser l’extraction de quantitatifs (QTO, *Quantity Take-Off*) depuis un format IFC, quel

que soit le logiciel d'édition IFC. Les auteurs procèdent à la rétro-ingénierie d'un IFC via une analyse géométrique, et la création d'une MVD spécifique pour un QTO. Il s'agit d'une analyse déductive d'informations contenues dans un fichier IFC – soit, en d'autres termes, d'un *post-traitement* voire d'une *correction* de celui-ci. Wu et al. (J. Wu & Zhang, 2019) proposent une méthode pour reclassifier automatiquement au sein d'un IFC les objets BIM mal classifiés au moment de l'export. Ici encore, il s'agit de *corriger* un IFC qui n'aurait pas été correctement généré. Dans la même veine, Koo et al. (Koo et al., 2021) proposent un processus de vérification du mapping IFC à l'aide de méthodes de deep learning, notamment via le modèle *Multi-View Convolutional Neural Network* (MVCNN) – afin d'améliorer un export IFC pour un logiciel donné.

Le deep learning, ou apprentissage profond en anglais est « un ensemble de méthodes d'apprentissage automatique tentant de modéliser avec un haut niveau d'abstraction des données grâce à des architectures articulées de différentes transformations non linéaires » (Wikipedia, n.d.), basé sur des réseaux de neurones artificiels (*Neural Network*, NN). Tout comme le machine learning, le deep learning est prometteur, mais encore très peu mis en œuvre dans l'AEC.

Ces trois travaux proposent de rendre plus robustes les processus d'exports IFC, ou de post-traiter des IFC créés via des processus d'export IFC non optimaux. On pourrait arguer que la responsabilité de la qualité des exports IFC devrait idéalement incomber aux éditeurs de logiciels BIM, qui seraient alors garants de leur robustesse – surtout pour les éditeurs ayant un monopole, et étant à l'origine de la création du consortium qui a créé ... l'IFC, justement. Avec ces trois études, on voit que des chercheurs prennent en charge un travail qui devrait idéalement revenir aux éditeurs de logiciels BIM, ce qui mène à considérer la question de l'interopérabilité BIM sous l'angle des modèles d'affaires. Qui a un véritable intérêt économique dans les échanges BIM autour d'un format neutre et ouvert ?

2.3.2 Amélioration de l'interopérabilité technologique au-delà de l'IFC

Dans cette catégorie, certaines études se situent dans une continuité avec des efforts soulignés dans l'état de l'art original. Par exemple, Sibenik et al. (Sibenik & Kovacic, 2020) prônent des

échanges de données inter-métier utilisant à la fois des modules d'interprétation, pour traduire une information d'un métier vers un autre, et des modules de certifications de données. On retrouve ici la fusion de deux approches vues précédemment : la transformation et déduction automatisée de données d'un métier à l'autre (section 2.1.4.2.1) et la validation de ces données (section 2.1.3.4 et 2.1.4.2.2). Dans la lignée des approches de résolution par utilisation des technologies du web sémantique (section 2.1.4.3.4) une étude (Tchouanguem Djuedja et al., 2021) utilise le web des données (*Linked Data*) pour faire le lien entre deux métiers AEC.

2.3.2.1 Intégration BIM et blockchain

Xue et al. (Xue & Lu, 2020) proposent un processus de transaction sémantique différentielle (*Semantic Differential Transaction*, SDT) afin d'intégrer le BIM aux technologies de la blockchain. D'après les auteurs, l'utilisation de la blockchain, par la transparence intrinsèque qu'elle établit, instaurerait mécaniquement une confiance des utilisateurs dans les données BIM – ce qui lèverait un obstacle structurel à la collaboration dans l'AEC, celui de la défiance mutuelle entre différents acteurs :

“A blockchain is a cryptographically secured distributed ledger within a decentralized consensus mechanism [...]. It keeps an immutable, secure, and transparent database through which users can transact valuable assets in a public and pseudonymous setup without the presence of an intermediary or central authority [...] Traditional exhortations of trust building have a strong root of normativism. According to this school, trust is a quintessence to business success [...] Untrusting behavior in construction transactions is a state that is accepted as natural, like it or not. However, blockchain adopts an alternative approach by keeping custody of immutable, cryptographic, and verifiable information in decentralized ledgers that construction stakeholders cannot deny or falsify but choose to trust each other.”

L'échange basé sur une SDT va capturer uniquement des différences entre une maquette et sa version précédente – sans besoin donc de processus de versionnement formalisé – et réduire les redondances liées à la richesse sémantique du format IFC, de manière à intégrer en temps réel

une maquette IFC dans une blockchain. **Cette étude adresse, via l'utilisation de la blockchain, deux problématiques non résolues dans le BIM : la certification de données, la question de la confiance dans les données ; et la question du temps réel dans les flux de données BIM – la SDT permettant de s'éloigner définitivement de la soumission séquentielle de données BIM.**

2.3.2.2 Utilisation de signatures invariantes

Deux articles (Ren & Zhang, 2021; J. Wu et al., 2021) explorent l'utilisation de signatures invariantes (*Invariant Signatures* en anglais) pour résoudre les problèmes d'interopérabilité BIM. Une signature invariante est une sorte de *marque* unique d'un objet BIM, fruit de ses caractéristiques propres, défini ainsi par Wu et al. (J. Wu et al., 2021) :

“The invariant signature of an AEC object [...] is a set of intrinsic properties of the object that distinguish it from others and that do not change with data schema, software implementation, modeling decisions, and/or language/cultural contexts.”

En d'autres termes, la signature invariante d'un objet BIM est la *trace* du produit de toutes ses caractéristiques géométriques (positionnement, morphologie) et non-géométriques (matériau, nom, etc.). Pour chaque objet, cette signature est *unique*, *ontologique* (c'est le reflet de la définition de cet objet) et *universelle* (elle ne dépend pas du modèle de données ou langage informatique qui a servi à créer cet objet BIM).

Les deux articles proposent d'implémenter un système de signatures invariantes, notamment orientées sur les propriétés de matériaux, afin de faciliter les transferts entre deux maquettes BIM de différents métiers. En effet, une signature invariante peut être considérée comme l'analyse systémique et exhaustive d'un objet BIM, quel que soit le modèle de données dont il est issu. Ainsi, la signature invariante d'un objet ou set de données BIM peut devenir un support neutre pour toute analyse de données en aval (comme la création de vues métier, ou les processus de déduction de données), sans dépendance en amont à une structuration de données. Des workflows basés sur l'utilisation de signatures invariantes permettraient donc de s'affranchir des classes et schémas de données BIM – et donc des problématiques de conversion et de mapping entre les différents modèles de données.

Enfin, Wu et al. (J. Wu et al., 2021) insistent aussi sur le fait que la notion même de signature vient de considérations sur la cognition humaine :

“The idea of invariant signatures for AEC objects originated from how objects were visually detected and how concepts were rigorously defined in neural signatures and mathematical signatures, respectively. For visual detection of objects, the mystery of how the brain works is gradually being unraveled with the development in biology, especially the perceptual system, i.e., how people recognize an object by patterns and features.”

Cela n'est pas sans rappeler la considération de Luiten (Luiten et al., 1998), évoquée précédemment (section 2.2.3) qui ambitionnait de faire dériver les futurs processus BIM des activités cognitives à l'œuvre chez les acteurs de l'AEC – c'est-à-dire des activités métier effectuées par les humains, comme analyser un plan, ou une maquette 3D. Ici c'est l'idée qu'une machine puisse *reconnaître*, et *interpréter* un objet – de la même manière qu'un cerveau. **Cette piste est très prometteuse et stimulante : l'idée de s'affranchir des modèles de données et d'assumer une hétérogénéité totale des données AEC laisse rêver à une sorte d'interopérabilité universelle, qui n'a pas besoin de standard neutre, si ouvert soit-il. Avec la prospective suivante : les signatures invariantes permettraient d'appréhender, in fine, toutes les modélisations BIM, quels que soient les modèles de données les sous-tendant (modèles de données forcément imparfaits et incomplets, qui plus est) – ce qui rendrait caduque l'idée même de formats ou de conversion.**

2.3.2.3 Utilisation de requêtes

Deux études mentionnent l'utilisation de requêtes. Krijnen et al. (Krijnen & Beetz, 2020) proposent une nouvelle méthode de sérialisation de l'IFC afin d'optimiser ce format pour le lancement de requête. En effet, la nature *text-based* du format IFC allonge le processus de requêtes – contrairement au format binaire, plus adapté. **Originellement, les auteurs soulignent au début de l'article la nécessité, dans la collaboration BIM, d'extraire de petits sets de données, très précis, orientés métier – ce que l'IFC ne permet pas optimalement. Les auteurs anticipent les trois cas d'usages du BIM à venir avec le big data : la**

communication de machine à machine, les requêtes efficaces de données, et la gestion de larges sets de données.

Costa et al. (Costa & Sicilia, 2020) analysent le potentiel des langages de requêtes du web sémantique pour faciliter la transformation de données d'un domaine AEC à un autre. Les auteurs suggèrent qu'afin de débloquent les problèmes de mapping entre deux ontologies, les utilisateurs devraient pouvoir intervenir, et orienter le mapping de données comme ils l'entendent, de manière à récupérer des données formatées selon leurs besoins ; **émerge ici le besoin de développer des interfaces user-friendly pour que ces utilisateurs puissent eux-mêmes formuler des requêtes SPARQL. Les auteurs recommandent donc à la communauté de chercheurs de créer des outils permettant éditer, manager, utiliser, et réutiliser des requêtes.**

2.3.3 Amélioration de l'interopérabilité métier

Dans cette catégorie, les articles abordent l'aspect organisationnel de l'interopérabilité. Aranda et al. (Aranda et al., 2020) conçoivent un workflow relativement rudimentaire pour mieux gérer l'interopérabilité entre plusieurs logiciels pour les projets d'infrastructures routières : ils anticipent simplement quel logiciel sera utilisé à quelle étape, et comment échanger les données aux étapes clés, c'est-à-dire qu'ils organisent le travail – sans même ajouter d'automatisation. Sur plusieurs projets d'un même bureau d'étude, ils évaluent à 30% la réduction de coût résultant de la mise en place de cette méthode. You et al. (You & Wu, 2019) proposent, pour les entreprises de construction, d'intégrer les données BIM aux systèmes ERP (*Enterprise Resource Planning*) ; l'idée est de mieux intégrer la gestion de projet (et dont participe le BIM) à la gestion globale des affaires d'une entreprise donnée.

Ozturk (Özturk, 2020, 2020) conclut deux revues de littérature sur l'interopérabilité BIM en soulignant un fort besoin en recherches sur le volet organisationnel de l'interopérabilité BIM, notamment sur le lien entre les processus digitaux et métier, enjoignant à des recherches plus holistiques sur l'intégration BIM. Il suggère de baser la collaboration BIM sur une meilleure encapsulation des connaissances métier et sur une gestion automatisée des données et flux de données – notamment via les technologies du web sémantique.

Soman et al. (Soman & Whyte, 2020) étudient le chemin à parcourir pour l'implémentation de méthodes de *data science* telles que le *machine learning* ou le *data analytics*, à savoir : la création de données BIM interprétables par des ordinateurs, soit des données *machine readable*. D'après les auteurs, les données générées dans l'AEC sont encore trop peu analysables et utilisables par des algorithmes, car trop hétérogènes et parcellaires ; et cette mauvaise qualité de données résulterait des failles organisationnelles de l'AEC, qui conduisent les acteurs à ne pas faire confiance aux datas – et, bien souvent, à court-circuiter les workflows digitaux pour revenir à des méthodes traditionnelles. **Afin d'améliorer la qualité de ces données, et les rendre utilisables pour des algorithmes, les auteurs enjoignent la communauté BIM, incluant les acteurs du terrain et les chercheurs, à travailler ensemble pour développer des workflows assurant la *machine-readability* des données, sans éluder la réalité des workflows traditionnels et institutionnels de l'AEC – fragmentés et hybrides.**

Shirowzhane et al. (Shirowzhan, 2020) mettent en balance le concept d'interopérabilité avec celui de compatibilité – qu'ils définissent ainsi :

« Compatibility can be defined as the degree that the technology is consistent with the user's experience, needs and values »

La compatibilité BIM serait donc le degré d'adéquation entre la technologie du BIM et l'expérience d'un utilisateur, et son besoin métier ; **la compatibilité correspondrait au pendant métier ou organisationnel de l'interopérabilité, tel que défini dans la section 1.4.1.** D'après les auteurs, une immense lacune dans la recherche persiste à ce sujet – qu'il aurait fallu étudier avant d'investiguer le champ de l'interopérabilité. Cette notion aiderait à mesurer l'adoption du BIM à un niveau organisationnel – les auteurs recommandent plus d'attention scientifique au champ de la compatibilité BIM.

2.3.4 Discussion

Entre 2018 et 2021, le paysage de la littérature scientifique autour de l'interopérabilité du BIM a évolué : on voit apparaître un fort engouement pour la question des workflows et pour le volet organisationnel et économique de l'interopérabilité. Il semble clair pour la communauté de chercheurs autour du BIM qu'on ne peut améliorer les échanges de données BIM sans repenser les organisations du travail afférentes aux flux de données

BIM. La littérature scientifique compte aussi de plus en plus de travaux sur la question du web sémantique, et plus généralement, sur une approche analytique des données, via intelligence artificielle et machine learning, ce qui amène la nécessité de rendre ces données plus facilement lisibles par des ordinateurs. **Il semble ici qu'un tournant décisif est sur le point d'être pris, avec d'un côté une accélération technologique du côté big data, et une prise de conscience de la nécessité de mener une conduite du changement plus profonde en ce qui concerne la digitalisation de l'AEC.**

2.4 Conclusion

Le 1^{er} volet de cet état de l'art montre qu'entre 2013 et 2018, la question de l'interopérabilité BIM n'était pas assez traitée via un angle organisationnel ; le 2^{ème} volet montre que dans la période des prémices du BIM, entre 1990 et 2000, la question des échanges de données était traitée d'un point de vue holistique et global, avec une conjonction des aspects technologiques et organisationnels; le 3^{ème} volet montre qu'entre 2019 et 2021, la communauté scientifique a réintégré petit à petit cette question organisationnelle au cœur du débat sur l'interopérabilité.

Alors que les approches de résolution des problèmes d'interopérabilité technologique semblent sur le point d'embrasser les logiques du big data, via notamment le web sémantique et l'intelligence artificielle, il semble que la question triviale pour un utilisateur BIM lambda de retrouver du contrôle sur des données BIM hétérogènes constitue une lacune assez forte dans la littérature scientifique – et ce alors même que cette question est à la jonction d'un besoin métier et organisationnel (le besoin de retrouver des données) et une solution technique (les requêtes sur des bases de données). Nous montrerons dans le chapitre suivant comment la question des requêtes BIM peut être un levier pour améliorer l'interopérabilité BIM.

Chapitre 3. Proposition d'un workflow de co-modélisation par requêtes et enrichissements de données

La revue de littérature du chapitre précédent a permis de tirer deux grandes conclusions : d'une part, il semble que les questions relatives à la collaboration (interopérabilité métier) et à l'interopérabilité (interopérabilité technique) BIM soient souvent déconnectées l'une de l'autre ; d'autre part, l'action consistant à rechercher et retrouver un sous-ensemble de données BIM spécifique au sein d'un ensemble plus large n'est pas assez traitée ; bien qu'il s'agisse de la base de toute action collaborative, elle n'est pas considérée dans la littérature comme un moyen pour résoudre les problèmes d'interopérabilité. En effet, les acteurs du BIM s'échangent toujours de gros fichiers silotés, dont ils doivent extraire des informations spécifiques ; à ce jour, cette étape n'a pas encore été normalisée ni automatisée. Sur le terrain, « *l'extraction des données BIM n'est pas encore une tâche facile* » (Solihin et al., 2017) : elle ne se fait pas encore de manière simple et robuste.

Par conséquent, nous formulons l'hypothèse suivante : une solution pour répondre aux besoins de collaboration BIM consisterait à améliorer l'interopérabilité BIM via une facilitation du processus consistant à interroger les bases de données BIM (Sattler, Lamouri, Pellerin, Deneux, Larabi, et al., 2019). Les résultats de ces requêtes BIM pourraient devenir des unités d'échange, en lieu et place des extractions manuelles effectuées chaque jour sur le terrain. En effet, si une maquette BIM pouvait être requêtée efficacement, de manière robuste, les résultats de ces requêtes pourraient devenir des vecteurs fiables d'échange d'informations. Cela permettrait aux acteurs d'échanger de petits ensembles de données précisément identifiés, résultats de requêtes structurées, au lieu de fichiers volumineux à travers lesquels l'utilisateur doit naviguer et fouiller. Les échanges de données BIM seraient plus propres, plus rapides et plus précis, ce qui renforcerait la collaboration BIM.

Dans ce chapitre, nous tenterons de démontrer que l'hypothèse posée est une bonne candidate pour la résolution des problèmes d'interopérabilité. Dans la section 1, nous rappellerons la convergence de la revue de littérature vers un cadre de collaboration par la requête ; dans les sections 2 et 3, nous exposerons les problématiques concrètes d'interopérabilité sur le terrain, d'un point de vue organisationnel puis technologique, et montrerons que les workflows s'articulent autour de requêtes qui ne disent pas leur nom ; la section 4 donnera un background théorique à l'utilisation de requêtes dans le BIM à l'ère du big data ; la section 5 soulignera la difficulté actuelle logicielle à lancer des requêtes dans des bases de données BIM ; enfin, la section 6 proposera un cadre de collaboration par requête et enrichissement de données, et en détaillera le fonctionnement et les prérequis.

3.1 Requêtes collaboratives : une conjonction de plusieurs solutions existantes

Cette hypothèse d'un cadre de collaboration par requêtes et enrichissement vient s'appuyer sur quatre approches de résolution des problèmes d'interopérabilité, évoqués dans la revue de littérature du chapitre 2 : (1) les vues métier, ou MVD (2) les plateformes BIM (3) les workflows d'interopérabilité (4) les requêtes BIM.

L'idée est d'assembler deux cadres organisationnels (échanges BIM orientés métier, flux de travail multi-métiers BIM) et deux briques technologiques (plates-formes BIM, requêtes BIM) décrits dans la littérature, pour atteindre un objectif global : le renforcement de la collaboration interentreprises AEC. Son originalité réside dans le fait que le processus de requêtage est en soi considéré non seulement comme un outil d'analyse et de vérification de données, mais aussi comme une unité collaborative et organisationnelle. Plus précisément, ce cadre implique la création de vues métier, comme suggéré par Belsky et al. (Belsky et al., 2014), la centralisation de données BIM pour permettre une collaboration basée sur des échanges partiels dynamiques, comme suggéré par Das et al. (Das et al., 2015), la normalisation de l'accès aux données plutôt que l'homogénéisation des modèles de données, comme suggéré par Fuchs et al. (Fuchs & Scherer, 2017), et l'utilisation d'un cadre de requêtes comme suggérées par Nepal et al., Kang, Krijnen et al. et Costa et al. (Costa & Sicilia, 2020; Kang, 2017; Krijnen & Beetz, 2020; Nepal et al., 2012).

La collaboration par la requête s'appuie donc sur un assemblage de solutions suggérées dans la littérature scientifique. Afin d'étayer cette hypothèse, il nous faut décrire plus en détail la manière dont s'opèrent les échanges sur le terrain – d'un point de vue organisationnel et technologique.

3.2 Aperçu des situations d'interopérabilité BIM

Nous allons caractériser l'interopérabilité BIM sur le terrain, et ses différentes modalités organisationnelles. La collaboration sur un projet donné se fait à travers différents *métiers* et différentes *phases* ; et ces deux paramètres sont déterminants pour la définir. En fonction de la phase (à l'intérieur d'une phase ou à travers plusieurs phases) et du métier (à l'intérieur d'un métier ou entre plusieurs métiers), quatre modes de collaboration distincts sont déduits logiquement, comme illustré dans la Figure 25 : (1) mono-phase/mono-métier, (2) mono-phase/multi-métier, (3) multi-phase/mono-métier, (4) et multi-phase/multi-métier. Chaque mode est confronté à des obstacles organisationnels et techniques majeurs quant à l'instauration d'une collaboration harmonieuse (Sattler, Lamouri, Pellerin, et al., 2020).

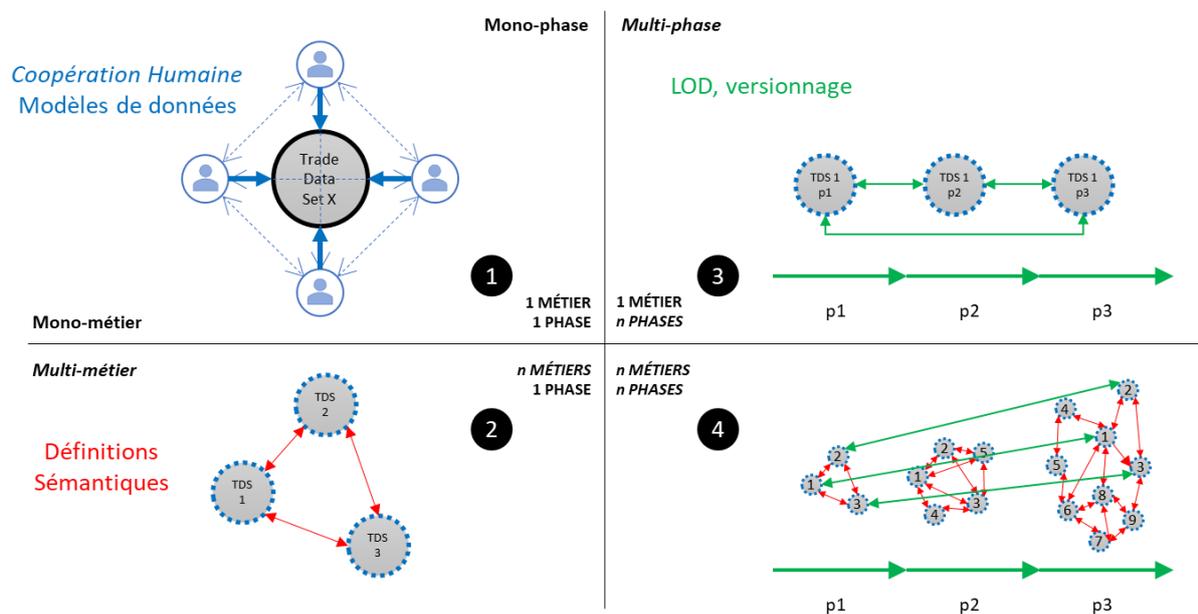


Figure 25 Les quatre situations d'interopérabilité BIM

Mode n° 1. Au sein d'une phase et au sein d'un métier : différents acteurs contribuent conjointement à la création d'un ensemble de données BIM partagé (une maquette BIM). Ils

appartiennent généralement à la même entreprise, ce qui évite les problèmes contractuels ou techniques concernant l'accès aux données. Comme les données à produire sont spécifiques à leur métier, ces producteurs sont à l'aise avec le modèle de données impliqué et travaillent avec un logiciel de modélisation BIM qu'ils connaissent bien (même si certains projets imposent un logiciel spécifique qui ne leur est pas forcément familier). Dans ce contexte, l'obstacle organisationnel à la collaboration est la coopération humaine : le management et la manière dont le travail est réparti au sein de l'équipe sont des points décisifs. Un 1^{er} obstacle technique est le degré de connexion des différents composants BIM au sein de la maquette, c'est-à-dire – le BIM étant basé, sur un paradigme de modélisation orientée objet – le degré de connexion entre les différents objets BIM. Par exemple, si un objet *dalle* est modifié, comment les objets liés à cette dalle (comme les murs) sont-ils modifiés en conséquence ? Cette question est celle de la paramétricité et associativité des objets BIM, qui fonde la plupart des logiciels de modélisation BIM ; on peut considérer qu'il s'agit d'une forme d'interopérabilité au niveau des objets BIM. Cette interopérabilité dépend des schémas de données sous-jacents, et donc de l'outil de modélisation BIM utilisé. Une maquette BIM étant souvent dispatchée en différents conteneurs que sont les fichiers, un 2^{ème} obstacle technique consiste à conserver une connexion entre les données à travers ces différents conteneurs (ce qui, par exemple, dans un outil BIM couramment utilisé comme Revit, n'est pas faisable pour tous les types d'objets). Si l'équipe utilise différents logiciels (par exemple, dans les cabinets d'architecture, Revit et Rhinoceros), un 3^{ème} obstacle est à franchir : la connexion des données à travers différents formats. Dans ce mode n° 1, les obstacles à la collaboration sont à la fois organisationnels (coopération) et techniques (modèles de données, conteneur de données).

Mode n° 2. Au sein d'une phase, à travers différents métiers : différentes équipes doivent s'interfacier via des maquettes BIM. Par exemple, sur un projet donné, un plombier modélise la tuyauterie sur la base de la maquette BIM d'un architecte, et le sous-traitant béton va s'interfacier avec cette maquette BIM de plomberie pour créer une réservation dans la maquette BIM structure. Dans ce cas, les différentes maquettes métier doivent être interconnectées. Le principal obstacle à cette interconnexion réside dans les différentes visions qu'ont différents corps de métiers d'un même bâtiment : ils travaillent sur le même objet physique – un bâtiment – mais ne partagent pas les mêmes objets sémantiques. Par exemple, un plancher est une dalle pour un ingénieur structure et une surface de finition pour un architecte. Les différents métiers

traitent de concepts différents, et donc de sets de données différents. Les obstacles à l'interopérabilité dans ce mode sont les différentes définitions sémantiques des métiers - qui s'ajoutent à tous les obstacles hérités du mode n° 1 imbriqué.

Mode n° 3. À travers différentes phases, au sein d'un métier : une équipe doit créer des liens entre les maquettes BIM d'un projet, à travers ses différentes phases. Par exemple, un client peut vouloir suivre la maquette BIM structure béton d'un projet donné qui aurait considérablement changé entre une phase APS (Avant-Projet Sommaire) et EXE (Exécution). L'obstacle à l'interopérabilité dans ce scénario est le LOD (Figure 26). Par exemple, un plancher dans une phase APS est représenté par une géométrie solide : une simple extrusion associée à une dizaine de paramètres (soit un LOD faible comme le LOD 100) ; cette simple géométrie peut en phase EXE se scinder en 50 objets différents, et inclure de nouveaux éléments comme des bords de dalles, des renforts, avec beaucoup de métadonnées associées (soit un LOD assez fort, comme un LOD 400). Comment assurer une continuité robuste entre ces sets de données APS et EXE ? Ce défi soulève à la fois la question du processus de révision et celle des LOD. L'obstacle à l'interopérabilité dans ce mode est lié à la granularité des données et à leur versionnement, en plus de toutes les barrières héritées précédemment des modes imbriqués n° 1 et n° 2.

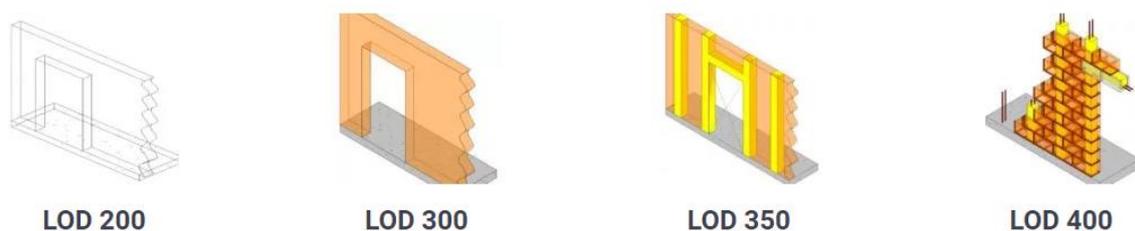


Figure 26 Illustration des différents LOD avec l'exemple d'un mur
https://bimforum.org/resources/Documents/BIMForum_LOD_2018_reprint.pdf

Mode n° 4 : à travers différentes phases et métiers : Ce scénario est une combinaison des modes n° 2 et n° 3. Il implique la mise en place d'une continuité des données BIM à travers les équipes et les phases. Par exemple, sur un projet donné, un modélisateur BIM de MEP (*Mechanical, Electrical and Plumbing*) pourrait avoir besoin d'accéder à une version précédente du modèle structurel béton afin de suivre l'apparition d'une réservation donnée. Ce

mode implique une interopérabilité avec un ensemble de données provenant d'un autre métier et d'une autre phase. Il combine les barrières de tous les modes imbriqués : n° 1, n° 2 et n° 3.

Les modes n° 1 et n° 2 étant imbriqués dans les autres modes, il semble logique de commencer à tester notre hypothèse de la collaboration par requêtes et enrichissements sur ces modes élémentaires ; c'est-à-dire, en faisant abstraction, dans un premier temps, de la dimension temporelle multi-phase. Notons que les modes n° 3 et n° 4 pourraient être abordés dans le cadre de recherches futures, une fois les modes n° 1 et n° 2 traités.

Différentes situations d'interopérabilité existent, selon les métiers et phases considérés. Nous traiterons ici des modes n° 1 et n° 2, soit l'interopérabilité mono-métier et multi-métier au sein d'une phase de projet donnée. Ces modes impliquent d'adresser des barrières liées à la coopération humaine, à la multiplicité des modèles de données, aux modalités des conteneurs des données, aux différentes définitions sémantiques métier. Dans la section suivante, nous décrirons en détail comment se passent les échanges de données sur le terrain pour ces modes n° 1 et n° 2.

3.3 Zoom sur les processus d'échanges BIM : la nécessité des requêtes

3.3.1 Un cadre de fédération

La norme ISO 11354 définit trois approches d'interopérabilité : intégrée, unifiée, fédérée (Roxin & Hbeich, 2019). L'approche *intégrée* implique une représentation commune des données ; l'approche *unifiée* implique l'utilisation d'un métamodèle de données commun, pour permettre de mapper les données entre les différents systèmes ; l'approche *fédérée* implique qu'aucun des acteurs n'impose son modèle de donnée – et apparaît quand les différences entre les modèles de données sont trop importantes. Pour illustrer cela, nous pouvons faire une comparaison avec le langage : un cadre intégré imposerait à tous les intervenants d'un projet donné de parler la même langue (comme l'anglais) ; un cadre unifié autoriserait les différents groupes d'intervenants à parler leur langue natale entre eux, mais à traduire en une langue de référence neutre (comme l'esperanto) pour se coordonner aux autres groupes ; un cadre fédéré autoriserait chaque groupe d'intervenants à parler sa langue natale, même pour se coordonner aux autres groupes, ce qui impliquerait d'utiliser des traducteurs (humain ou algorithmiques)

pour chaque échange. À la lumière de la revue de littérature du chapitre précédent, on peut émettre l'idée que l'interopérabilité BIM relève plutôt de la dernière approche.

En effet, certains montages de projet, qui imposent un logiciel unique BIM à tous les intervenants (Revit dans la plupart des cas, étant donné le monopole d'Autodesk évoqué au chapitre 1), semblent relever, à première vue, d'une approche intégrée : les différents intervenants modéliseraient les données de manière similaire. Mais en réalité, de nombreux métiers ne sont pas connectés à ces maquettes BIM, par exemple, les thermiciens, les acousticiens, les économistes du bâtiment (qui souvent ne produisent pas de données BIM), ou les façadiers et fabricants de structure métallique (qui travaillent souvent dans des logiciels BIM spécialisés comme Tekla, et convertissent leurs données dans le logiciel imposé), les ingénieurs structure (qui peuvent modéliser dans le logiciel BIM imposé, mais travaillent aussi avec leur logiciel de calcul structurel). Cette intégration apparente cache en fait de nombreux échanges entre des logiciels métiers et les maquettes BIM – et relève donc plus d'une situation de fédération.

D'autres montages de projet n'imposent pas de logiciel BIM, mais l'utilisation d'un métamodèle, incarné par un format neutre : l'IFC, censé être le format d'échange entre les intervenants – ce qui évoque une approche unifiée. Or l'un des problèmes de l'IFC – et c'est une information relayée officiellement par BuildingSMART dans la section IFC du site officiel (BuildingSmart, n.d.) – est que ce format n'est pas réellement un format d'échange ; ce n'est d'ailleurs pas un format mais plutôt un *schemer*, soit un standard. BuildingSMART décrit le format IFC comme une copie gelée d'une maquette BIM, comme un pdf, servant plutôt à référencer ou archiver des données. Un IFC peut être utilisé pour la détection de collisions (*clashes*), pour l'extraction de certaines données – mais, même importé dans un logiciel compatible, un IFC ne peut pas être édité, amenant à la situation absurde de devoir parfois remodeliser en natif les données d'un IFC dans un logiciel d'édition BIM (Boiko, 2021) :

« The project model itself or any element in the IFC format is not suitable for continuing work on them. [...] That is, after importing an IFC file into any BIM program, it cannot be edited or supplemented. And if you still want to do it (and you want to do it), the best solution would be a complete reconstruction of the geometry in the program in

which you work, while the work is similar to copying the pattern (IFC model) using a light table along the bold lines of the original drawing. »

Les approches intégrées et unifiées ne sont donc pas effectives dans le BIM, et les échanges BIM se passent en réalité dans un cadre de fédération : en réalité, beaucoup d'acteurs restent dans leurs logiciels métier, et ont du mal à échanger des données avec un format imposé (approche prétendument intégrée) ou le métamodèle neutre (approche prétendument unifiée).

3.3.2 Atome collaboratif : requêtes et enrichissement de données

Dans l'AEC, ce cadre de collaboration par la fédération est donc plus un état de fait qu'une visée, et découle directement de la fragmentation de cette industrie ; c'est aussi le cadre le plus complexe à soutenir, puisqu'il implique de nombreux ajustements mutuels pour arriver à des consensus (Roxin & Hbeich, 2019), et une gestion fine en flux tendus des inputs-outputs. En effet, les acteurs ont besoin de s'échanger mutuellement des données, d'aller rechercher des données précises dans des bases de données qu'ils n'ont pas élaborées, et dont ils ont peu connaissance.

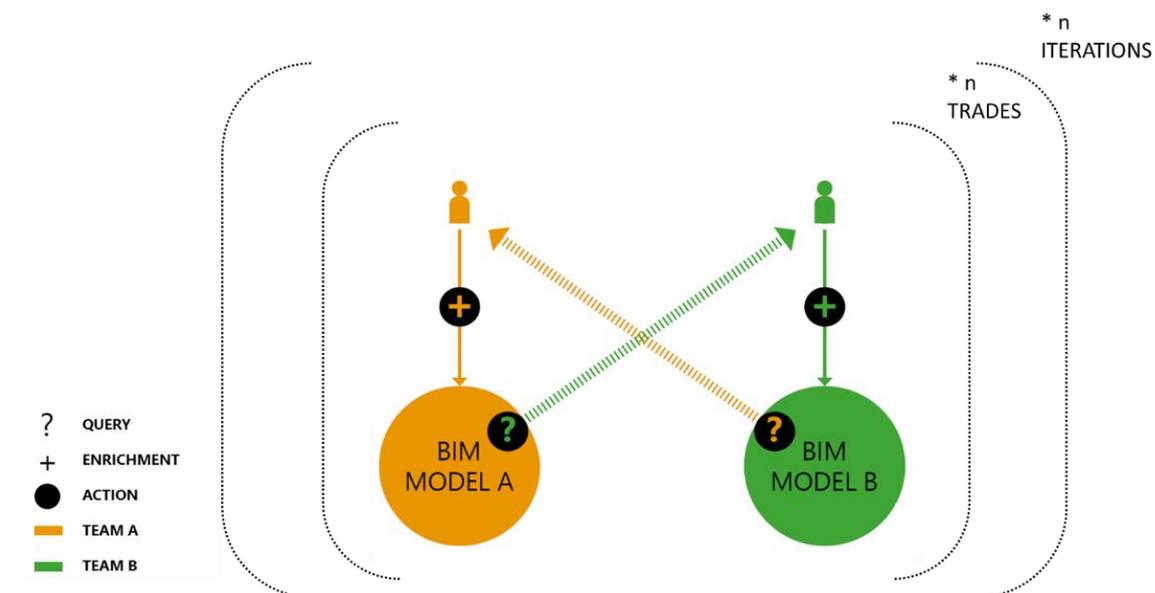


Figure 27 Requête et enrichissement de données, l'atome collaboratif

Les maquettes BIM étant des assemblages de différentes maquettes métier, chacune étant spécifique à une discipline, la collaboration se déroule typiquement comme suit (Figure 27) - considérons deux équipes, A et B :

- Étape n° 1 : les équipes A et B modélisent leurs données BIM en utilisant différents modèles de données, c'est-à-dire des logiciels et des formats différents, et en superposant visuellement leurs maquettes dans un système de coordonnées spatiales partagées ;
- Étape n° 2 : l'équipe A doit rechercher et extraire des ensembles de données spécifiques B dans la maquette B, et les enrichir avec ses données métier A dans sa maquette A ;
- Étape n° 3 : l'étape n° 2 se fera réciproquement pour l'équipe B.
- Les étapes n° 2 et n° 3 se font de manière itérative au cours du projet.

On pourrait dire que, de fait, un cadre de collaboration BIM est un processus itératif de recherche et d'enrichissement de données (Figure 27). Or ce processus n'est jamais perçu ni conceptualisé ainsi ; on parle d'ailleurs sur le terrain plutôt d'*extraction* de données, et quasiment jamais de *recherche* de données, encore moins de *requêtes* ou d'*interrogation* de bases de données ; pas plus qu'on ne parle d'*enrichissement* de données ni de *co-modélisations*. Comme mentionné précédemment, à ce jour, l'étape n° 2 n'est pas normalisée : elle est réalisée de manière désordonnée et ad hoc sur le terrain : par extractions manuelles, copier-coller, voire, ressaisie de données et re-modélisations qui entravent le travail collaboratif itératif. Nous allons en présenter un exemple dans la sous-section suivante.

3.3.3 Exemple d'itération

Illustrons cela par une situation classique du BIM, au sein d'un logiciel partagé par deux équipes : Revit. Si l'équipe B (mettons, un ingénieur structure) se base sur une poutre modélisée par l'équipe A (l'équipe d'architecte), l'équipe B va d'abord devoir retrouver cette poutre dans Revit. Puis l'équipe B va classiquement copier-coller cette poutre dans sa maquette BIM, ou la remodeliser. Or, si au cours de l'avancement du projet, la poutre de l'équipe A est modifiée, l'équipe B devra soit la re-copier-coller – au risque de perdre les données ajoutées à cette poutre dans sa propre maquette – soit conserver sa poutre, mais la modifier, en vérifiant, via superposition visuelle, qu'elle correspond bien à celle de l'équipe A.

Deux fonctionnalités pourraient permettre de conserver un lien entre les deux poutres : d'une part, la fonction `copy-monitor`, qui permet de conserver le lien entre un élément et sa copie ; seulement cette fonction, dans Revit, n'est pas disponible pour tous les objets BIM (et notamment pas pour les poutres) ; d'autre part, la fonction `constraint` qui permet de contraindre certains éléments entre eux – seulement, cette fonction fonctionne mal entre deux éléments issus de différents fichiers Revit. En d'autres termes, il est difficile d'établir des liens entre des sets de données dispatchés entre différents fichiers (qui pourtant sont édités dans le même logiciel, Revit) ; ce qui rend quasiment impossible la co-modélisation par plusieurs métiers. Il est à noter que les logiciels BIM issus du PLM, comme Digital Project, datant globalement du début des années 2000, gèrent beaucoup mieux les flux de données que Revit en 2021. Notamment, dans CATIA, la fonctionnalité `publication` permet de gérer la question de la propagation des modifications à travers différents fichiers, et donc celle de l'interdépendance de ceux-ci.

Par ailleurs, au-delà de la question des liens interfichiers, se pose la question de retrouver les éléments, au fil des itérations. À chaque modification de projet, l'équipe d'ingénieurs devra retrouver toutes les poutres de l'architecte, afin d'analyser les évolutions de projet en termes de géométrie et de métadonnées, et intercepter les modifications (incluant l'ajout et la suppression d'éléments) afin de baser son analyse structurelle sur les dernières mises à jour de la maquette de l'architecte. Sur un petit projet de maison individuelle, comptant moins d'une vingtaine de poutres, cela n'est pas un réel problème ; mais sur un projet de tour, qui peut compter des milliers de poutres, c'est une autre affaire. L'équipe B doit donc suivre et contrôler très précisément ce que fait l'équipe A, et pas seulement de manière visuelle ; or cette action de suivi et de contrôle d'un gros volume de données passe par la possibilité d'interroger et de retrouver ces données.

Dans la situation évoquée, les utilisateurs ont besoin de rechercher et d'enrichir des données qu'ils n'ont pas modélisées, et le font avec les moyens du bord : copier-coller, ressaisies de données, ce qui entrave les flux de données et implique de recommencer à chaque itération. S'ils pouvaient efficacement effectuer des requêtes pour retrouver ces données à travers les multiples itérations, et créer des liens entre ces données originales et leurs données métiers, on peut parier que beaucoup de temps serait gagné – du temps à rechercher et ressaisir des

données ; de plus, les données BIM seraient fiabilisées et consolidées au fil des itérations, au lieu d'être fragilisées par celles-ci.

Ainsi, un cadre de collaboration par requêtes et enrichissement viendrait simplement formaliser le processus informel qui sous-tend les échanges de données BIM sur le terrain, à savoir, des extractions-complémentations de données *one-shot*, dans un environnement de maquettes fédérées. Via ce cadre, ce processus ad hoc deviendrait un cycle normalisé de requêtes-enrichissement de données. Avant de détailler ce cadre, nous allons nous intéresser à la notion de *requêtes* sous un angle théorique plus large.

3.4 Les requêtes en théorie : un paradigme du big data

Dans *The Second Digital Turn* (Carpo, 2017), l'historien Mario Carpo consacre un chapitre à la notion de requête, intitulé « *Don't sort : Search* », d'après cet ancien slogan de Gmail, la messagerie de Google lancée en 2004, dont l'innovation principale était de permettre aux utilisateurs de rechercher des emails par mots-clefs, et par conséquent de ne plus avoir à les trier au préalable. En effet, avant la période digitale, il était nécessaire de *ranger* les objets, conceptuels et physiques, pour deux raisons : pour ordonner le monde abstrait et concret (philosophes, scientifiques, architectes), et pour retrouver des objets (dans un livre, dans l'espace physique). Mais la période digitale a rendu caduc cet état de fait : grâce aux requêtes (dans un moteur de recherche ou dans une base de données), il n'est plus nécessaire de ranger les données au préalable pour les retrouver – l'action de les ranger ou trier, en plus d'être inutile, est plus longue que celle de les rechercher via une requête. Ceci s'applique à la fois aux objets digitaux (comme les données dans un ordinateur, accessibles depuis un simple `ctrl + F`) et aux objets physiques (comme des produits dans un entrepôt Amazon, retrouvables à renfort de codes-barres ou de puces GPS). Toujours d'après Mario Carpo, l'arrivée de l'imprimerie a pu entraîner la première « crise du big data de l'histoire » chez les libraires, les bibliothécaires, les savants, qui ont tenté d'organiser les masses de savoir imprimées – et ceci avec les moyens de l'époque : des classifications arborescentes, de plus en plus étoffées et sous-divisées, qui n'arrivaient d'ailleurs jamais à englober totalement l'ensemble de connaissances à représenter. On note ici que ces folies de classifications sont évoquées par Robert Musil dans *l'Homme sans*

qualités (Musil, 1956), avec la figure paroxystique du bibliothécaire qui, pour réussir à tout classer, ne peut réellement accéder au savoir :

« J'ai là pour vous [...] une bibliographie des bibliographies, c'est-à-dire la liste alphabétique des listes alphabétiques des titres de tous les livres et travaux qui ont été consacrés ces cinq dernières années aux progrès des sciences éthiques [...] Le secret de tout bon bibliothécaire est de ne jamais lire, de toute la littérature qui lui est confiée, que les titres et les tables des matières. Celui qui met le nez dans le contenu est perdu pour la bibliothèque ! [...] Jamais il ne pourra avoir une vue d'ensemble ».

Les classifications arborescentes, en tant qu'outil permettant de retrouver des objets, seraient donc devenues obsolètes. On note pourtant que la représentation arborescente est toujours d'actualité dans les interfaces utilisateurs des logiciels BIM – avec toutefois des philosophies différentes (Figure 28). Dans un logiciel comme Digital Project, issu du PLM, l'arborescence appelée *arbre de conception* permet surtout de bien structurer en amont les données paramétriques – et c'est l'utilisateur qui la construit intégralement (systèmes de produits, de pièces, set géométrique, etc.); alors que dans un logiciel comme Revit, elle est déjà programmée, peu customisable, et est nommée *project browser* – dans ce logiciel, il s'agit donc bien de *retrouver* par balayage des objets via une arborescence – pratique qui serait donc rendue caduque à l'ère digitale.

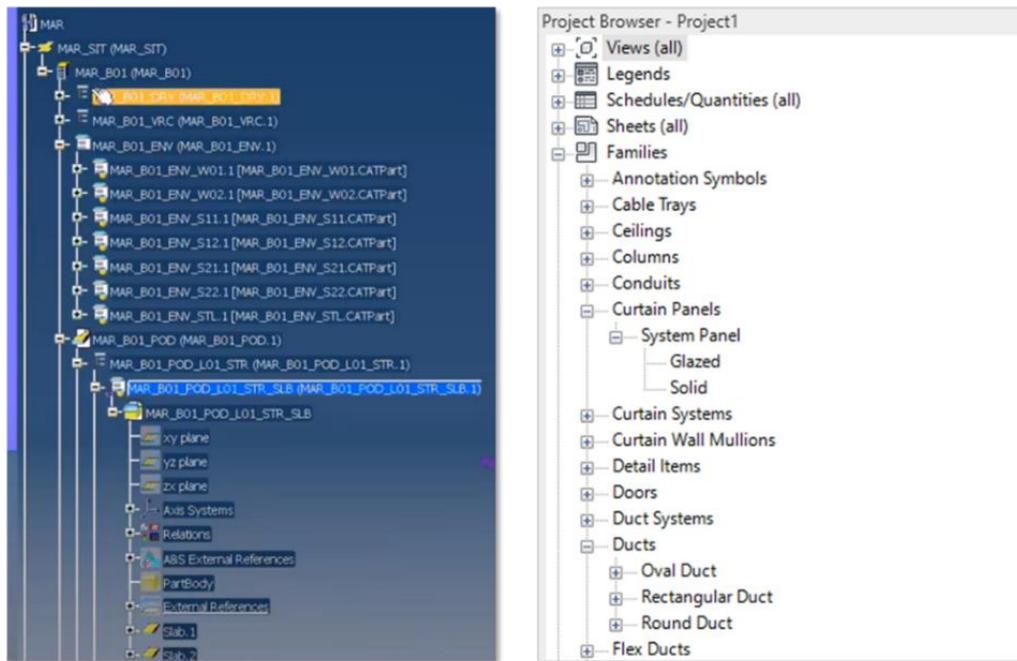


Figure 28 Captures d'écran des arborescences des logiciels Digital Project et Revit
 Source (gauche) : Digital Project: Gehry Technologies Webinar 1-3: An Overview of
 Digital Project VIR4, <https://youtu.be/PUSae4VSKel>

En effet, selon Mario Carpo, l'enjeu à l'ère du big data n'est plus de trier ou d'organiser les données, mais de les retrouver. Le BIM n'échappe pas à ce paradigme. Comme évoqué au chapitre 1, durant la période embryonnaire du BIM des années 90, la question principale était celle de la classification à adopter pour représenter les données BIM ; l'enjeu était de créer un modèle de données pour le bâtiment, et le choix s'est porté sur la modélisation orientée objet, et sur le standard IFC. Durant les années 2000 s'est posée la question de l'adoption de ce modèle par l'industrie ; et depuis les années 2010 se pose la question de l'utilisation des données produites – dont la question brûlante de l'interopérabilité est l'un des symptômes. En 2021, il n'y a pas de réelle limite technologique dans la modélisation des données BIM, ni en termes de géométries, ni en termes de métadonnées : entre les logiciels BIM classiques orientés objet, les logiciels 3D customisables et programmables (comme Rhinoceros - Grasshopper), et les logiciels dérivés du PLM (comme la 3D Experience ou Microstation), tout est modélisable, à un niveau de granularité très élevé, dans divers métiers (structure, simulation thermique, façade complexe, etc.) ; et à certains égards, cet état de fait était déjà vrai au début des années 2000 (les logiciels BIM sont globalement les mêmes, et n'ont pas fondamentalement évolué depuis).

Il semble que le défi actuel, c'est d'utiliser les données BIM produites ; et la première étape pour utiliser une donnée, c'est d'être capable de la retrouver.

La nécessité d'interroger ou requêter des données BIM s'impose comme une évidence liée au paradigme du big data. Nous montrerons dans la section suivante que cette pratique est pourtant peu aisée sur le terrain, dans l'écosystème des logiciels BIM en 2021.

3.5 Les requêtes en pratique dans le BIM

Wikipédia (Wikipedia, n.d.) définit ainsi une requête :

« [Une requête est] en informatique, un moyen formel d'effectuer une recherche d'information dans un système d'information : dans un réseau informatique, un message envoyé par un client vers un serveur qui émet une réponse ; dans une base de données, une interrogation de la base. Le client reçoit comme réponse des éléments de cette base correspondant aux critères définis dans la requête. Dans le cas particulier des bases de données relationnelles, le format standard de requête est le SQL. »

Effectuer ou lancer une requête, c'est donc interroger une base de données, et rechercher puis retrouver des données qui ont des caractéristiques communes. Voici un exemple typique de requête BIM : retrouver, au sein d'une maquette BIM, tous les murs ayant une épaisseur de moins de 70 mm ; ou tous les murs en béton ; ou toutes les portes extérieures d'un bâtiment.

Dans la réalité quotidienne des acteurs AEC, il n'est pas aisé de créer des requêtes BIM. Tout d'abord, les maquettes BIM sont rarement considérées comme des bases de données – ce qu'elles sont pourtant – car la référence au dessin et aux outils traditionnels est toujours très prégnante. En effet, les maquettes BIM sont encore trop souvent vues comme des outils d'extraction de documents 2D CAD sur la base d'objets 3D BIM, et la plupart des logiciels de modélisation BIM proposent d'ailleurs des fonctions de dessin en plus des fonctions de modélisation objet. Et pour cause : le document 2D, imprimé en papier ou pdf, est encore le document contractuel de tout projet, celui qui est visé, signé – et ce même quand il est associé à un livrable BIM. On a donc peut-être un premier frein, psychologique et culturel, à la mise en

place de *requêtes* sur des *bases de données* BIM – termes informatiques, qui peuvent sembler rébarbatifs, voire faire peur aux acteurs de l’industrie peu digitalisée qu’est l’AEC.

Les freins sont aussi techniques : peu de logiciels rendent les requêtes réalisables facilement ni même n’explicitent dans leur interface la notion de requête. Nous allons analyser la capacité à créer des requêtes dans logiciels fréquemment utilisés dans le BIM : un logiciel de modélisation BIM (Revit), un logiciel de fédération de maquettes BIM et de détection de clashes (Naviswork, Autodesk) et un logiciel de contrôle d’IFC (Solibri Office, Nemetschek).

3.5.1 Les requêtes dans Revit

Le logiciel Revit propose une manière de rechercher des objets : la commande `search` du `project browser` (une arborescence qui répertorie ou range les différents éléments d’un projet (Figure 29 - 1)). Le problème est que le résultat de cette commande est de surligner dans l’arborescence, les éléments qui contiennent la valeur cherchée : des vues, ou des familles. De plus, cette commande ne donne les résultats qu’un à un, ne permet pas de faire des requêtes évoluées (*et/ou*), ni de retrouver les multiples instances d’objets BIM au sein d’une maquette.

Les vues Revit peuvent être considérées comme des requêtes visuelles sur une base de données, puisque l’on peut décider quels types d’éléments apparaissent ou dans une vue donnée. Par exemple, on peut décider, comme illustré dans la Figure 29, de ne visualiser que les murs (2 et 3), et colorer en rouge certains types de murs à l’aide d’un `view filter` (4) qui va chercher des murs bien précis (par exemple les murs dont le nom contient la chaîne de caractère `partition` et dont l’épaisseur est inférieure à 80 mm). Les `view filters` sont intéressants, mais ne permettent pas de cibler tous les paramètres (par exemple on ne peut pas créer un filtre sur le paramètre `workset`, qui n’est pas accessible via le menu déroulant). Ces protorequêtes sont bien plus évoluées que la commande `Search` évoquée plus haut, mais elles sont limitées car non robuste : en effet, la commande `Hide object from view` (5) peut cacher un objet dans une vue donnée, et rend difficile de retracer la constitution de cette vue. Dans le cas de la Figure 29, un utilisateur arrivant après que la commande `Hide object from view` ait été lancée pourrait croire que ce mur a disparu du modèle, ou, s’il devine qu’il a été caché manuellement, devrait afficher l’ensemble des objets cachés, qui peuvent être trop nombreux et empêcher de visualiser le mur recherché.

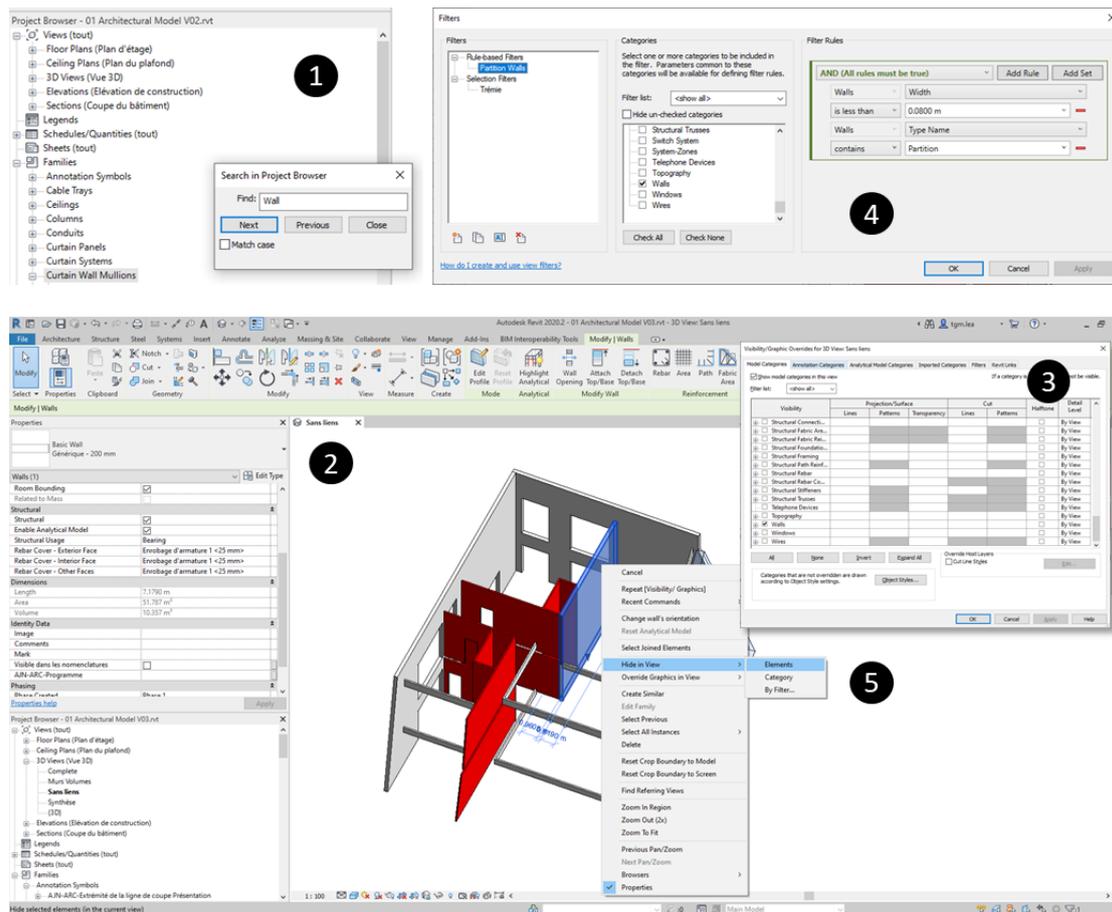


Figure 29 Proto-requêtes dans Revit

L’outil des schedule dans Revit est une autre manière de faire des requêtes ; si la capacité de cet outil à faire des requêtes complexes est limitée (seulement le **et**, pas de **ou**), il a l’avantage, contrairement aux vues, de ne pas être corrompible (on ne peut pas cacher arbitrairement ou ponctuellement un objet).

3.5.2 Les requêtes dans Navisworks

Dans Naviswork, un logiciel de détection de clashes, la notion de requête est explicitée à travers la commande **Find** (Figure 30 - 1) ; on peut effectuer des requêtes complexes (Figure 30 - 2, 3) et les sauvegarder dans des **set** (Figure 30 - 4) ; le résultat apparaît graphiquement en 3D. Deux freins apparaissent toutefois : d’une part, l’utilisateur doit parcourir des catégories de paramètres avant de trouver leur nom, ce qui n’est pas simple au premier abord, car il faut comprendre la logique de précatégorisations (Figure 31 - 1) ; d’autre part, certains paramètres

3.5.3 Les requêtes dans Solibri Office

Dans Solibri Office, deux outils permettent d'effectuer des requêtes : l'outil `search` (Figure 32 - 1) qui permet de faire des requêtes complexes, mais seulement sur des paramètres généraux d'identification des composants (et non sur l'ensemble des paramètres); et l'outil `filter` (Figure 32 - 2) qui permet lui d'interroger tous les paramètres. Une fois la sélection d'éléments faite par un de ces deux outils, l'utilisateur les ajoute à une sélection `basket` – et c'est là où le bât blesse : le panier de sélection peut ensuite être modifié de manière ad hoc, via la commande `remove from selection basket` (Figure 32 - 3) – et la requête initiale corrompue, de la même manière que quand un objet est caché via la commande `Hide object in view` dans une vue Revit. Ainsi, ce qui se trouve dans le panier de sélection ne reflète pas nécessairement une requête formelle, méthodique et pure.

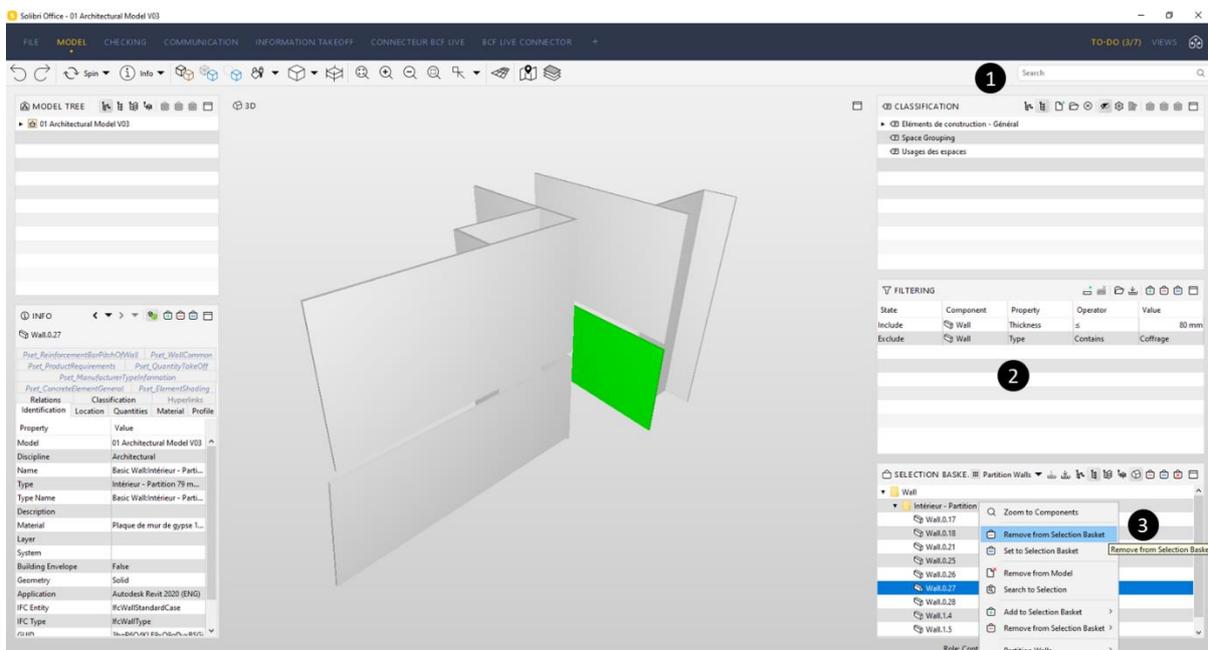


Figure 32 Requêtes dans Solibri Office

3.5.4 Synthèse comparative

Le Tableau 6 compare les différentes fonctionnalités de requêtes dans les trois logiciels mentionnés plus haut. Il est logique que Navisworks offre la plus grande capacité de requête : c'est un logiciel d'assemblage de maquettes, qui lit plusieurs formats ; ce qui suppose donc que les utilisateurs ne connaissent pas a priori tous les modèles de données avec lesquels ils

interagissent – ce qui crée un plus grand besoin d’interroger la donnée. En revanche, aucun des trois logiciels étudiés ne permet de faire des requêtes de manière à la fois user-friendly et robuste.

Tableau 6 Comparaison des fonctionnalités de requête dans Revit, Navisworks et Solibri

| | Revit | | | Navisworks | Solibri Office | |
|---|--------|-----------------|-----------|------------|----------------|--------|
| | Search | Views & Filters | Schedules | Find | Search | Filter |
| La notion de requête est explicitée | Oui | Non | Non | Oui | Oui | Non |
| Lancer une requête est user-friendly | Oui | Non | Non | Non | Oui | Oui |
| Possibilité de faire des requêtes complexes (et/ou) | Non | Oui | Non | Oui | Oui | Non |
| Possibilité de faire des requêtes sur n’importe quel paramètre | Non | Non | Non | Oui | Non | Oui |
| Possibilité d’enregistrer la requête | Non | Oui | Oui | Oui | Oui | Oui |
| Robustesse et incorruptibilité de la requête, capacité de la vérifier | Non | Non | Oui | Oui | Non | Non |
| Possibilité d’identifier graphiquement le résultat de la requête | Non | Oui | Oui | Oui | Oui | Oui |

En résumé, même si l’utilisation de requêtes BIM pourrait aider les utilisateurs à s’échanger des données, les logiciels BIM classiques ne permettent pas d’adopter une telle approche – approche que nous allons détailler dans la section suivante.

3.6 Caractérisation du cadre de collaboration par la requête

3.6.1 Fonctionnement

Alors que les échanges de données BIM, et plus largement les processus collaboratifs BIM, s’articulent, de fait et de manière non normée, autour de processus itératifs de requêtes et enrichissements de données entre différents métiers, et alors que l’action de rechercher une donnée est un corollaire de l’ère du big data, peu d’outils BIM permettent à ces processus d’interrogation de données BIM d’advenir de manière fluide : sans ressaisies de données, et sans pertes de données entre les intervenants. Le fonctionnement traditionnel, en 2021, de la collaboration BIM implique un certain degré d’uniformisation des structures de données, des silos de données, des duplications, ressaisies et pertes de données au moment des échanges – dont résulte une grande fragmentation (Figure 33).

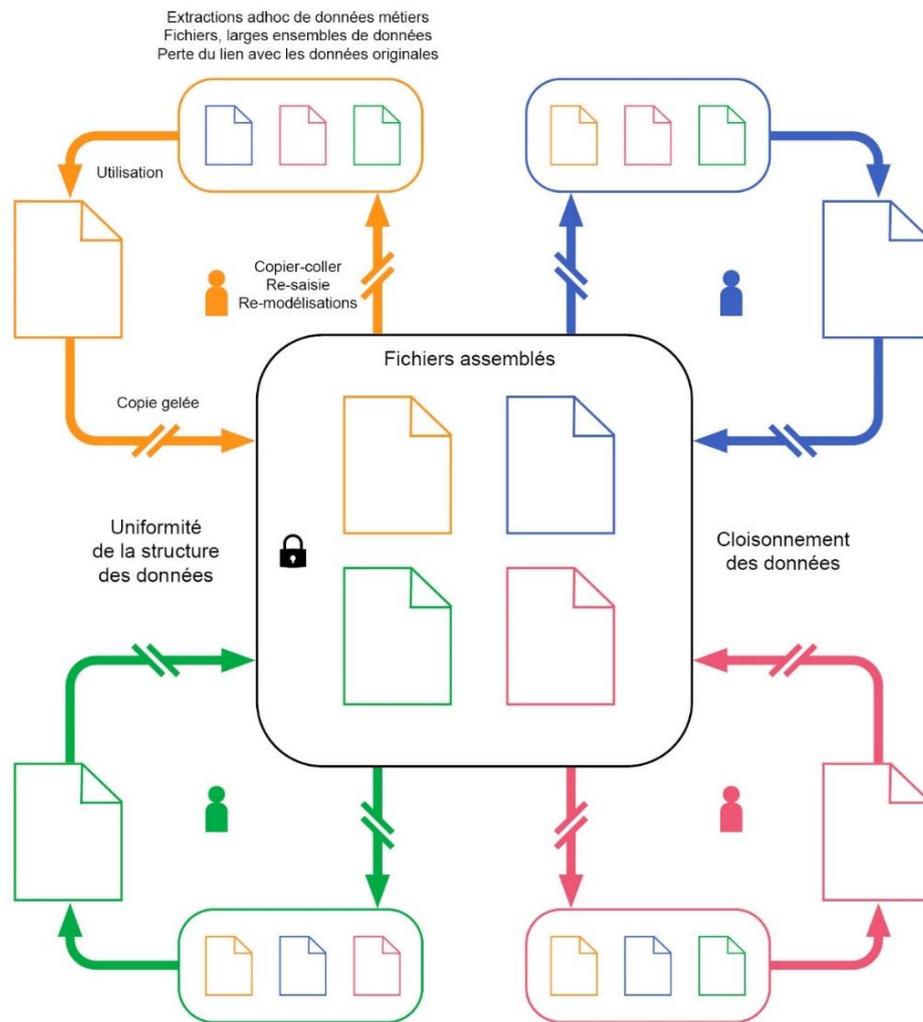


Figure 33 Cadre collaboratif BIM traditionnel : fragmentation, ressaisies et pertes de données

L’hypothèse que nous posons est qu’un cadre de collaboration BIM basé sur des cycles de requêtes et enrichissements permet de fluidifier les échanges de données BIM au sein d’un projet AEC. Un tel cadre consisterait à normaliser le processus d’échanges de données (dans un cadre de fédération) plutôt que de normaliser les modèles de données (de cadres d’intégration et unification). Ce cadre pose le requêtage et enrichissement itératif de données comme épine dorsale de la collaboration ; la requête BIM devient l’unité de base des échanges de données. Cette unité d’échange est robuste, fiable et précise, permet les itérations, et cible des besoins métier précis.

Ce cadre implique le décloisonnement des données dans une base de données neutre, de manière à permettre à un utilisateur de les requêter et de les enrichir (Figure 34). Les acteurs accèdent aux données en les requêtant (et non en les dupliquant ni en les ressaisissant) ; ils manipulent ces requêtes via des vues métier dynamiques et customisés, où apparaissent seules les données dont ils ont besoin, et structurées selon leur besoin ; depuis ces vues métier, ils peuvent enrichir ces données, et les réimporter dans leurs maquettes sources. Il y a une continuité entre les données des maquettes originales métier et la base de données multi-métiers, en entrée et en sortie, permettant de conserver les liens entre les objets BIM – et évitant les pertes de données. Ce cadre permet aux différents métiers d’enrichir collectivement et itérativement un ensemble de données BIM, et d’instaurer des workflows de co-modélisation.

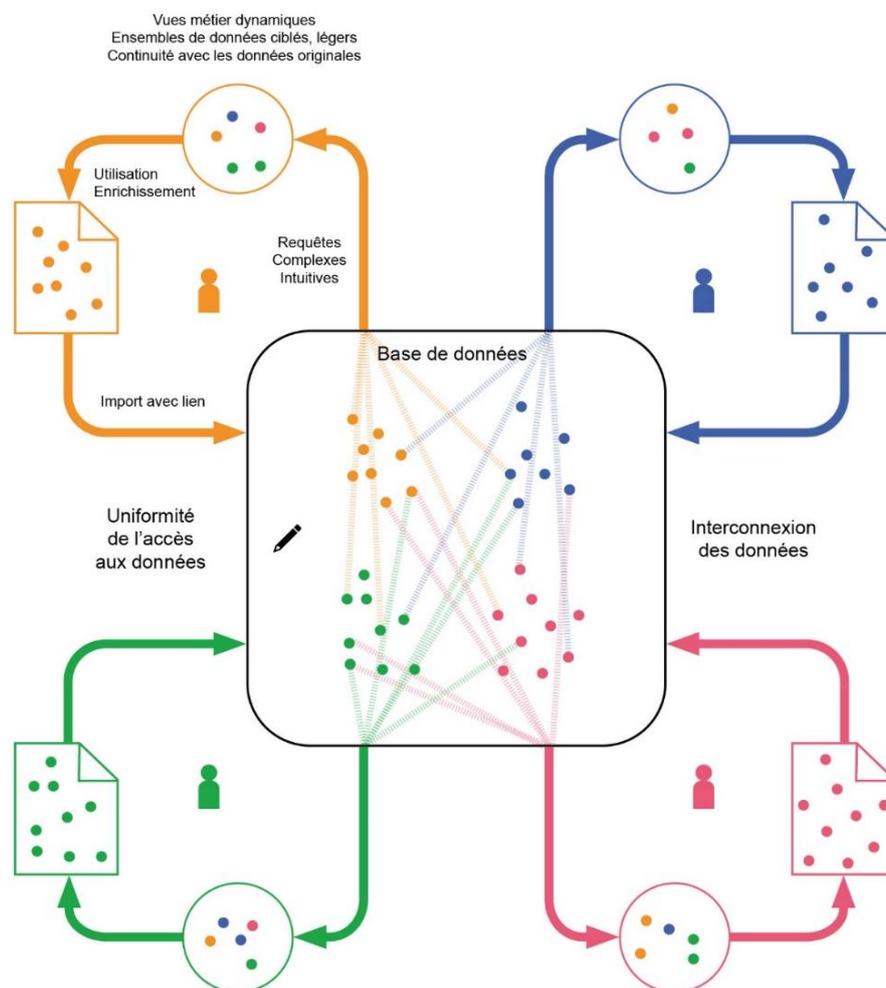


Figure 34 Cadre collaboratif BIM proposé : requêtes et enrichissements mutuels de données

3.6.2 Prérequis

Voici les prérequis du cadre collaboratif par requêtes et enrichissement :

3.6.2.1 Ensemble de données

Le cadre proposé doit permettre de lancer des requêtes sur un ou plusieurs ensembles de données :

- **hétérogènes**, composé d'un assemblage de plusieurs formats, élaboré par plusieurs métiers
- **imparfaits, incomplets**, contenant des erreurs ou des lacunes dans le paramétrage (puisque les maquettes BIM sont en perpétuel *work in progress*).

3.6.2.2 Utilisateur

Le cadre proposé doit permettre le requêtage et enrichissement de données par un utilisateur n'ayant :

- **aucune connaissance préalable des modèles de données** sous-jacents ; par exemple, il n'est pas expert du format IFC, ni d'aucun format BIM en particulier.
- **aucune compétence en programmation** : il n'est ni *geek* ni *hacker* ni expert informatique.

L'interface doit donc être **user-friendly**, et ne pas nécessiter plus de 30 minutes de formation.

3.6.2.3 Requêtes et enrichissements de données

Le cadre proposé doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Des **requêtes complexes** peuvent être lancées, avec des *et/ou* : par exemple, « rechercher tous les murs de type cloisons *et* en plâtre » ; « rechercher tous les murs de type cloison *ou* tous les murs de moins de 70 mm d'épaisseur ».
- Des requêtes **précises et imprécises** peuvent être lancées : l'utilisateur peut interroger un paramètre précis, ou une valeur, ou les deux ; l'utilisateur peut rechercher une chaîne de caractères contenue dans une autre, ou une chaîne de caractère dans sa totalité.
- Les requêtes doivent être **robustes et non corruptibles** : ce ne sont pas des jeux de sélections, dont on peut retirer arbitrairement un élément.

- Les **résultats des requêtes** doivent pouvoir être **exprimés graphiquement en 3D et sous forme de tableaux** ; l'utilisateur doit pouvoir récupérer tous les éléments d'un coup, sans les balayer un à un ; et exporter le résultat de la requête dans un logiciel d'édition BIM et dans un tableur Excel.
- Les requêtes doivent pouvoir être **sauvegardées** par l'utilisateur, afin d'être réutilisables à travers les différentes itérations de projet.
- Le processus **d'enrichissement des données**, tel que les modifications, ajouts ou suppressions d'attributs, doit pouvoir être **effectué sur les résultats des requêtes**, et être user-friendly.

3.7 Conclusion

Le processus consistant à interroger des données BIM n'est ni largement étudié dans la littérature scientifique, ni conceptualisé sur le terrain dans les échanges quotidiens de données BIM, ni rendu possible techniquement par les logiciels BIM – alors que c'est de fait l'action originelle de toute collaboration BIM, et que la capacité de requêter des données est un corollaire incontournable de l'ère du big data. Ainsi, nous avons proposé dans ce chapitre un cadre de collaboration et de co-modélisation BIM normalisant l'échange de données via des requêtes, et permettant l'enrichissement itératif multi-métier d'une base de données BIM. Dans le chapitre suivant, nous décrirons l'application logicielle qui permet la mise en place de ce cadre collaboratif.

Chapitre 4. Prototype d'application : Treegram

Dans ce chapitre, nous décrivons l'application logicielle, appelée Treegram, dont la visée est d'améliorer la collaboration et l'interopérabilité BIM. Elle a été développée par la start-up M4D-Treegram, au fil de ses projets BIM depuis 2014, et n'est pas encore commercialisée. C'est le fruit d'une réflexion de fond, menée petit à petit, sur le terrain, avec les acteurs quotidiens du BIM. Ce cadre de développement est différent du cadre classique d'une start-up, qui lève des fonds pour développer, hors-sol et très vite, un MVP (*Minimum Viable Product*). Au contraire, Treegram a été conçu et testé durant six ans, au contact des clients de M4D-Treegram, qui constituent de fait un écosystème informel de bêta-testeurs.

Nous présenterons tout d'abord le fonctionnement général du logiciel, et son architecture ; puis nous en exposerons les grandes fonctionnalités : la constitution d'une base de données neutre, la création de vues métier par organisation de requêtes et le processus de vérification et d'enrichissement des données. Enfin nous exposerons des tests élémentaires du logiciel.

4.1 Fonctionnement général

Le prototype de logiciel proposé, Treegram, vise à instaurer le workflow de collaboration par requêtes et enrichissement de données décrit dans le chapitre 3. Il permet de visualiser, organiser, interroger et enrichir des ensembles de données BIM hétérogènes dont les structures ne sont pas connues a priori par l'utilisateur – ce qui est généralement le cas lorsqu'une équipe a besoin d'utiliser des données BIM modélisées par une autre équipe, et correspond à la situation d'interopérabilité n° 2 décrite au chapitre 3.

Voici le fonctionnement général du logiciel (Figure 35) :

- (1) Sur un projet donné, différentes maquettes BIM modélisées par différents métiers sont **dé-silotées dans une base de données.**
- (2) Les données sont transcrites de manière générique dans la base de données, constituant **un modèle neutre.**

- (3) Les différentes équipes du projet accèdent au modèle neutre, peuvent **l'interroger intuitivement via des requêtes**, et réorganiser ainsi les données selon leurs besoins métier.
- (4) Chaque équipe a un accès en lecture-écriture à un **espace spécifique depuis lequel elle peut enrichir les données originales** créées par une autre équipe, sans les dupliquer ni les éditer, mais simplement en les complétant.
- (5) Les données enrichies dans Treegram peuvent ensuite être **exportées dans différents formats**.

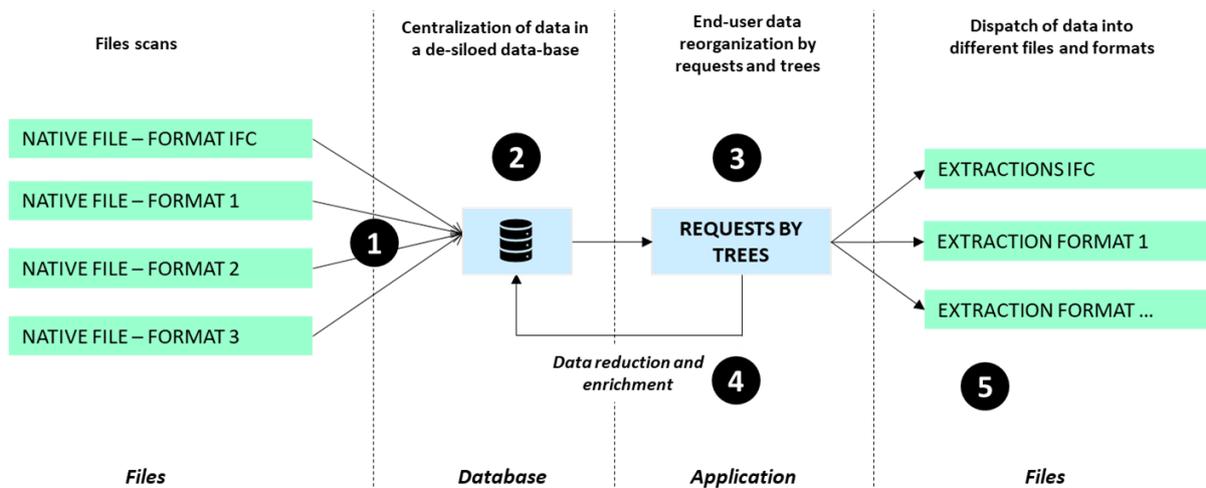


Figure 35 Fonctionnement général du prototype de logiciel Treegram

4.2 Architecture de l'application

Le logiciel est organisé, classiquement, en trois couches (Figure 36) :

1. **La couche Base de données**, qui contient les données du projet
2. **La couche Moteur**, ou l'ensemble des processus permettant d'agir sur la base de données
3. **La couche Présentation**, soit l'interface utilisateur
 - 3 interfaces utilisateurs ont été développées :
 1. Une application locale (qui tourne sur le système d'exploitation Windows), le dashboard
 2. Une visionneuse web
 3. Une interface permettant d'accéder à Treegram depuis une interface de création de scripts, Visual Studio (Windows), et d'orchestrer le lancement de ces scripts.

L'application locale ou `dashboard` est la principale – c'est la plus au point et la plus complète ; c'est celle à laquelle nous nous référerons dans les sections suivantes.

- Des accès externes existent, via les logiciels de programmation visuelle Grasshopper et Dynamo. Un plugin Revit permet aussi d'accéder à Treegram depuis Revit.

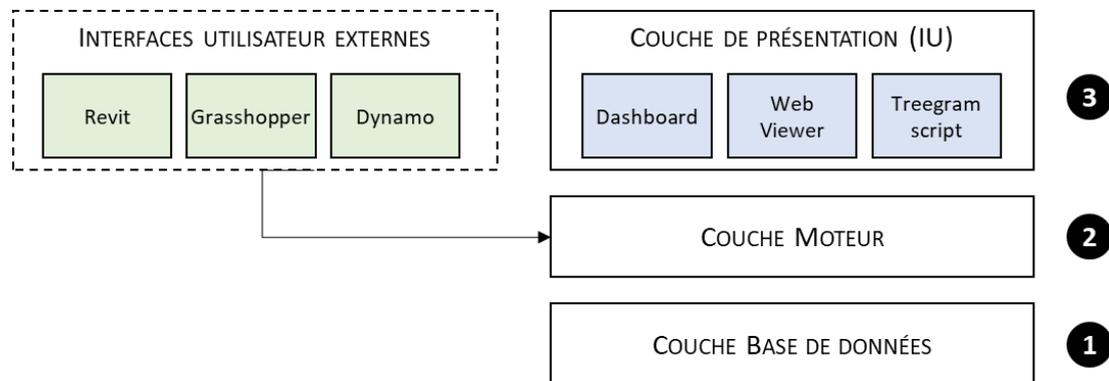


Figure 36 Architecture du logiciel Treegram

Dans les trois sections suivantes, nous décrivons les grandes familles de fonctionnalités de Treegram.

4.3 Constitution de la base de données neutre

4.3.1 La fonctionnalité de scan, ou l'import des données

La première fonctionnalité clef est la constitution de la base de données. Treegram sert en premier lieu à dé-siloter et fédérer plusieurs maquettes dans un environnement décloisonné. Ainsi, pour un projet donné, chaque maquette BIM, quel que soit son format, propriétaire ou non, est intégrée dans la base de données neutre de Treegram. C'est la fonctionnalité du `scan` ; on dit que les maquettes BIM sont `scannées`, soit importées dans la base de données. Le `scan` de fichier peut être effectué à différentes temporalités, selon les besoins de l'utilisateur : toutes les semaines, tous les jours, ou toutes les heures. Treegram lit les formats ouverts comme l'IFC et STEP ; et les formats propriétaires sont scannés via leurs API. À ce jour, Treegram lit des formats propriétaires tels que `rvt` (Revit Autodesk), `CATPart` (3DExperience, Dassault Systèmes) et `3dm` (Rhino McNeel), et cette liste va s'allonger.

Cet environnement de fédération de maquettes engage plusieurs équipes, et donc plusieurs entreprises différentes – l’industrie AEC, comme vue plus haut, est très fragmentée et implique la collaboration d’un grand nombre d’entreprises variées sur un projet donné. Cela pose la question des droits d’accès, gérés dans Treegram par les `workspaces`, qui sont les premiers conteneurs de la base de données. Toute entrée dans la base de données, tout `scan` se fait dans un `workspace` : un espace de la base de données réservé à une équipe de projet, sur lequel des droits d’accès sont implémentés. Typiquement, une équipe donnée dispose de droits d’accès en lecture-écriture sur son propre `workspace`, et de droits d’accès en lecture seule sur les `workspaces` des autres équipes (Figure 37).

En résumé, la base de données neutre de Treegram est constituée par l’import (`scan`) des différentes maquettes BIM dans des conteneurs auxquels sont associés des droits d’accès (`workspaces`) ; chaque équipe scanne un ou plusieurs fichiers BIM dans un ou plusieurs `workspaces`.

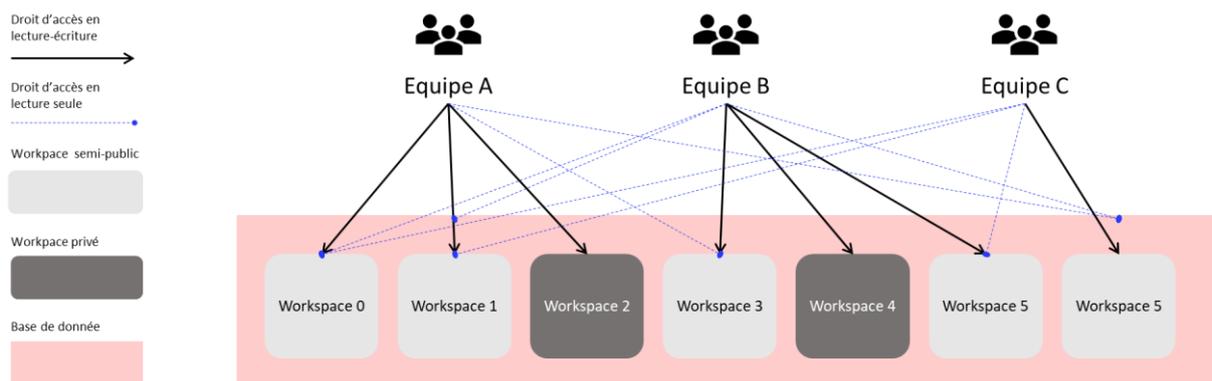


Figure 37 Structuration de la base de données : `workspaces` et droits d’accès

Dans la sous-section suivante, nous détaillerons la manière dont les objets BIM sont écrits dans cette base de données.

4.3.2 Écriture des objets BIM dans Treegram

Les maquettes BIM sont lues et retranscrites dans Treegram de la manière la plus générique et flexible possible : elles sont décomposées en objets et métaobjets (les métaobjets étant les *paramètres*, *propriétés* ou *attributs* d’un objet – la sémantique varie selon les différents logiciels). Treegram s’adapte donc théoriquement à tous les formats BIM, pourvu qu’ils soient

orientés objet, et réécrit l'ensemble de ces formats en couple objet métaobjet, sans recréer de modèle de données, c'est-à-dire sans recréer un ensemble hiérarchisé d'objets ; on peut donc parler de modèle de données neutre. La Figure 38 montre, pour un même objet, ses métaobjets dans Revit (1), ceux de sa version IFC dans Solibri (2), et ceux de sa version lue Treegram (3).

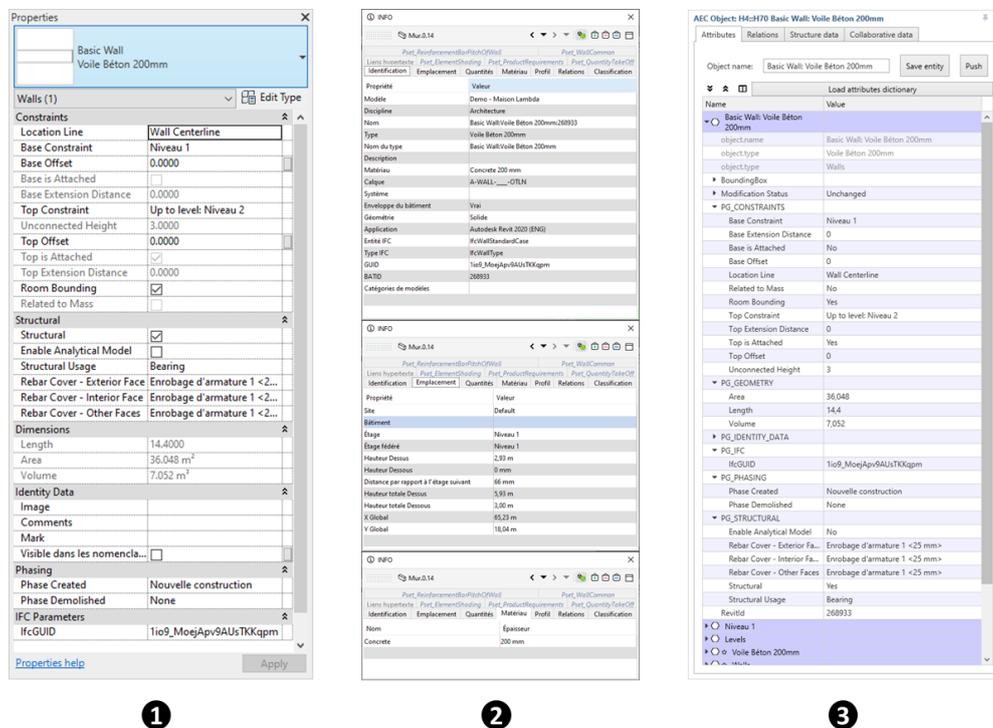


Figure 38 Métaobjets dans Revit, Solibri et Treegram

Toutefois, les maquettes BIM étant des bases de données relationnelles, des hiérarchies entre les éléments préexistent dans les formats originaux, et le choix a été fait de conserver deux types de relations quasiment universelles, présentes dans tous les formats BIM orientés objet. Elles sont d'ordre métier, et relèvent de définitions partagées entre les acteurs du bâtiment :

1. La relation de **composition** (par exemple, un escalier est *composé de* différentes marches, un mur-rideau est *composé de* meneaux et de panneaux) ; celle-ci est exprimée dans le format IFC par la relation `IfcRelDecomposes`.
2. La relation de **contenant spatial** (par exemple, une pièce est *contenue dans* un étage et un équipement électrique est *contenu dans* une pièce donnée) ; celle-ci est exprimée dans le format IFC par la relation `IfcRelContainedInSpatialStructure`.

Par ailleurs, une autre hiérarchie, d'ordre structurel, et inhérent à la modélisation orientée objet, est conservée : il s'agit de la relation **type-instance** (par exemple, une porte peut-être une instance d'un certain *type* ou *template* défini de porte), ce qui correspond dans l'IFC à la relation `IfcRelDefines`. Toutes les autres relations sont conservées dans Treegram, mais codées par héritages de métaobjets dans les objets, et non sous forme de hiérarchies formelles.

La base de données de Treegram se veut donc la plus neutre possible : les propriétés des objets sont passivement lues et retranscrites dans Treegram. Aucune autre hiérarchie n'est créée entre les objets, à l'exception des trois hiérarchies basiques de composition, contenance et type-instance, et uniquement si celles-ci préexistent dans les maquettes originales.

4.4 Création et organisation de requêtes

Lorsque le processus de scan des données est terminé, le processus de requête peut commencer. La base de données de Treegram peut être interrogée sans aucune limite en termes de granularité – la totalité des objets BIM et de leurs métaobjets sont accessibles. Comme mentionné précédemment, l'un des prérequis de Treegram est qu'une requête doit pouvoir être effectuée par un utilisateur n'ayant aucune compétence en programmation informatique ni la connaissance particulière d'un ou plusieurs formats BIM.

4.4.1 Les arbres : espace d'organisation des requêtes

Le processus de requête se passe dans l'espace d'exploration de la base de données, appelée *arbre*, qui contiendra un ensemble de requêtes, effectuées dans des *nœuds*. En effet, l'interface utilisateur de Treegram reprend les interfaces classiques des logiciels BIM et PLM (Figure 39), en associant :

- (1) Une *visionneuse*, qui permet de visualiser la base de données graphique (les objets BIM en 3D).
- (2) Un espace d'exploration de la base de données, appelé *arbre*.
- (3) Des *widgets* permettent d'accéder aux métadonnées d'un objet.

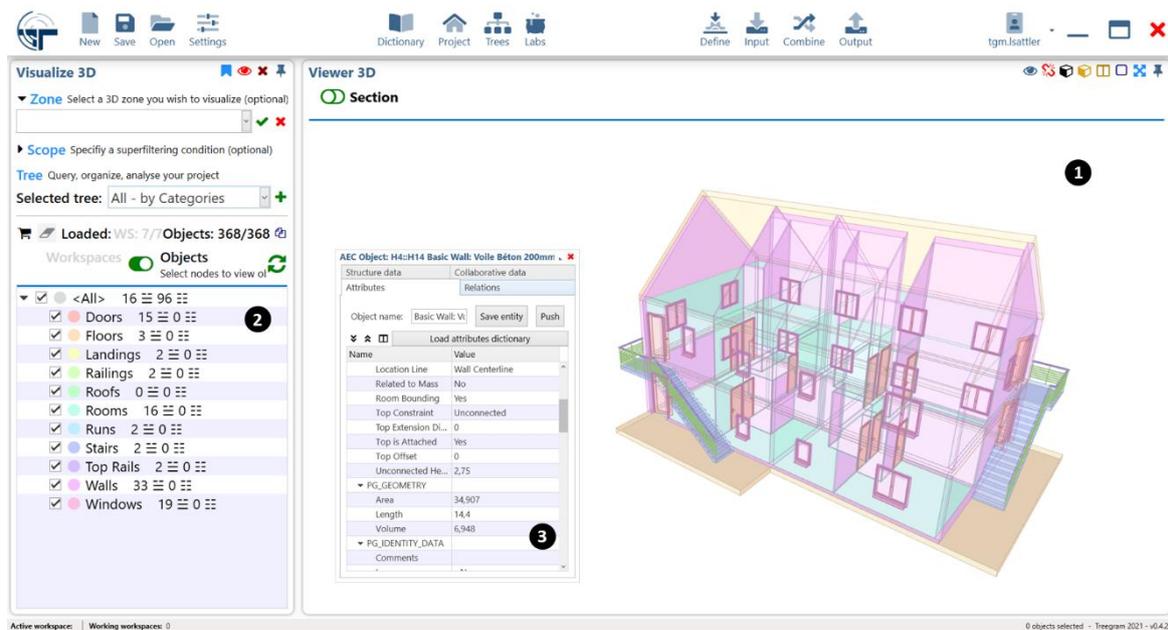


Figure 39 Interface Utilisateur - Dashboard

Les arbres sont stockés dans des workspaces, et sont donc associés à des droits d'accès. Chaque équipe édite des arbres (lecture-écriture), et les partage ou non avec les autres équipes (en lecture seule ou en lecture-écriture).

L'utilisation du mot *arbre*, pour désigner l'espace d'exploration de la donnée, n'est pas innocente. Elle s'inscrit dans une continuité avec les arbres de conception des logiciels PLM comme CATIA, ou les arborescences des logiciels BIM évoqués au chapitre 3, comme Revit (Project Browser), Navisworks (Selection Tree) ou Solibri. **Dans Treegram, c'est donc aussi via une arborescence que l'utilisateur accède à la donnée ; toutefois, cette arborescence est dynamique, et constituée de requêtes BIM**, ce que nous allons montrer dans les sous-sections suivantes.

4.4.2 Les nœuds : espace de création de requêtes

Pour créer une requête au sein d'un arbre, l'utilisateur utilise la fonctionnalité `Create node`. La Figure 40 montre :

- (1) **L'édition d'une requête** sur les objets ayant pour paramètre de `Category` la valeur `Walls`.
- (2) **Les résultats de cette requête sont collectés dans un tableau.**

- (3) **Les résultats de cette requête s'affichent dans la visionneuse** – soit les représentations 3D des objets concernés par la requête.
- (4) **Le résumé quantitatif de la requête apparaît dans l'arbre** : la requête sur le nœud <A11> a donné un résultat de 33 objets, qui sont tombés dans le nœud Walls ; 66 objets sont restés bloqués dans le nœud <A11>, car ils ne correspondent pas aux résultats de la requête.

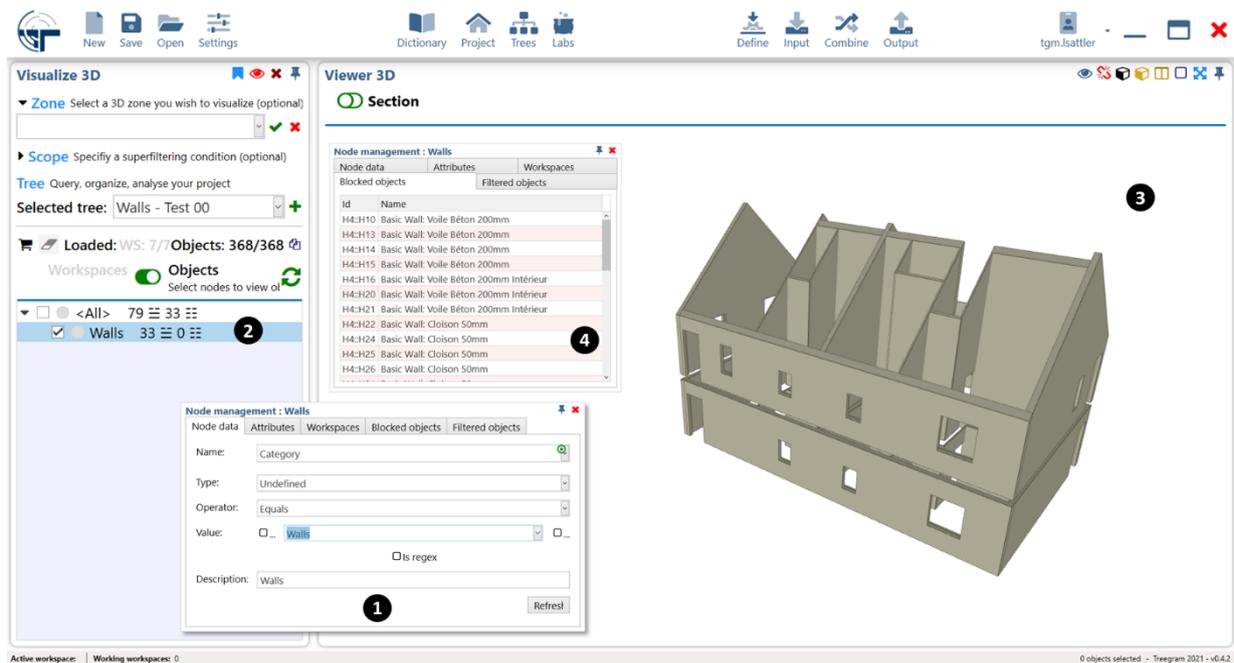


Figure 40 Exemple d'une requête et de son résultat

Comme le montre la Figure 41, les requêtes peuvent porter sur le nom d'un paramètre (1), sur la valeur d'un paramètre (2) ou sur les deux (3). En outre, les requêtes peuvent être précises (4) ou vagues (5) : par exemple, un utilisateur peut rechercher des valeurs qui sont strictement égales à une chaîne de caractères spécifique (4), ou contiennent cette chaîne de caractère (5) ; enfin, l'utilisation de la syntaxe `regex`¹¹ (6) peut être utilisée pour créer des requêtes complexes, avec des `et/ou`.

¹¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Regular_expression

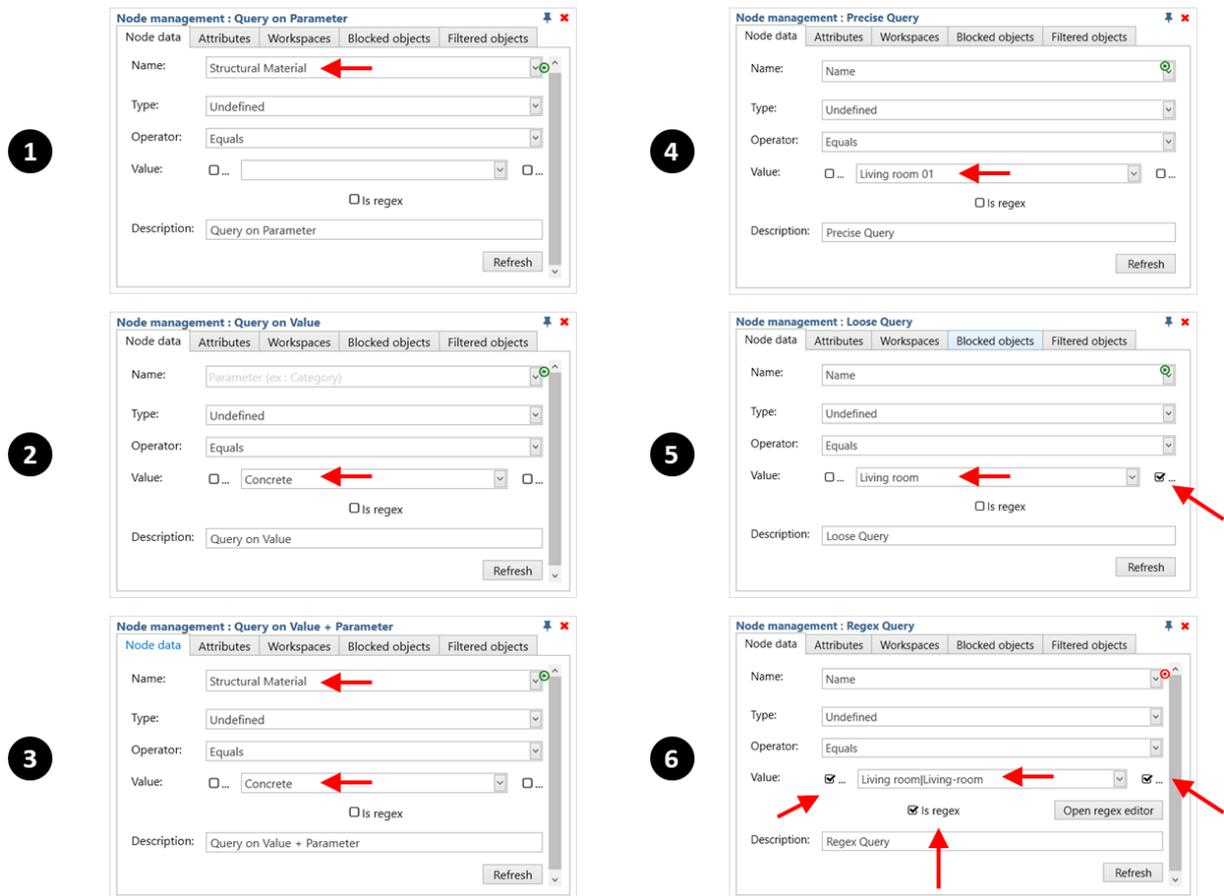


Figure 41 Différents types de requêtes

Si l'utilisateur ne connaît pas le nom ou la valeur du paramètre à rechercher, il va, comme illustré dans la Figure 42, sélectionner visuellement un objet dans la visionneuse 3D (1), accéder à la liste de ses paramètres (2) et sélectionner le paramètre sur lequel effectuer une requête (3). Un menu déroulant permet de retrouver le paramètre sur lequel effectuer une requête, ou la valeur à requêter (Figure 43). **L'une des visées de Treegram est de permettre l'exploration d'une base de données par des utilisateurs non experts (ni en informatique ni en formats BIM) ; les interfaces utilisateurs de Treegram ont donc été pensées de manière à être les plus intuitives et user-friendly possible.**

Ayant montré comment des requêtes peuvent être effectuées dans Treegram, nous montrerons dans la sous-section suivante comment celles-ci peuvent être organisées.

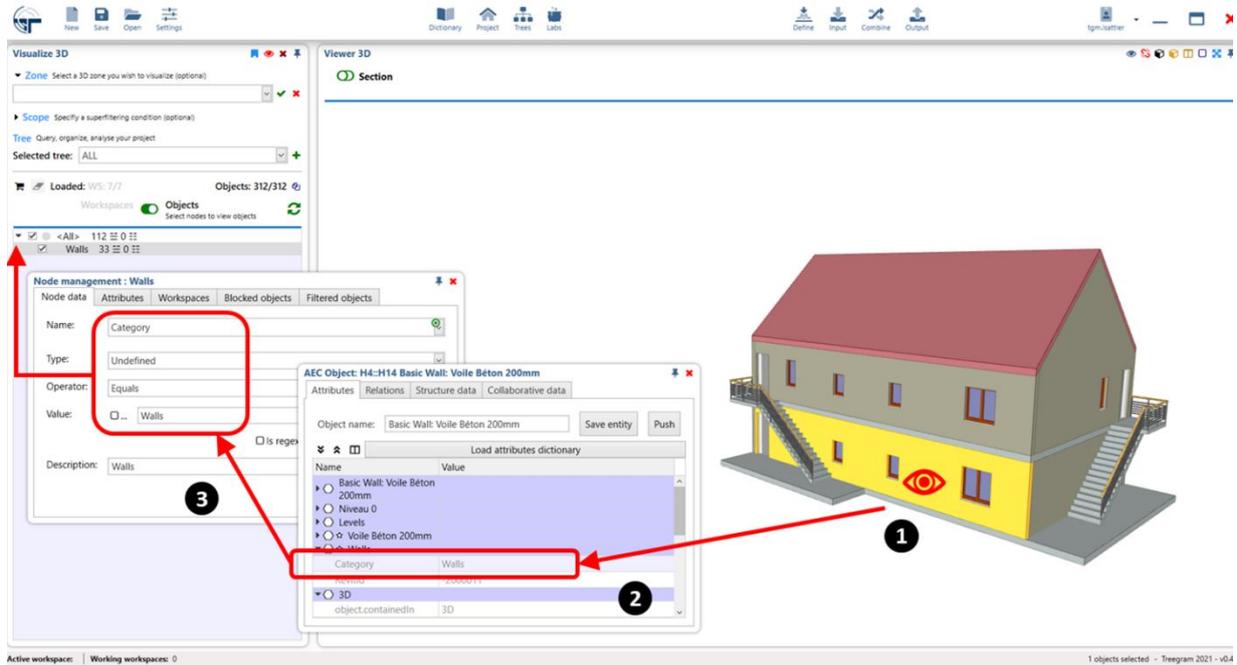


Figure 42 Requête basée sur l'analyse de paramètres depuis la visionneuse

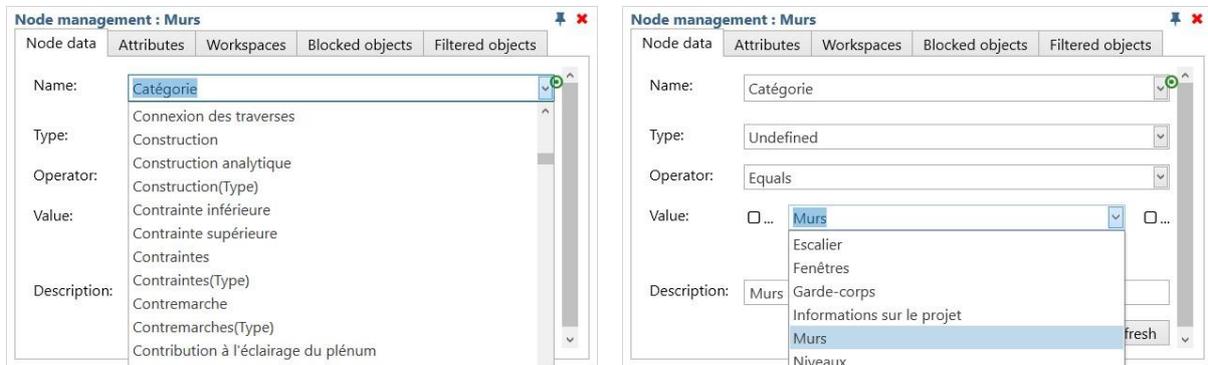


Figure 43 Menus déroulants aidant à la formulation des requêtes

4.4.3 Arborescence dynamique de requêtes : vues métier

Les arbres de Treegram sont pensés pour organiser des ensembles de requêtes. Un arbre est l'espace où un utilisateur va constituer une vue métier – c'est-à-dire une vue qui rassemble à ce qu'il souhaite voir et extraire d'un ensemble de données BIM, et qui est organisée de la manière qui convient à l'usage qu'il en fera.

Les requêtes étant effectuées et stockées dans des nœuds, ceux-ci peuvent être itérativement combinés ; c'est-à-dire que l'utilisateur peut effectuer une requête sur le résultat d'une précédente requête. Les Figure 44 et 45 illustrent une combinaison de requêtes :

1. Dans la Figure 44 et la Figure 45, la 1^{ère} requête porte sur le paramètre `Category` pour la valeur `Walls` et collecte 33 objets (requête de la Figure 40).
2. Dans la Figure 44, la 2nde requête, effectuée sur la base des 33 objets collectés dans la 1^{ère} requête, porte sur le paramètre `Function` pour la valeur `Exterior` ; huit objets sont collectés ; 25 (=33-8) objets sont restés dans le nœud de la 1^{ère} requête.
3. Dans la Figure 45, une 3^{ème} requête est effectuée, sur la base de la 1^{ère} requête, en complément de la seconde, toujours sur le paramètre `Function`, mais pour la valeur `Interior` ; 25 objets sont collectés, et aucun mur n'est plus dans le 1^{er} nœud ($33-(8+25)=0$).

Ces assemblages itératifs de requêtes permettent de formuler intuitivement des requêtes complexes, incluant des `et/ou`. Dans la Figure 46, les deux requêtes en parallèle (2) correspondent à la requête complexe «`Category = (Walls OR Windows)`» (1) ; dans la Figure 47, les deux requêtes itératives (2) correspondent à la requête complexe «`(Category = Walls) AND (Contains "Cloison")`». Si une requête complexe peut-être formulée en une fois dans un nœud avec la syntaxe `regex`, l'assemblage de requêtes simples permet de visualiser l'architecture des requêtes dans un arbre, et est plus accessible aux utilisateurs non aguerris à la programmation.

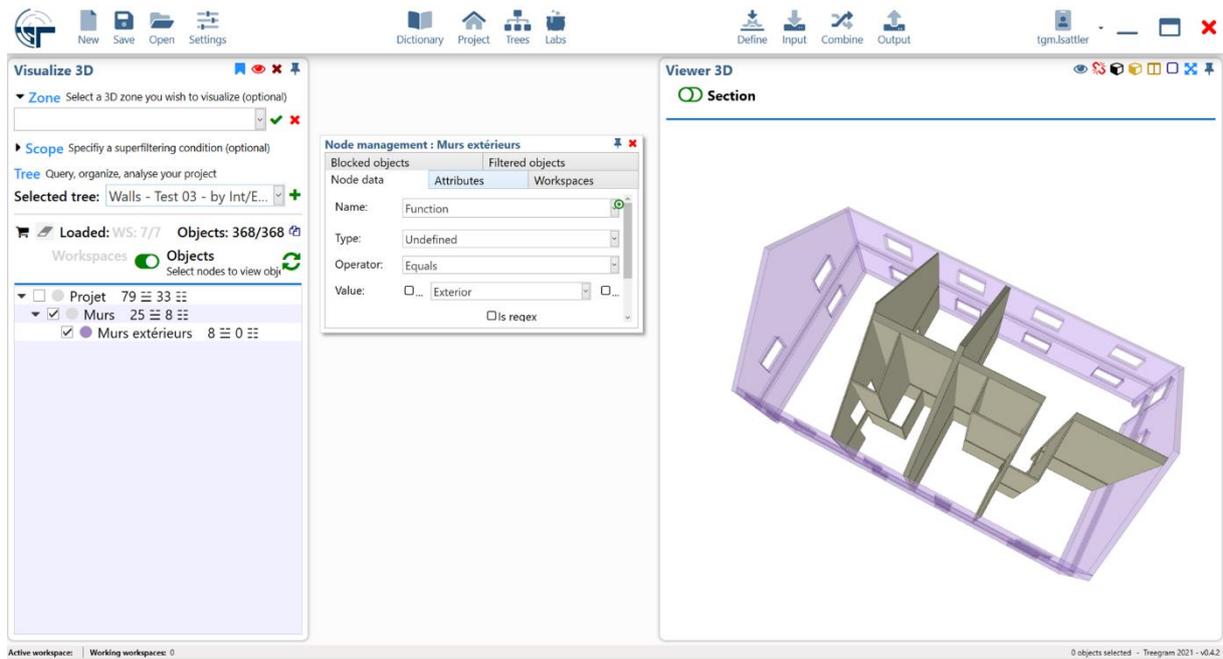


Figure 44 Requête itérative

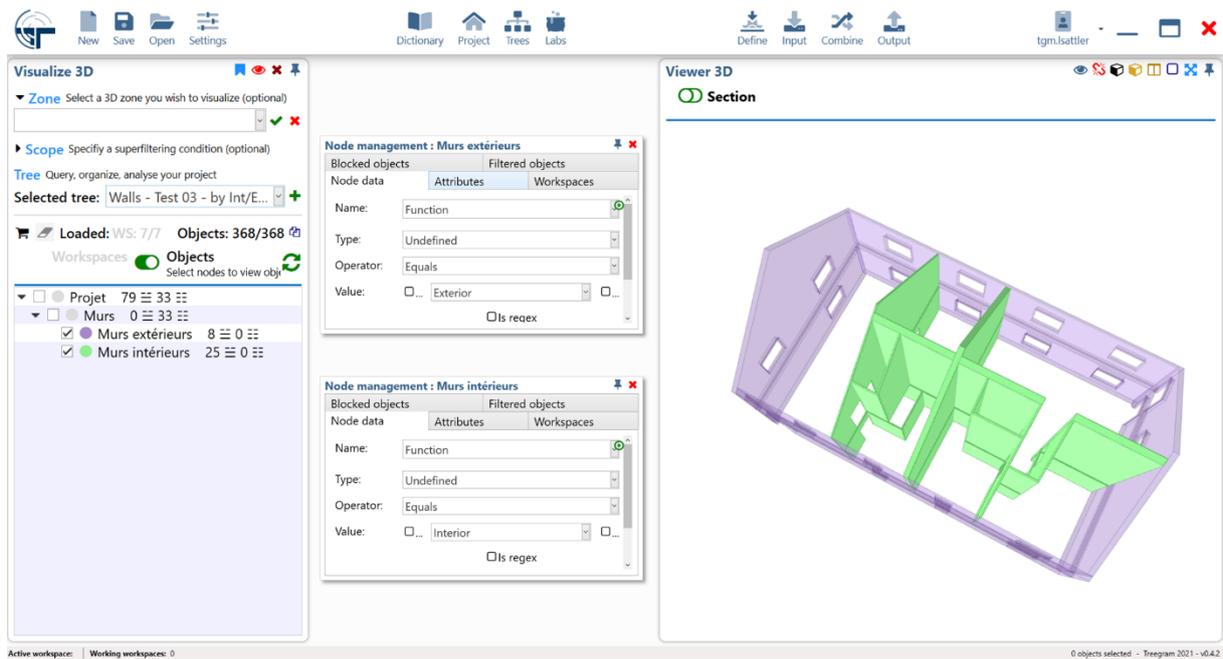
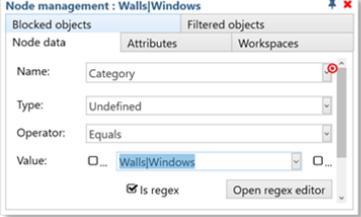
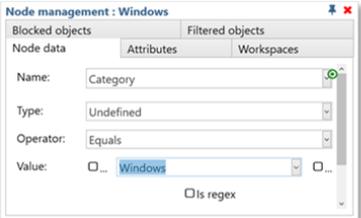
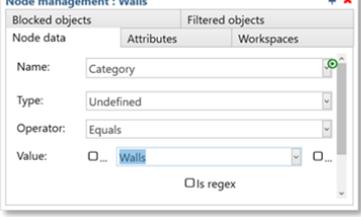


Figure 45 Requêtes itératives et en parallèle

1

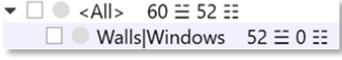


2

« OR » condition

1



2

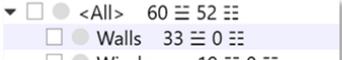
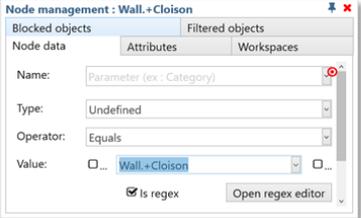


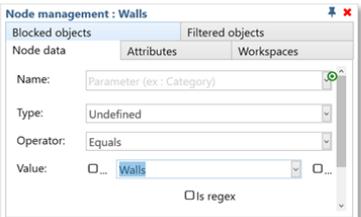
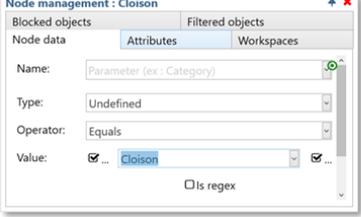


Figure 46 Requête complexe et assemblage de requêtes simples - Condition « OU »

1

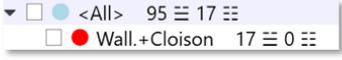


2

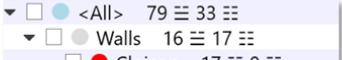



« AND » condition

1



2



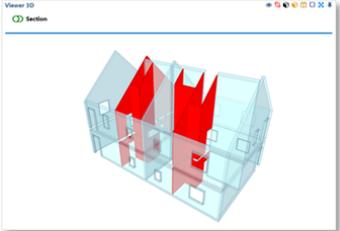


Figure 47 Requête complexe et assemblage de requêtes simples - Condition « ET »

Les nœuds fonctionnent donc comme un assemblage de tamis qui laissent tomber les objets (objets tombés) ou les bloquent (objets bloqués). Ces requêtes pourraient couramment être assimilées à des *filtres* sur des objets BIM, comme l'ont suggéré certains bêta-testeurs de Treegram. En effet, comme vu dans le chapitre 3, le fait d'effectuer des requêtes dans des bases de données n'est pas conceptualisé dans les logiciels BIM courants, et est souvent amalgamé avec la notion de *filtrage*. Mais le mot *filtre*, appliqué à un ensemble de données BIM, est trop ambigu : comme c'est le cas dans Revit, il peut désigner à la fois l'objet filtrant (action de filtrer), ce qui est filtré (bloqué) ou le résultat du filtrage (tombé) - en d'autres termes, par une analogie avec le café filtre, seraient concernés à la fois le filtre papier (action de filtrer) le marc de café (bloqué) et le café à boire (tombé). Le mot *filtre* a donc été banni du champ lexical de l'interface utilisateur, au profit du mot *nœud*.

L'assemblage de nœuds permet à l'utilisateur de créer des vues métier ; c'est-à-dire d'aller chercher les données qui l'intéressent, et de les organiser selon les paramètres dont il a besoin – ce qu'illustrent les Figure 48 et Figure 49. La première est une vue métier générale d'un économiste du bâtiment, qui va distinguer les murs intérieurs et extérieurs (là où par exemple un ingénieur séparerait les murs en porteurs et non porteurs), les sols en planchers bas, intermédiaire et bas. La seconde montre une autre vue métier du même économiste, visant à établir un quantitatif pour les surfaces de finition (peinture, parquet). Dans les deux cas, l'économiste a pu classifier les données dont il a besoin de manière dynamique.

Dans Treegram, un utilisateur peut donc créer une vue métier en assemblant des requêtes dynamiques (nœuds) dans un espace d'exploration de la donnée (arbre). Dans une optique de collaboration multi-métier, les arbres capturent la façon dont un métier collecte, organise et utilise les données BIM d'un autre métier. Dans la section suivante, nous montrerons comment ces arborescences dynamiques deviennent le support d'un processus d'enrichissement des données.

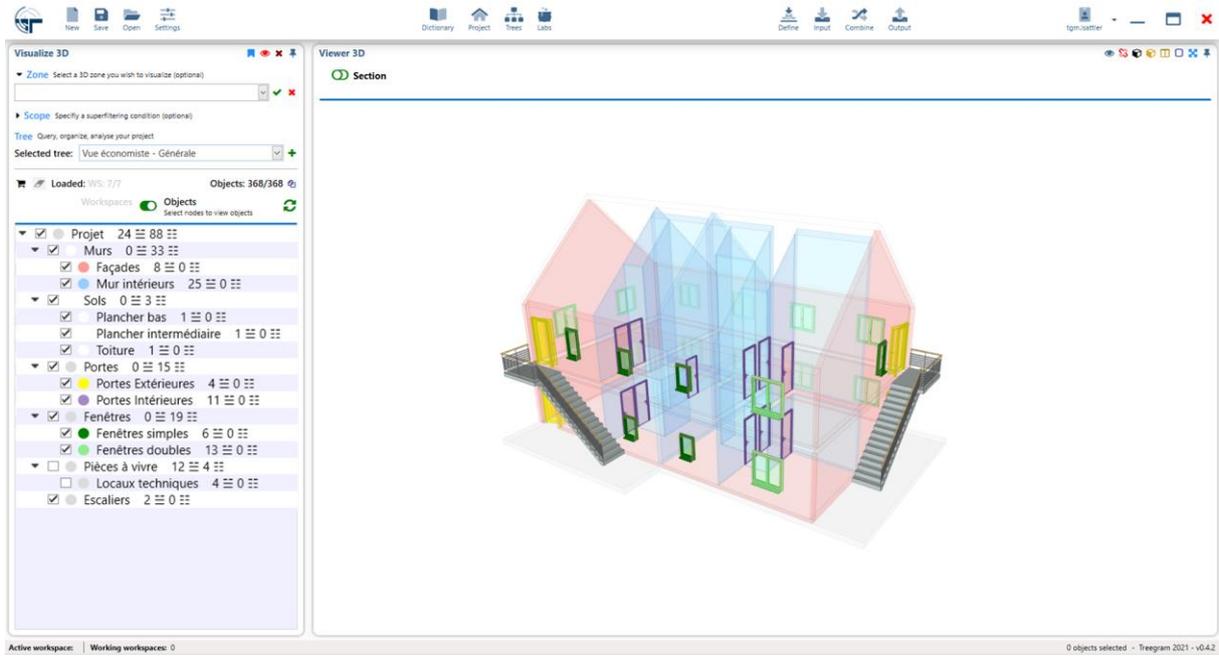


Figure 48 Vue métier dans Treegram - A

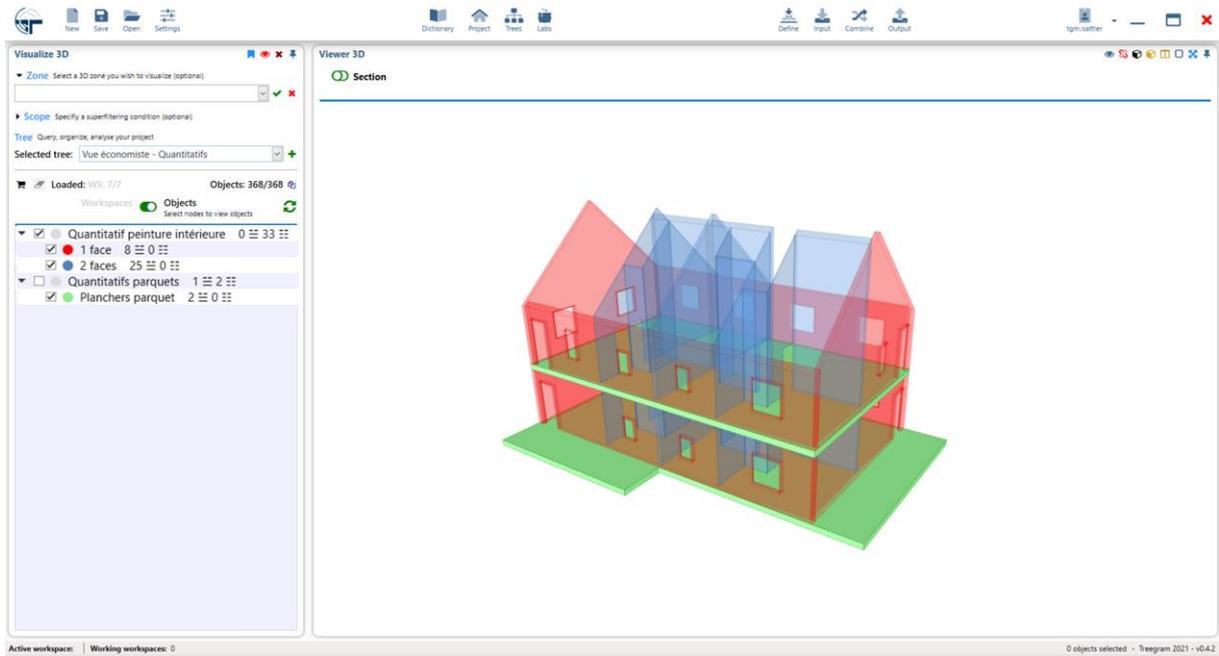


Figure 49 Vue métier dans Treegram - B

4.5 Vérification et enrichissement de données

Les arbres de Treegram, s'ils permettent de créer des vues métier par assemblage de requêtes, impliquent et permettent trois autres cadres d'action pour la collaboration multi-métier : un cadre de franchissement des itérations ; un cadre de vérification des données ; un cadre d'enrichissement des données. La collaboration multi-métier correspond à la situation d'interopérabilité n° 2 décrite dans le chapitre 3, où un utilisateur consulte et utilise des données dont il n'est pas l'auteur, et dont il ne connaît par conséquent pas la structuration a priori, et dont il n'est pas propriétaire (qu'il ne peut donc pas éditer directement à la source).

4.5.1 Franchissement des itérations

Treegram vise à établir une continuité des données à travers les itérations de projet. Comme l'utilisateur stocke des requêtes dans ses arbres, il pourra retrouver ses requêtes au fil des itérations de projet, et surtout, les requêtes, par définition dynamiques, se mettront à jour au fil des modifications de la base de données – et donc avec l'évolution du projet. Comme mentionné précédemment, **l'action de rechercher et d'organiser des données d'un autre métier est la base ou la racine de toute action collaborative BIM ; Treegram vise à éviter à un utilisateur de refaire cette action à chaque nouvelle itération de projet.**

Illustrons cela par une situation concrète, et réutilisons l'exemple de la Figure 48, dans laquelle l'économiste doit distinguer, pour chiffrer un projet, les murs extérieurs des murs intérieurs d'une maquette BIM modélisée par un architecte. Classiquement, sans Treegram, l'économiste va ouvrir la maquette BIM de l'architecte, dans son format natif ou en format IFC ; sélectionner les éléments qui l'intéressent (via des filtres, ou à la main, selon les logiciels) ; les copier-coller dans sa maquette BIM, ce qui implique parfois de les remodeliser (dans le cas où ils proviennent d'un IFC, format difficilement éditable, comme mentionné dans le chapitre 3). A la prochaine itération, il devra recommencer ce processus de sélection et d'extraction de données depuis le nouveau fichier envoyé par l'architecte (sauf si cet utilisateur sait programmer, auquel cas il sera capable d'aller créer des requêtes via son interface de scripting, visuelle ou non, et de pointer dynamiquement vers les inputs dont il a besoin ; mais comme mentionné plus haut, ce profil d'utilisateur programmeur est encore trop peu courant dans l'AEC). Dans Treegram, l'utilisateur ne fait cette action de recherche et d'organisation de données qu'une seule fois, lors

de la création et organisation initiale de requêtes ; dès que son arborescence de nœuds est créée, il retrouvera à chaque itération ses requêtes pointant dynamiquement vers les nouvelles données, qui retomberont dans les nœuds déjà créés. **Treegram vise à établir une continuité entre un utilisateur et des données dont il n'est pas propriétaire, à travers les multiples itérations de projet.**

4.5.2 Vérification des données

Le second cadre permis par Treegram, c'est celui de la vérification des données, qui découle directement de l'assemblage itératif des requêtes entre elles. En effet, l'interrogation des données via des paramètres permet aussi, in fine, de vérifier que ces paramètres existent, ou qu'ils sont correctement renseignés. En pratique, quand une requête est lancée, l'utilisateur peut analyser son résultat selon trois modalités : via la visionneuse 3D, via le tableau de résultat, et via le nombre d'éléments tombés/bloqués indiqué dans les nœuds (Figure 39). S'il n'a pas le résultat attendu, et s'il est toutefois certain que sa requête est correctement formulée, l'utilisateur peut en déduire que les données n'ont pas été paramétrées selon ses besoins ; certainement parce que leur auteur n'a pas besoin dudit paramétrage, qui ne correspond pas à son métier. On touche ici du doigt le frein des différences sémantiques de structuration de données entre plusieurs métiers.

La Figure 50 illustre ce cas : l'utilisateur, un ingénieur structure, fait une requête sur la caractéristique structurelle des murs d'une maquette fournie par un architecte. Or cette requête ne collecte que deux murs porteurs, ce qui signifie que pour certains murs, le paramètre `Structural` n'a pas été renseigné. Cette situation est courante. En effet, si ce n'est pas un prérequis BIM mentionné dans la convention BIM, l'architecte ne se soucie pas forcément, de cette distinction formelle entre murs porteurs et cloisons, et ce pour deux raisons possibles : la 1^{ère}, c'est que c'est une donnée partiellement déductible d'autres données métier, qui, elles, sont bien renseignées dans la maquette. Par exemple, il est quasiment évident qu'un mur en béton de plus de 18 cm d'épaisseur est porteur, et il peut paraître inutile et redondant à l'architecte de le renseigner formellement. La 2nde raison, c'est que l'architecte peut ne pas être certain de la qualité structurelle de certains murs – et c'est justement à l'ingénieur structure de renseigner formellement cette information. Cette requête sur le paramètre `Structural` permet donc à

l'ingénieur structure de constater que la caractéristique structurelle de certains murs n'est pas strictement renseignée. Si cette donnée est prérequisée par la convention BIM, il peut demander à l'architecte de compléter son modèle. Dans le cas contraire, c'est à lui de la compléter, et il peut enrichir le modèle via Treegram - ce qui est détaillé dans la sous-section suivante. **En assemblant itérativement des requêtes dans Treegram, afin de rechercher et retrouver des données, un utilisateur construit aussi incidemment un cadre d'analyse et de vérification de ces données.**

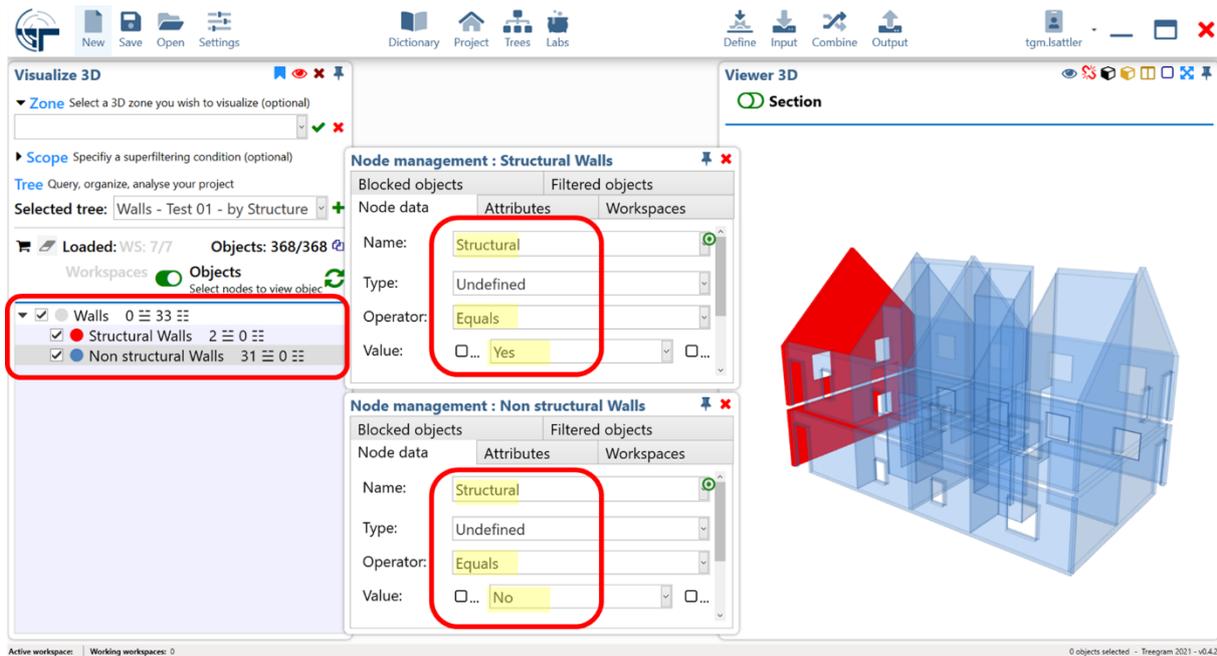


Figure 50 Requête révélant un manque de paramétrage

4.5.3 Enrichissement des données

Treegram amène l'utilisateur à enrichir des sets de données, soit à modifier les paramètres d'un ou plusieurs objets. Comme illustré dans la Figure 51, un utilisateur peut modifier les métaobjets d'un ou plusieurs objets à la fois (respectivement 1, 2).

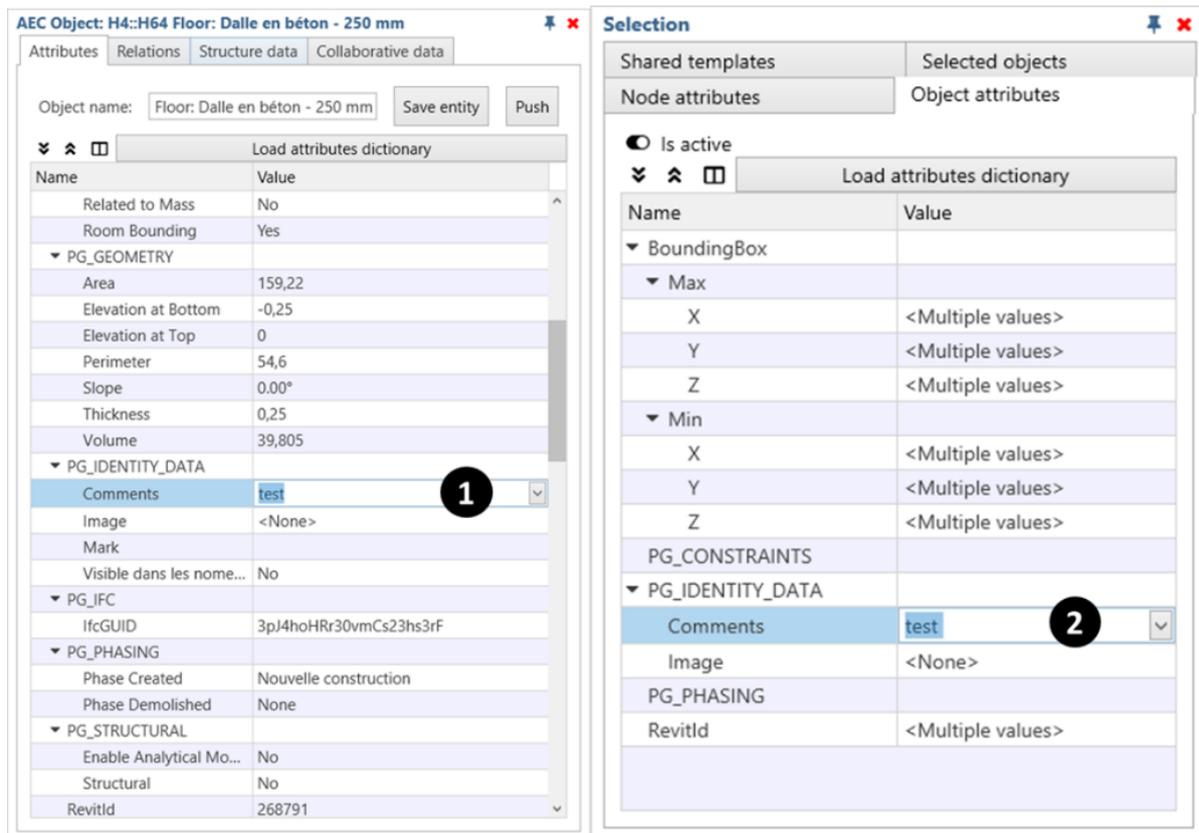


Figure 51 Modification d'un ou plusieurs attributs dans Treegram

Les nœuds de l'arbre sont la base sur laquelle l'enrichissement de donnée a lieu. L'exemple de la Figure 50 montrait un exemple de paramètres structurels manquants sur certains murs ; afin de corriger ceci, l'utilisateur va passer par d'autres catégories pour identifier les murs qu'il estime être porteur. C'est ce qui est illustré dans la Figure 52, où l'utilisateur a classifié ses murs par épaisseur, ce qui lui permet de sélectionner les murs susceptibles d'être porteurs (ceux qui ont une épaisseur de plus de 15 cm) et de modifier leur paramétrage – comme illustré dans Figure 53. Dans ce cas précis, **l'utilisateur a créé une requête dans le but de modifier donc d'enrichir un set de donnée**. En repassant sur son arbre initial, celui qui interroge le paramètre `Structural`, l'enrichissement des données peut être vérifié, comme illustré dans la Figure 54 : le paramètre `Structural` a bien été modifié sur les murs, et désormais, tous les murs porteurs sont formellement renseignés et identifiés.

Les requêtes ne servent donc pas uniquement à rendre compte de données, mais aussi à les consolider et les enrichir via un cycle requête > vérification > enrichissement > requête, comme illustré dans la Figure 55.

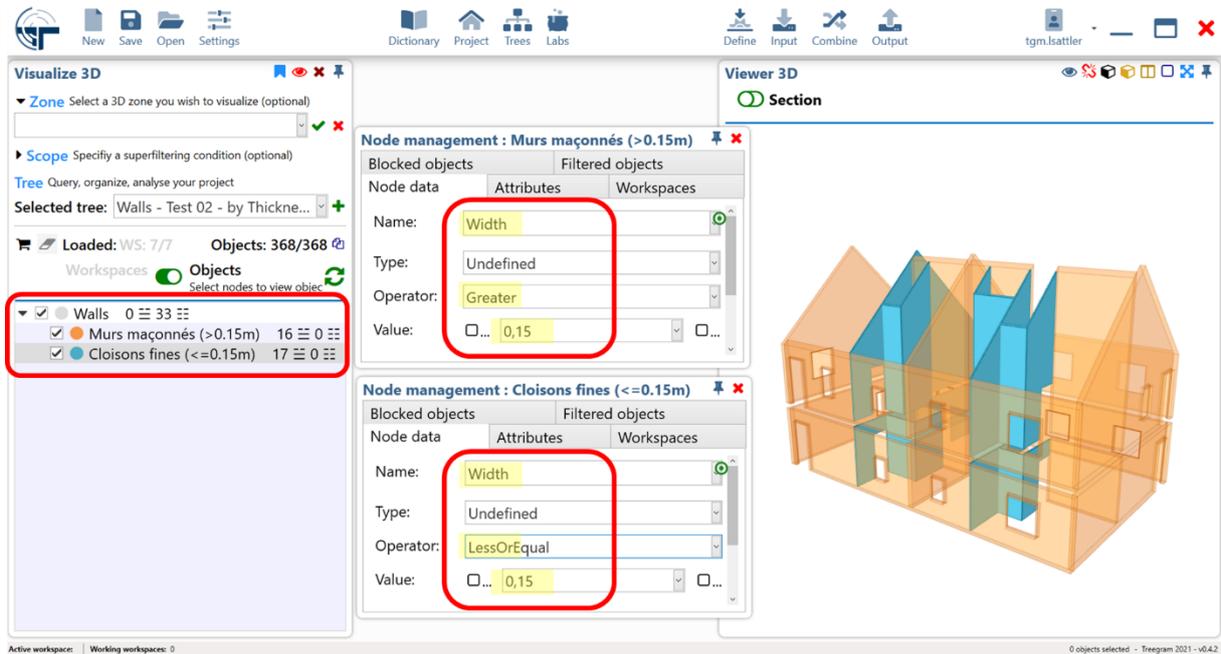


Figure 52 Requête permettant de reclassifier des données

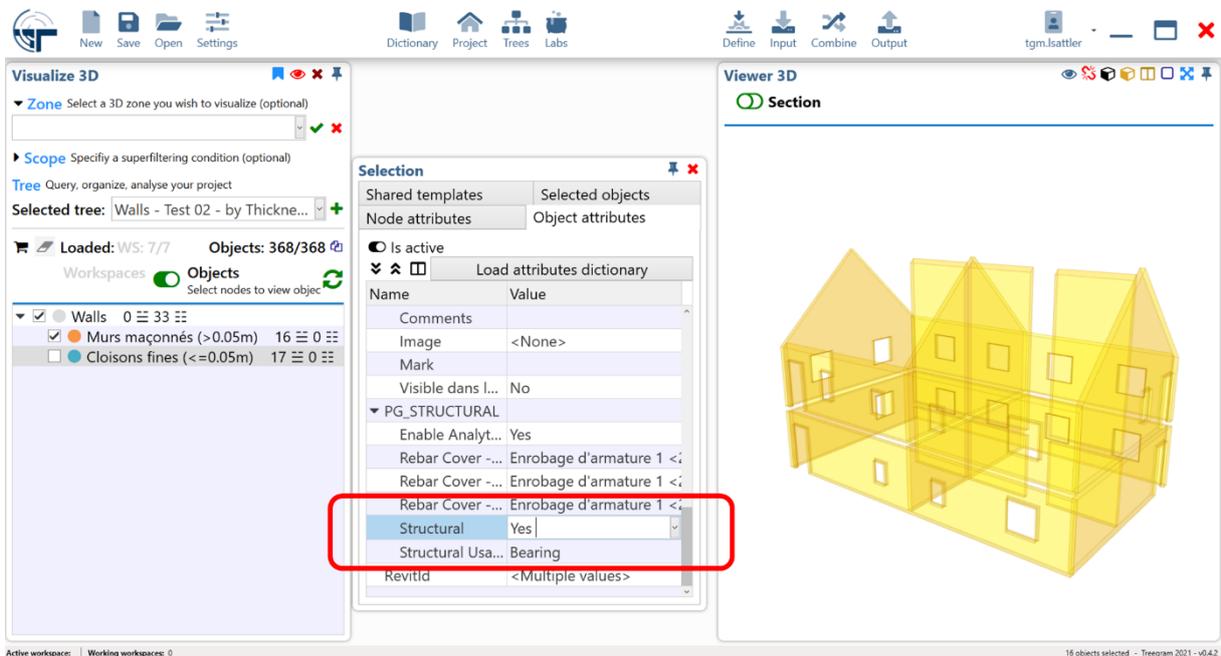


Figure 53 Enrichissement de données

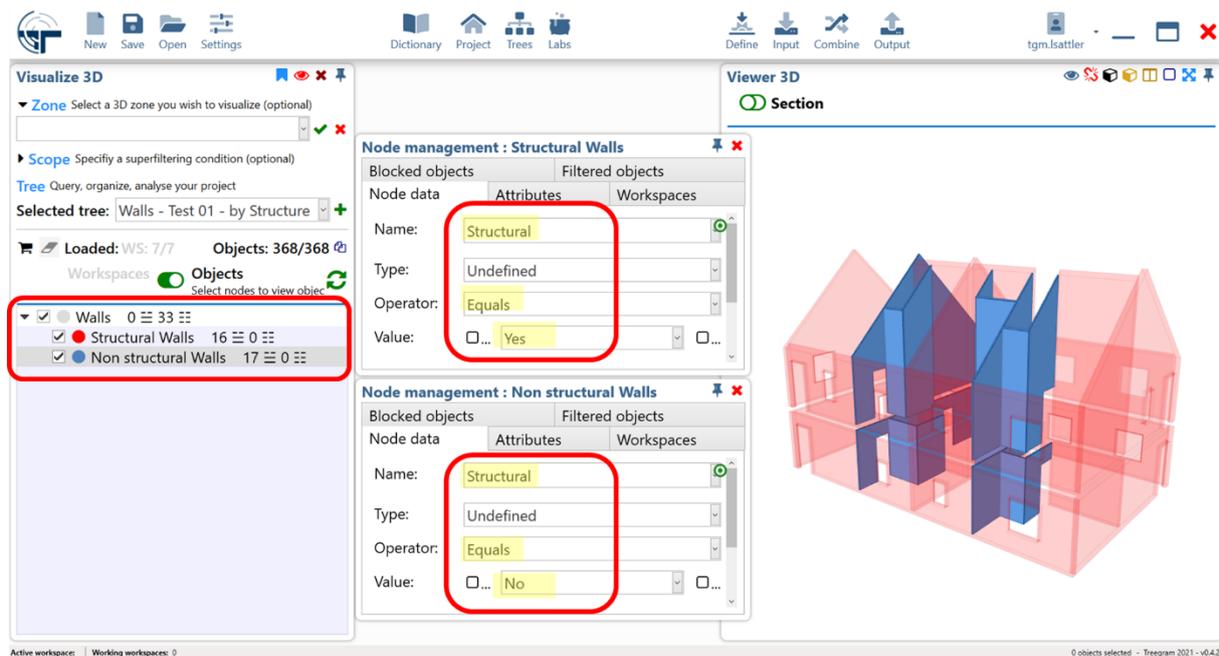


Figure 54 Vérification de l'enrichissement de données



Figure 55 Cycle Requête - Vérification - Enrichissement

Un frein subsiste : typiquement, les données d'une entreprise A ne sont pas éditables par une entreprise B, pour des questions contractuelles de propriété de la donnée (l'édition multi-métier de paramètres se développe toutefois sur certains grands projets, notamment entre des économistes et des architectes ; mais ce n'est pas la norme, et reste extrêmement rare). La fonctionnalité d'extension permet de pallier ce problème. L'extension de l'objet A est un objet complémentaire lié à l'objet A, éditable par une équipe B ; ainsi, l'équipe B peut compléter un objet de l'équipe A, sans empiéter sur les droits d'accès de celle-ci (Figure 56). De plus, l'équipe A peut continuer à modifier son objet A, qui restera lié à l'extension A ; et l'équipe B peut compléter l'objet via son extension, sans risquer de voir ses modifications écrasées lors des itérations de l'objet A : un lien permanent est créé entre l'objet A et l'extension A, qui résiste aux différentes itérations (Figure 57). **Les extensions visent à créer des liens robustes entre des sets de données édités par différentes sources. L'obstacle franchi ici est celui des**

conteneurs des sets de données : comme vu dans le chapitre 3, l'enveloppe des fichiers empêche globalement la propagation données BIM, ce que tendent à pallier les extensions.

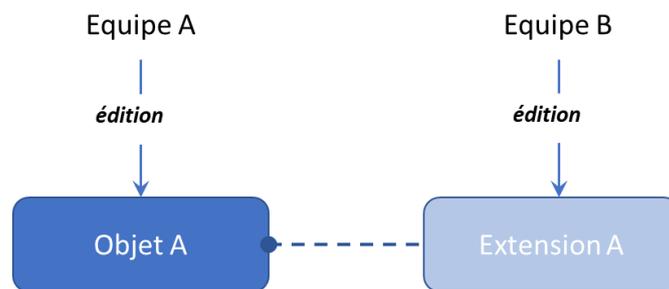


Figure 56 Extension

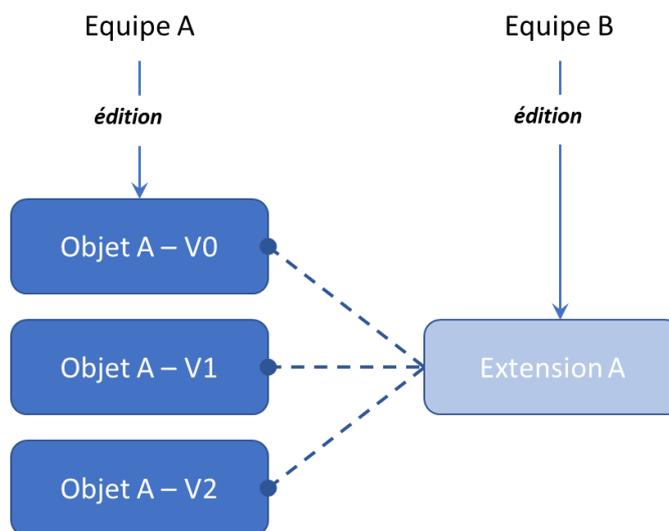
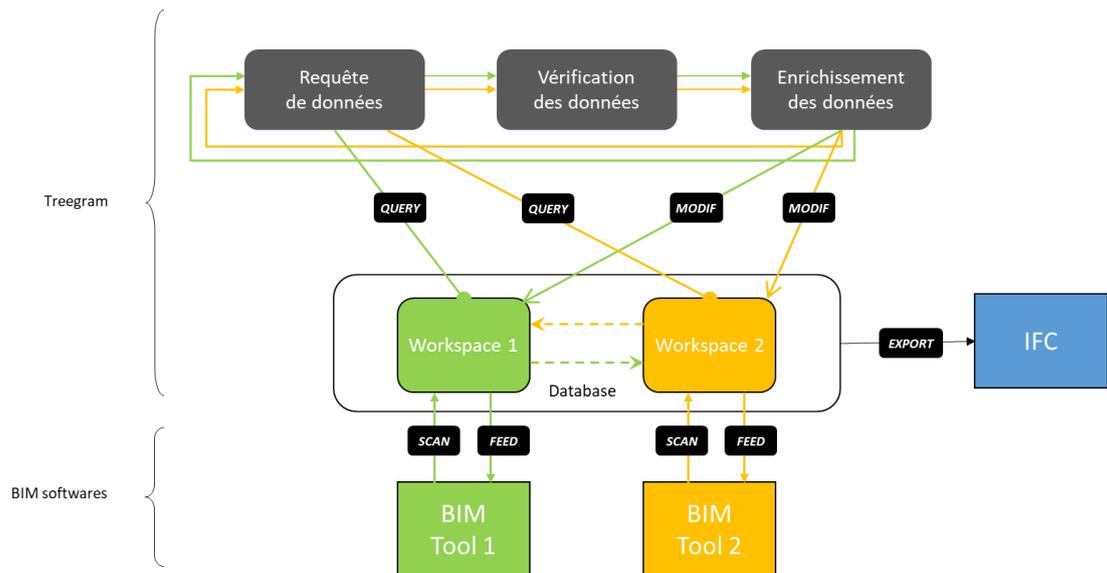


Figure 57 Extension et itération

Comme illustré dans la Figure 58, une fois un set de donnée enrichi, l'utilisateur va renvoyer les données modifiées dans Treegram dans un ou plusieurs logiciels source : il peut les exporter en IFC, ou les renvoyer dans son logiciel métier via les fonctionnalités de `Feed` (qui fonctionnent pour l'instant avec les logiciels Rhino et Revit ; il peut aussi les importer dans Rhino ou Revit via respectivement Grasshopper et Dynamo, qui peuvent se connecter à la base de données de Treegram).

Via Treegram, un utilisateur peut donc enrichir un set de données dont il est propriétaire, mais aussi un set de données qu'il n'a pas modélisées, édité par une autre discipline que la sienne – puis renvoyer ces données enrichies dans différents logiciels BIM.



Légende



Figure 58 Cadre de co-modélisation via Treegram
Requêtes - Vérification - Enrichissements - Export/Feed

Plusieurs obstacles à la collaboration BIM multi-métier identifiés dans le chapitre trois ont été partiellement surmontés via Treegram. Les obstacles liés aux conteneurs de données sont adressés par la fédération et le décloisonnement de différents fichiers dans une base de données neutre, et par la création d'extensions, qui sont des liens entre des sets de données initialement cloisonnés et donc déconnectés. Les obstacles liés à l'hétérogénéité des modèles de données et aux différences sémantiques entre les objets BIM de différents métiers sont adressés par la capacité à créer, assembler et organiser des requêtes BIM, ce qui permet à un utilisateur d'appréhender et d'enrichir la donnée produite par un autre métier que le sien. Nous exposerons dans la section suivante différents tests élémentaires de l'application Treegram.

4.6 Tests de Treegram

Afin d'étayer l'hypothèse de la collaboration par requêtes et enrichissements, l'application logicielle doit être évaluée. Cette section décrit trois tests réalisés : un test de robustesse, un test

de création de vues métier, un test d'interrogation et enrichissement de données multi-sources (Sattler, Lamouri, Larabi, et al., 2020).

4.6.1 Test de robustesse

Ce 1^{er} test vise à vérifier la capacité de la base de données Treegram et à contrôler qu'aucune donnée n'est perdue lors du processus de scan. Il a été réalisé sur la base de la maquette BIM d'un immeuble de bureaux modélisée dans Revit. La maquette a été scannée dans Treegram et une requête a été faite pour collecter tous les murs dans un nœud (Category = Walls).

Une comparaison visuelle puis numérique a ensuite été effectuée entre Revit et Treegram pour vérifier qu'il n'y ait pas de perte de données. La comparaison visuelle (Figure 59 – 1, 2) est confirmée par les chiffres (Figure 59 – 3, 4) : la maquette Revit contient 1 890 murs, ce qui correspond au nombre d'objets de catégorie murs tombant dans le nœud. Enfin, les paramètres (noms et valeurs) d'un mur ont été comparés entre Revit et Treegram (Figure 60) : l'intégralité des paramètres est conservée. **Aucune donnée n'a été perdue : ce 1^{er} test est donc concluant.**

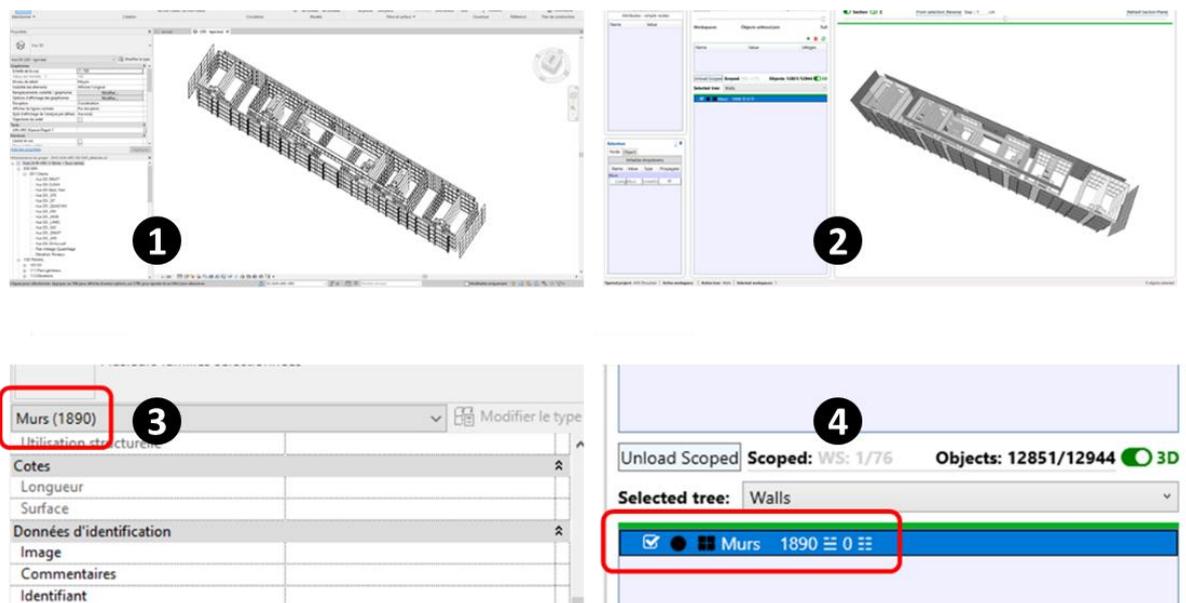


Figure 59 Test de robustesse – Comparaison du nombre d'éléments, dans Revit et Treegram

| Propriétés | | |
|---|-------------------------------------|----|
| Mur de base #ARC_G030_TOL2_STR26_TOL2_PROVISOIRE 30 | | |
| Murs (1) Modifier le type | | |
| Contraintes | | |
| Ligne de justification | Nu fini: Extérieur | 1 |
| Contrainte inférieure | RDR | 2 |
| Décalage inférieur | -0.0700 | 3 |
| Partie inférieure attachée | | 4 |
| Extension inférieure | 0.0000 | 5 |
| Contrainte supérieure | Sans contrainte | 6 |
| Hauteur non contrainte | 5.7500 | 7 |
| Décalage supérieur | 0.0000 | 8 |
| Partie supérieure attachée | | 9 |
| Extension supérieure | 0.0000 | 10 |
| Limite de pièce | <input checked="" type="checkbox"/> | 11 |
| Lié au volume | <input type="checkbox"/> | 12 |
| Texte | | |
| SSI | | 13 |
| Structure | | |
| Structure | <input type="checkbox"/> | 14 |
| Activer le modèle analytique | | 15 |
| Utilisation structurelle | Non porteur | 16 |
| Cotes | | |
| Longueur | 70.6802 | 17 |
| Surface | 406.411 m² | 18 |
| Volume | 121.923 m³ | 19 |
| Données d'identification | | |
| Image | | 20 |
| Commentaires | | 22 |
| Identifiant | | 23 |
| Sous-projet | ARC_CONTEXTE | 24 |
| Modifié par | | 25 |
| Variantes | Modèle de base | 26 |
| Phase de construction | | |
| Phase de création | Nouvelle construction | 27 |
| Phase de démolition | Aucun(e) | 28 |
| Protection contre les incendies | | |
| CF/PF | | 29 |

| Attributs | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------|--|-------------------------------|
| Mode | Meta object | Valeur | Type Propagate |
| #ARC_G030_TOL2_STR26_TOL2_PROVISOIRE | | | |
| | objectname | #ARC_G030_TOL2_STR26_TOL2_PROVISOIRE | Unid <input type="checkbox"/> |
| | RevitID | 7957202 | Unid <input type="checkbox"/> |
| | IsNew | True | Unid <input type="checkbox"/> |
| | → PG_IDENTITY_DATA | | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 25 Modifié par | | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 26 Variantes | -1 | Unid <input type="checkbox"/> |
| | Nom du type | | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 23 Identifiant | | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 24 Sous-projet | ARC_CONTEXTE | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 22 Commentaires | | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 20 Image | +Aucun+ | Unid <input type="checkbox"/> |
| | → PG_CONSTRAINTS | | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 12 Lié au volume | Non | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 11 Limite de pièce | Oui | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 7 Hauteur non contrainte | 5.75 | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 10 Extension supérieure | 0.00 | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 6 Contrainte supérieure | Sans contrainte | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 8 Décalage supérieur | 0.00 | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 4 Partie inférieure attachée | Non | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 5 Extension inférieure | 0.00 | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 3 Décalage inférieur | -0.07 | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 9 Partie supérieure attachée | Non | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 2 Contrainte inférieure | RDR | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 1 Ligne de justification | Nu fini: Extérieur | Unid <input type="checkbox"/> |
| | → PG_PHASING | | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 28 Phase de démolition | Aucun(e) | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 27 Phase de création | Nouvelle construction | Unid <input type="checkbox"/> |
| | → INVALID | | Unid <input type="checkbox"/> |
| | Catégorie | Murs | Unid <input type="checkbox"/> |
| | Famille et type | Mur de base #ARC_G030_TOL2_STR26_TOL2_PROVISOIRE | Unid <input type="checkbox"/> |
| | Type | #ARC_G030_TOL2_STR26_TOL2_PROVISOIRE | Unid <input type="checkbox"/> |
| | Nom de la famille | | Unid <input type="checkbox"/> |
| | Famille | Mur de base | Unid <input type="checkbox"/> |
| | ID du type | 721050 | Unid <input type="checkbox"/> |
| | → PG_STRUCTURAL | | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 16 Utilisation structurelle | Non porteur | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 14 Structure | Non | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 15 Activer le modèle analytique | Non | Unid <input type="checkbox"/> |
| | → PG_GEOMETRY | | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 17 Longueur | 70.68 | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 18 Surface | 406.4 m² | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 19 Volume | 121.92 m³ | Unid <input type="checkbox"/> |
| | → PG_FIRE_PROTECTION | | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 29 CF/PF | | Unid <input type="checkbox"/> |
| | → PG_TEXT | | Unid <input type="checkbox"/> |
| | 13 SSI | | Unid <input type="checkbox"/> |

Figure 60 Test de robustesse : comparaison des métadonnées d'un mur, dans Revit et Treegram

4.6.2 Test de création d'une vue métier

Ce 2^{ème} test vise à vérifier que Treegram permet de créer une vue métier à partir d'une maquette BIM. Ce test d'évaluation a été réalisé d'après le cas d'usage suivant : un utilisateur a besoin de retrouver tous les éléments structurels d'une maquette BIM éditée par un architecte. Ce test a été réalisé deux fois, sur deux différents formats d'une même maquette : un format propriétaire natif, Revit (rvt), et le format neutre (ifc). Le protocole est le suivant : l'utilisateur doit effectuer la requête sans savoir comment le fichier BIM est structuré ni dans quel logiciel il a été créé. Dans un premier temps, les fichiers Revit et IFC ont été chargés ou scannés dans Treegram. L'hétérogénéité dans la structuration des données a été constatée entre les deux formats mais aussi au sein d'un même format : les éléments structurels sont interrogés dans le fichier Revit via le paramètre Structure pour les dalles et les murs, et via le paramètre Matériau structurel pour les poteaux structurels (la structuration des données dans Revit varie donc selon les catégories d'objets) ; dans l'IFC, les éléments structurels sont interrogés uniformément via le paramètre Loadbearing (Figure 61).

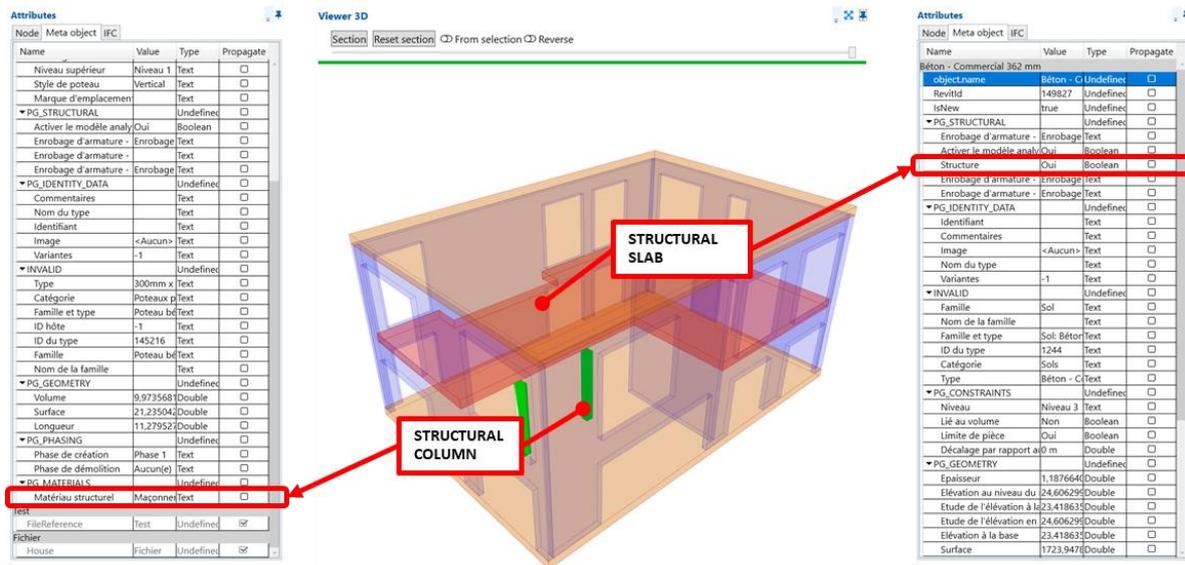


Figure 61 Hétérogénéité de la structuration des données au sein d'un même format

Les deux assemblages de requêtes sur les données Revit d'une part et IFC d'autre part sont détaillés respectivement dans les Figure 62 et Figure 63. La comparaison des deux arbres montre que, dans les deux cas, les dix éléments structurels de la maquette sont récupérés dans les nœuds (cinq murs, trois dalles, deux poteaux).

La création successive de requêtes permet à l'utilisateur de comprendre, de manière itérative, quels sont les paramètres à interroger afin de capturer les éléments qu'il recherche, d'une part en consultant les métadonnées d'un objet dans le viewer, et d'autre part, en analysant les éléments tombés et bloqués sur un nœud donné. Le processus est semi-automatisé : l'utilisateur utilise ses connaissances métier pour orienter le processus automatique de requête. Tregram permet donc la formalisation d'un processus qui serait traditionnellement réalisé de manière ad hoc et manuelle : l'utilisateur ouvrirait la maquette BIM dans Revit ou ouvrirait l'IFC via une visionneuse IFC ; il isolerait, à la main, les éléments structurels et les copierait dans son logiciel métier. Au mieux, il utiliserait ses compétences en programmation visuelle pour rechercher des éléments via Dynamo dans Revit. Dans tous les cas, il devrait connaître le modèle de données propriétaire (Revit) ou neutre (IFC). **Ce 2^{ème} test d'évaluation est donc positif : Tregram permet d'extraire des données partielles d'une maquette BIM dont la structure n'est pas connue a priori.**

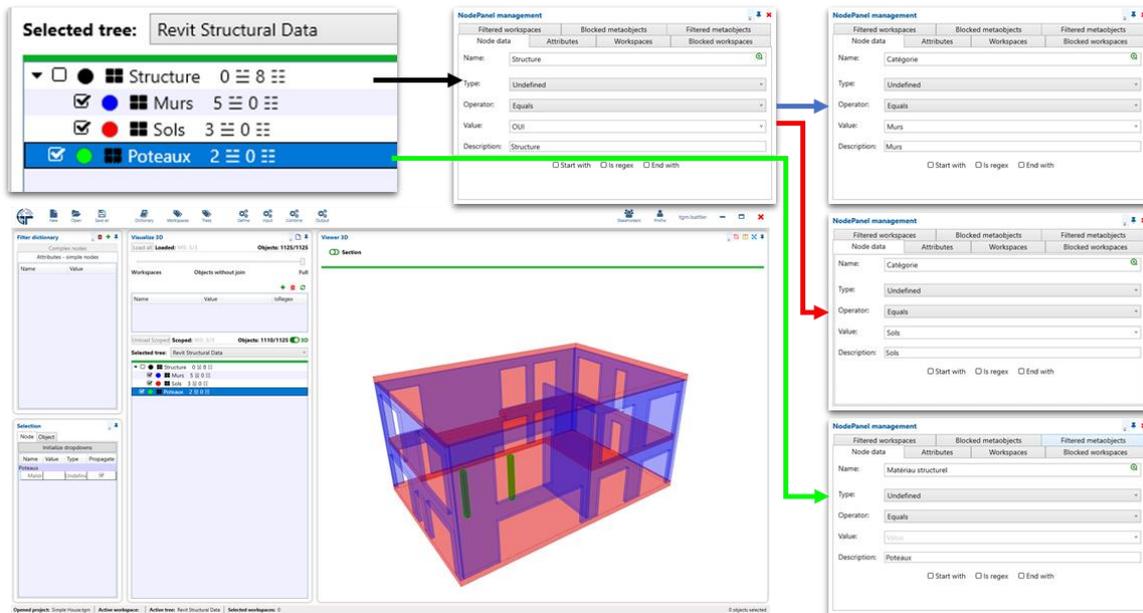


Figure 62 Création d'une vue métier structurale sur la base d'un fichier source Revit

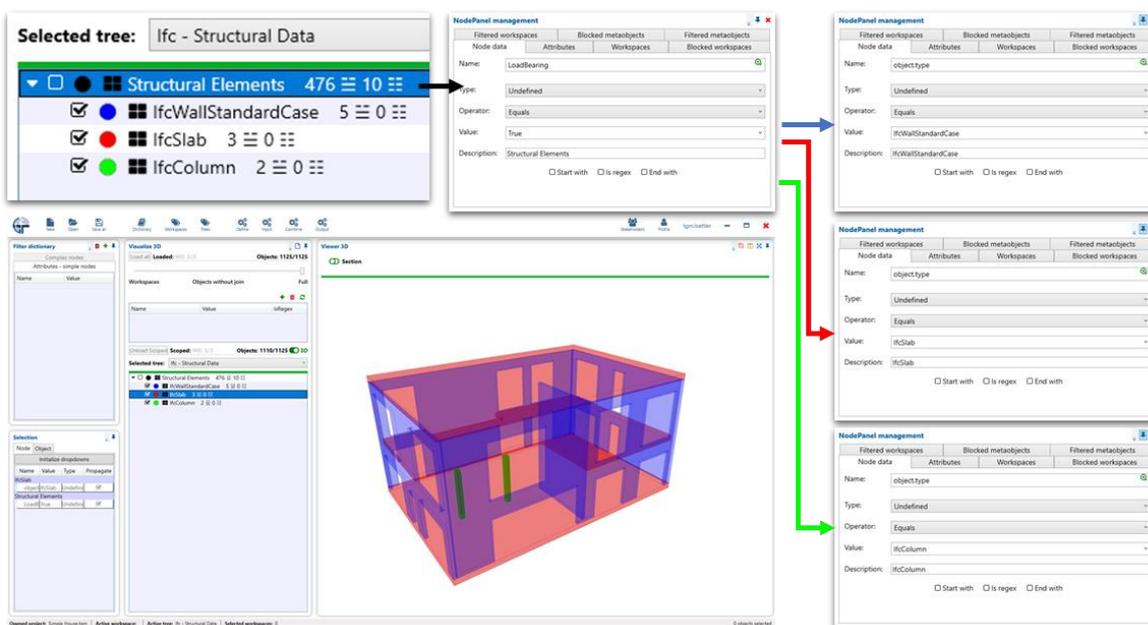


Figure 63 Création d'une vue métier structurale sur la base d'un fichier source IFC

4.6.3 Test de requête et enrichissement d'une maquette multi-source

Ce 3^{ème} test vise à vérifier que Treegram permet d'effectuer des requêtes sur une maquette fédérée BIM multi-sources. Il s'agit de tester la capacité de Treegram à interroger une maquette

hétérogène en termes de discipline, de logiciels sources et de format. La maquette BIM utilisée est celle d'une maison individuelle, et contient à la fois des éléments plans, orthogonaux, et une façade à géométrie complexe, avec double courbure. La maquette de la discipline architecture (ARC) et celle des réseaux électriques (ELE) ont été modélisées dans Revit (Figure 64 – 1, 3) ; la maquette de la façade courbe (FAC) ainsi que celle des réseaux de ventilation (HVAC) ont été réalisées en utilisant le logiciel 3DExperience et traduites en IFC (Figure 64 – 2, 4). Ces quatre modèles ont ensuite été importés dans Treegram pour créer un modèle fédéré (Figure 65).

Le défi consiste à créer deux vues métier différentes : l'une pour l'ingénieur structure, l'autre pour le bureau d'étude façade. Chaque vue doit rassembler des éléments dispatchés dans les différentes maquettes sources : la vue métier structurelle doit contenir tous les poteaux du projet, dispatchés dans les maquettes sources ARC et FAC ; de même, la vue métier de la façade doit saisir à la fois les murs-rideaux réguliers de la maquette ARC et les murs-rideaux courbes de la maquette FAC. Les deux vues métier doivent rassembler des éléments hétérogènes : différents logiciels source, différents schémas de données et différents formats.

Comme le montre la Figure 66, la vue structurelle a été réalisée via quatre requêtes. La 1^{ère} requête a permis de récupérer des éléments structurels déclarés du modèle architectural ; les 2^{ème} et 3^{ème} requêtes ont séparé le résultat de la 1^{ère} requête entre les dalles et les murs. La 4^{ème} requête a récupéré les colonnes structurelles provenant des deux maquettes FAC et ARC.

Comme le montre la Figure 67, la vue métier de façade a été réalisée de manière itérative en six requêtes : la 1^{ère} a permis de récupérer tous les éléments relatifs aux murs-rideaux dans les deux sources (sur les chaînes de caractère `Panneau`, ou `PNL` - abréviation du mot anglais *panel*, ou `Meneau`, ou `ifcPile`, qui est une erreur d'attribution de type dans le modèle de façade courbe). Les 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} requêtes sont des exclusions : la 1^{ère} requête a récupéré trop d'éléments, certaines portes (qui contiennent un panneau), certaines fenêtres (qui sont modélisées via l'outil `mur-rideau` dans Revit) et certains garde-corps (aussi modélisées via l'outil `mur-rideau`, ce qui est une astuce de modélisation ou contournement classique dans Revit pour modéliser des garde-corps non linéaires) sont exclus de la vue. Les 5^{ème} et 6^{ème} requêtes séparent les meneaux des panneaux.

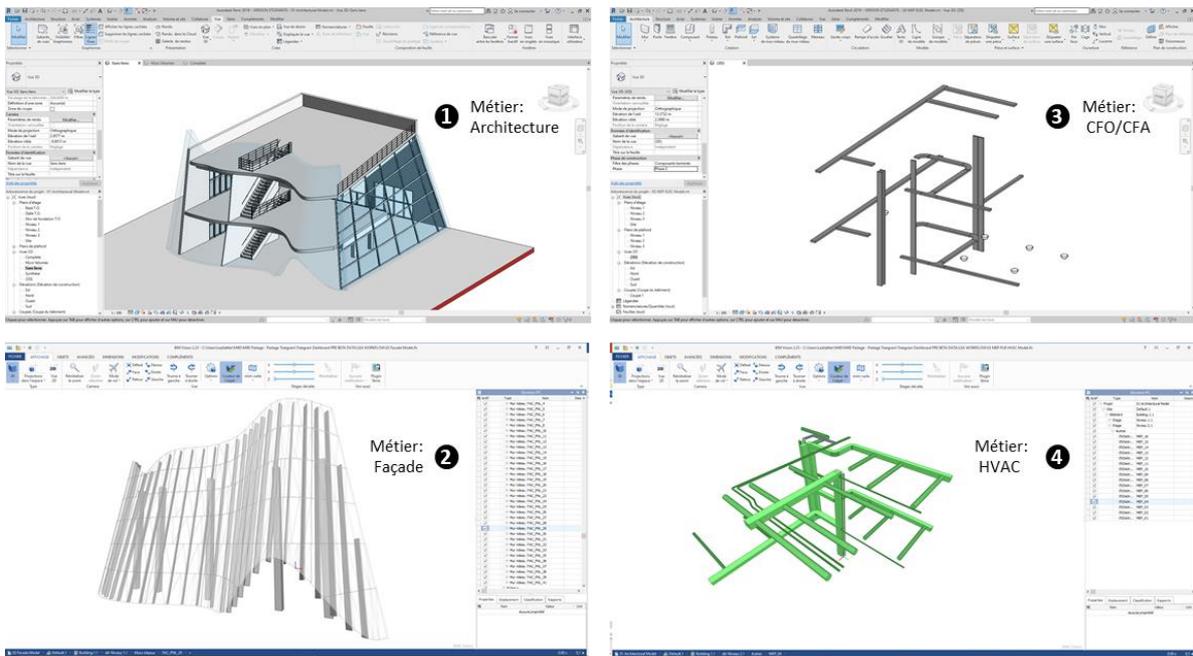


Figure 64 Hétérogénéité de la maquette fédérée : différents métiers, logiciels de modélisation, formats

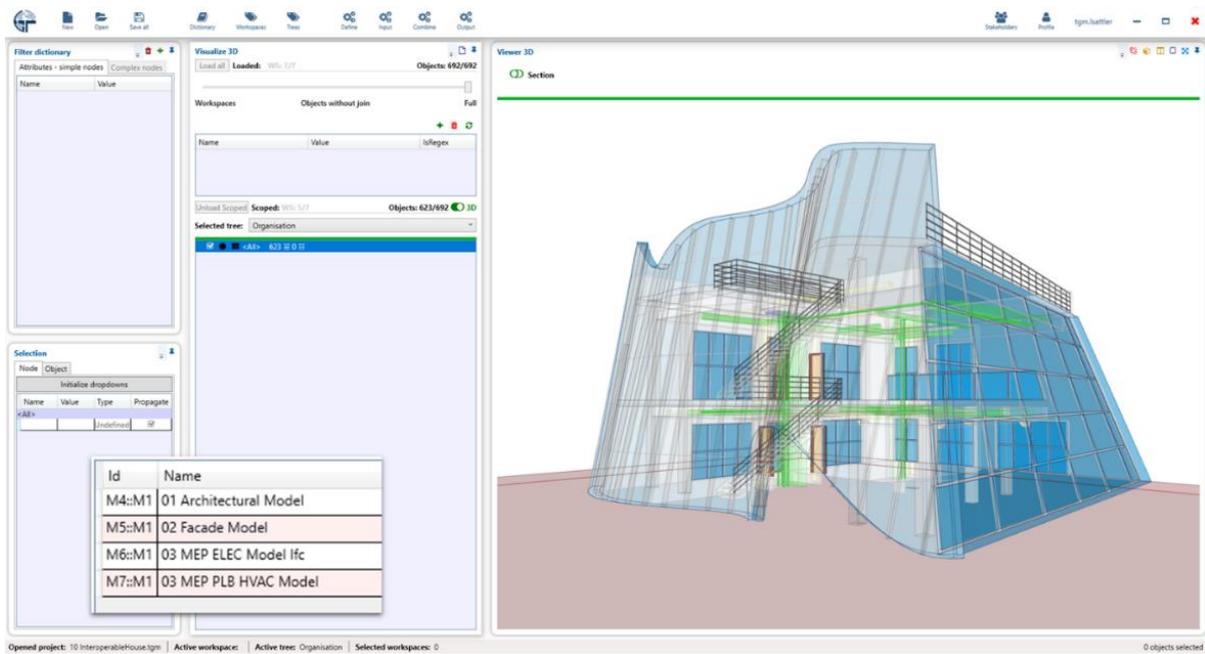


Figure 65 Maquette fédérée dans Treegram

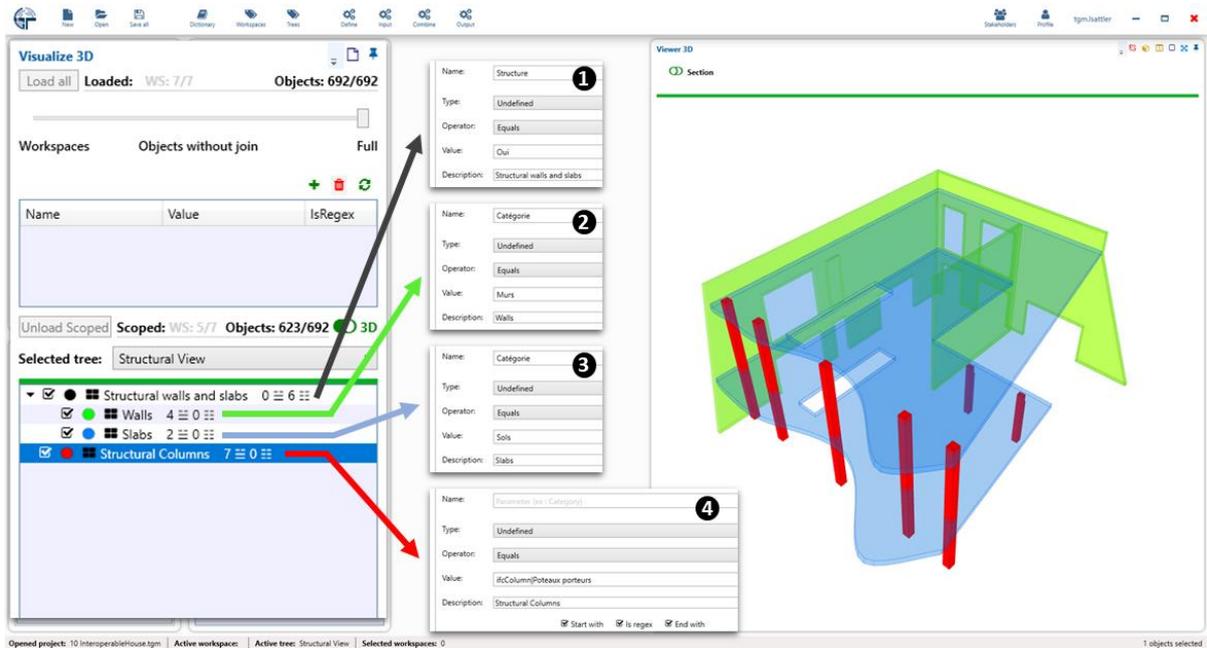


Figure 66 Création d'une vue métier structurel

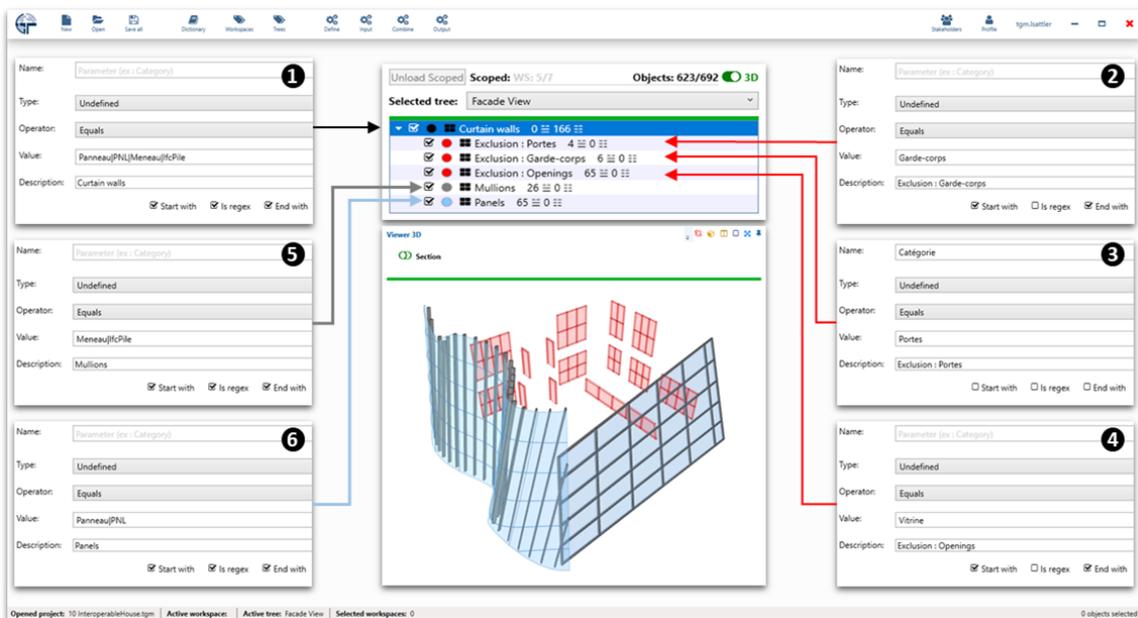


Figure 67 Création d'une vue métier pour la façade

Ce 3^{ème} test est positif : les vues métier de structure et de façade ont été créées par l'utilisateur via le lancement des requêtes itératives, sans que celui-ci ait besoin de compétences en programmation informatique, ni d'expertise en formats IFC ou Revit. Ce test a été réalisé sur des données imparfaites : certains objets BIM étaient mal catégorisés,

intuitivement, rapidement, sans besoin de compétence programmation. Ces tests consolident l'hypothèse de la possibilité de collaboration par requêtes et enrichissements.

4.7 Conclusion

L'application logicielle Treegram met en place un workflow itératif d'organisation, analyse, vérification et enrichissement de données BIM provenant de sources hétérogènes, sur la base d'une fédération neutre de maquettes BIM. Les utilisateurs, en assemblant des requêtes BIM, créent des vues métier pointant dynamiquement vers les données qui leur sont utiles ; ils peuvent ensuite vérifier, modifier, ajouter des données, et créer des liens entre les sets de données de différents métiers, de manière à établir une continuité dans les flux de données à travers les itérations de projet. **Théoriquement, ce cadre permet à différents métiers de co-modéliser, ou co-renseigner une maquette BIM fédérée. Des tests préliminaires et élémentaires de fonctionnement de Treegram ont été menés avec succès.** Dans le chapitre suivant, nous exposerons des cas d'applications afin de valider notre recherche.

Chapitre 5. Cas d’usages de Treegram sur un projet réel

Le prototype logiciel Treegram instaure un cadre collaboratif de requête et enrichissement de données. Nous exposerons dans ce chapitre des cas d’usage de Treegram sur un projet réel, dans un cadre multi-métier (1^{ère} section) puis mono-métier (2^{ème} section) ; la 3^{ème} section exposera les perspectives de recherche liées à ce développement.

5.1 Cas d’usage multi-métiers

Nous montrerons dans cette section et la prochaine les différentes utilisations de Treegram dans le cadre d’un projet de tour de bureaux d’une cinquantaine d’étages, avec une façade à géométrie complexe, dans une phase de conception et d’étude (APS-APD). Dans cette 1^{ère} section, nous exposerons des usages de Treegram à l’intérieur d’une phase à travers différents métiers, dans la situation d’interopérabilité n° 2 évoquée dans le chapitre 3.

5.1.1 Création d’une vue multi-métier

Treegram a tout d’abord été utilisé pour créer une vue multi-métier pour les éléments de maçonnerie et béton (les murs et les sols). Il s’agissait de pouvoir visualiser et accéder à ces données dispatchées et parfois dupliquées dans les maquettes des architectes (ARC) en format Revit et les maquettes structurelles (STR) en format IFC. En effet, comme vu précédemment, différents métiers modélisent des objets correspondant aux mêmes objets physiques, mais avec des sémantiques et des niveaux de définition différents. Dans ce cas précis, les architectes modélisent tous les murs, y compris les murs structurels ; et les ingénieurs structure, dans la maquette ARC, modélisent uniquement, à un niveau de développement (LOD) plus poussé, les murs structurels. Les architectes conservent leur version des murs structurels dans leurs maquettes, puisqu’ils sont garants de la conception, qu’ils peuvent faire évoluer – évolution à laquelle s’adapteront les ingénieurs structure. Voilà pourquoi une maquette fédérée contient des éléments qui semblent redondants – mais qui correspondent en réalité à différentes étapes de collaboration et de dessin, et à des sémantiques différentes.

Afin de créer la vue métier désirée, il faut donc réunir à la fois les cloisons de la maquette ARC, et les murs et sols de la maquette STR. Dans Treegram, un jeu de requêtes dans un arbre a donc été créé (Figure 69), pour aller récolter (1) les murs non structurels de la maquette ARC (`Structural = No`), (2) les murs structurels de la maquette STR (`LoadBearing = True`) et (3) les dalles structurelles de la maquette STR (`object.type = IfcSlab`). Le résultat de ces requêtes apparaît dans la visionneuse (4) et l'arbre (5) : les murs structurels présents dans la maquette ARC ont été exclus, et **la vue multi-métier montre donc une maquette sans données redondantes.**

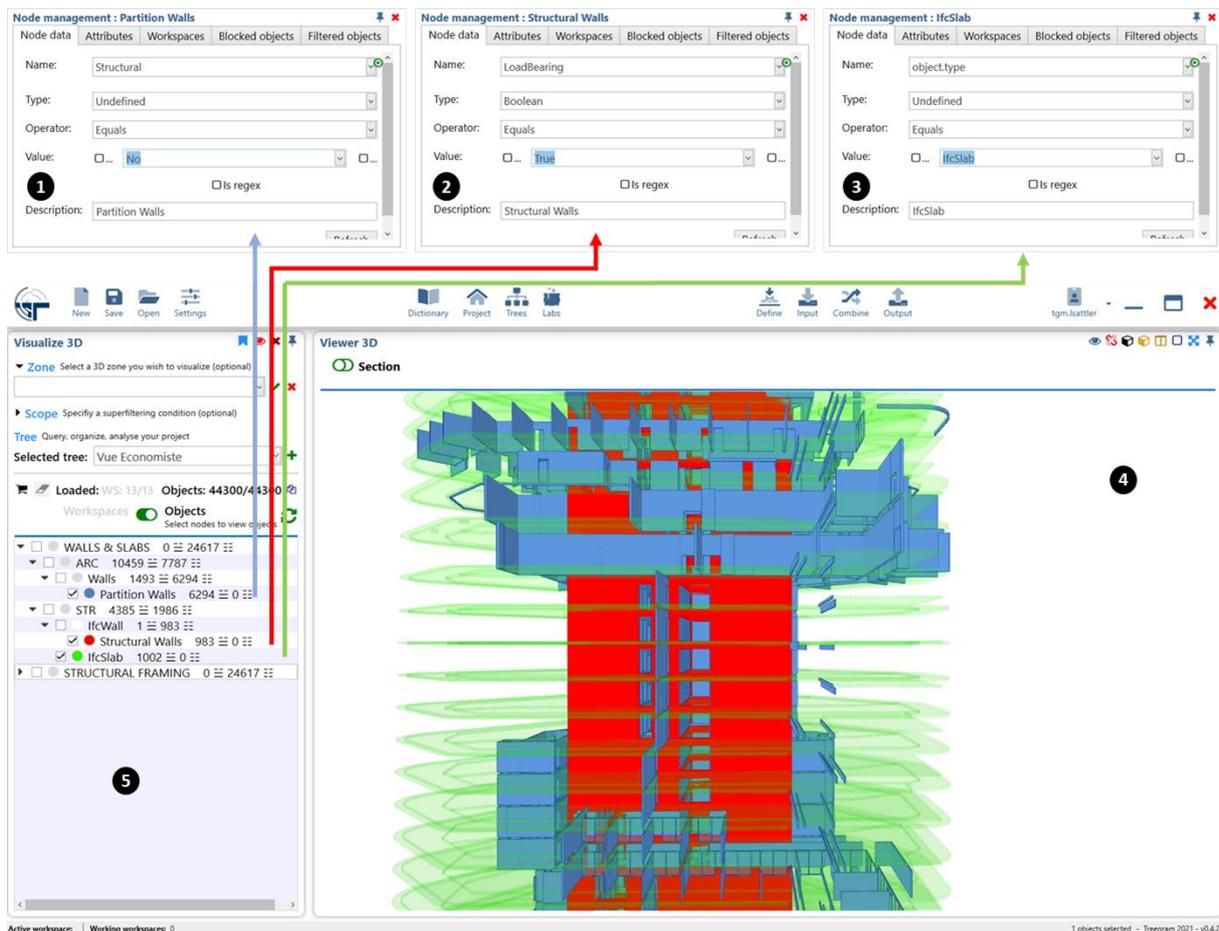


Figure 69 Vue multi-métier, multiformats

5.1.2 Création d'une vue multi-métier avec enrichissement de données

Une autre vue multi-métier était à créer pour la charpente métallique. Cette vue contenait des doublons moins évidents à isoler : certaines poutres étaient modélisées dans la maquette ARC,

mais n'étaient pas encore passées en études dans la maquette STR. Elles ont été identifiées visuellement dans la visionneuse 3D, puis formellement dans Treegram via un enrichissement de données (Figure 70) : la valeur `Duplicated in Structural Model` dans le paramètre `Comments` (2) a été renseignée en une fois sur 183 éléments (1). La Figure 71 montre comment la vue multi-métier a été créée, par un jeu de trois requêtes : une requête sur les éléments non dupliqués du modèle ARC (`Comments = Not Duplicated in Structural Model`) (1), puis une requête sur les poutres (`object.type = ifcBeam`) (2) et les poteaux structurels (`object.type = ifc.Column`) (3) de la maquette STR.

Ce cas est l'application du cycle requête - vérification - enrichissement de données, décrit dans le chapitre 4 : les requêtes initiales permettent une vérification des données, et montrent un manque de consistance dans les données (en l'occurrence, des doublons non identifiés entre les maquettes ARC et STR); celles-ci sont donc enrichies pour pallier ce manque, puis requêtées à nouveau. Comme illustré dans la Figure 72, la donnée créée dans Treegram a ensuite pu être propagée en retour dans le fichier source (1), via la fonctionnalité `Feed` (2) – l'itération est donc rendue possible. **Ici, l'enrichissement vient consolider les données – ce dont témoignent en retour les requêtes.**

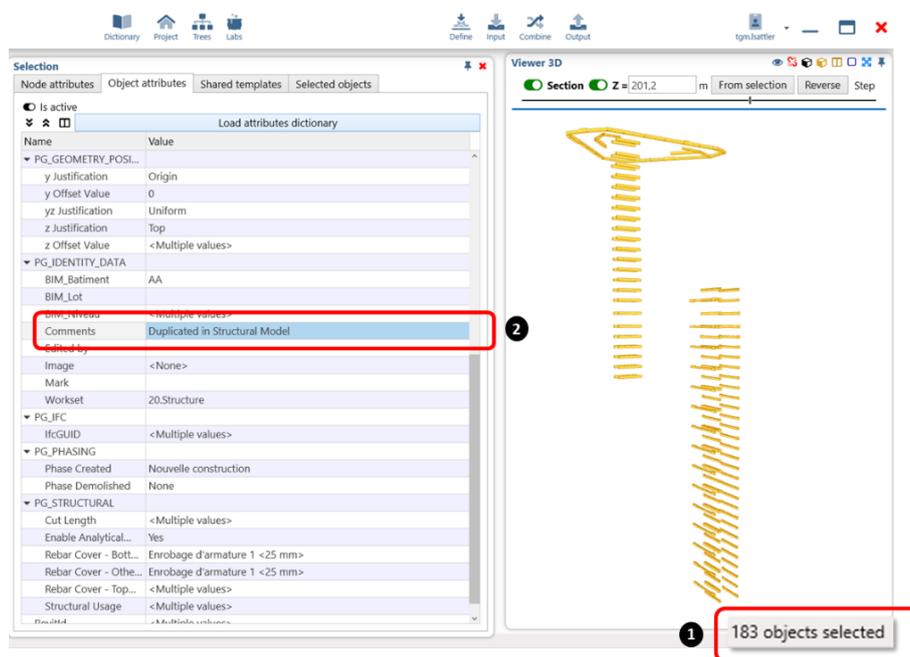


Figure 70 Processus d'enrichissement de données

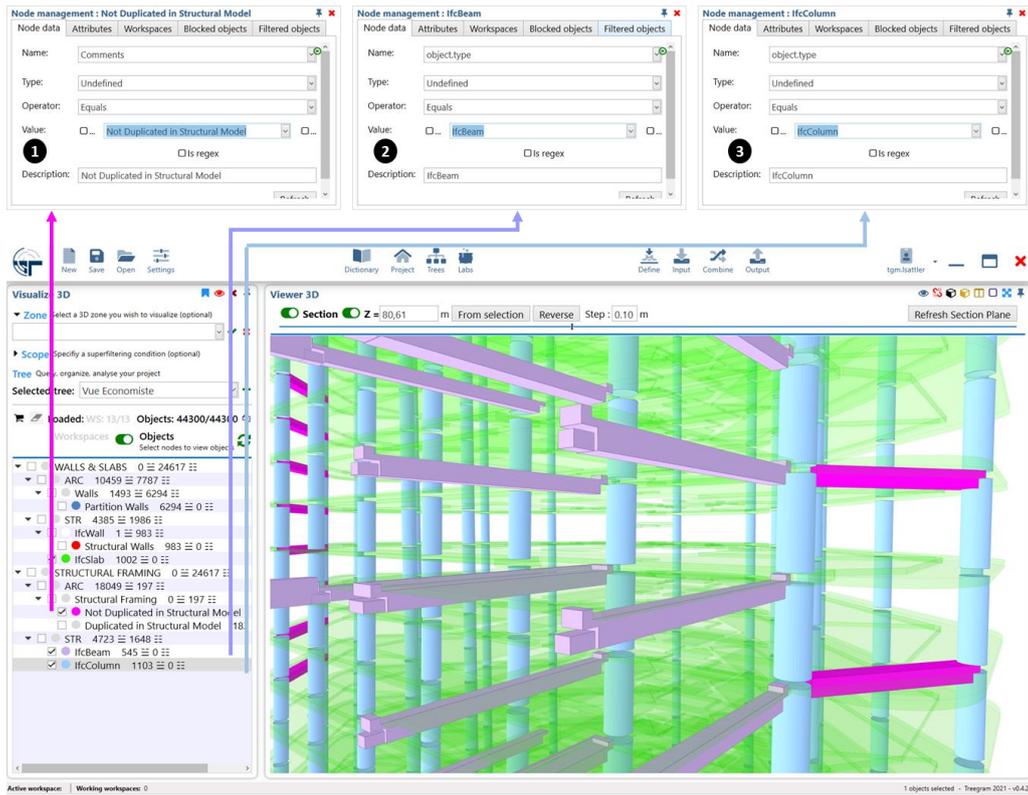


Figure 71 Vue multi-métier de la charpente

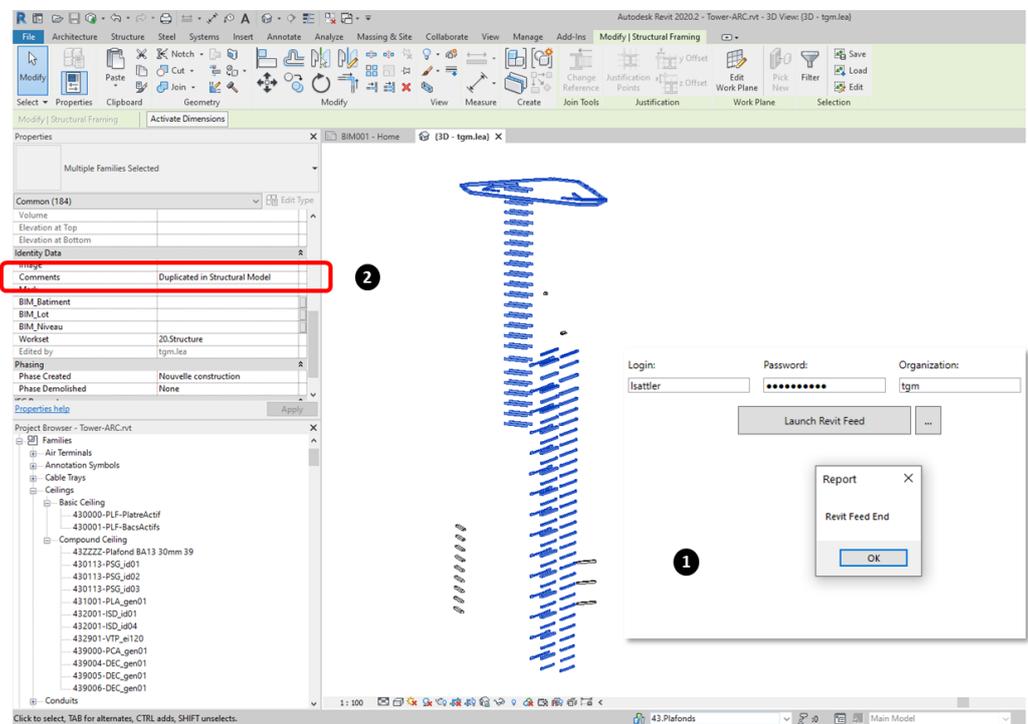


Figure 72 Propagation de l'enrichissement de données dans le fichier source

5.1.3 Co-renseignement de données de performance acoustiques

Un autre besoin sur ce projet était d'affiner la saisie des données de performance acoustique dans les maquettes BIM, notamment sur les 7 787 murs du projet. Là encore, il s'agit d'un processus partagé entre les architectes et le BE (bureau d'étude) acoustique : les architectes commencent à renseigner les paramètres d'acoustique des murs, avec des valeurs approximatives, et les acousticiens affinent ces données.

Les ingénieurs acousticiens n'utilisant pas Revit, ils ont la possibilité de saisir leurs données via un tableau Excel, extrait de Revit et fourni par l'architecte. Puis l'architecte, via un script ou un plugin d'interopérabilité Excel-Revit comme *BimOne*, propage ces paramètres dans la maquette. Le problème de cette méthode est qu'elle est source d'erreur : un simple décalage dans les lignes d'Excel peut complètement fausser l'ensemble de la saisie de donnée, dont la vérification est, en outre, non aisée. Par ailleurs, c'est un processus *one-shot*, sans gestion fine des itérations (on écrase l'ancienne donnée avec la nouvelle).

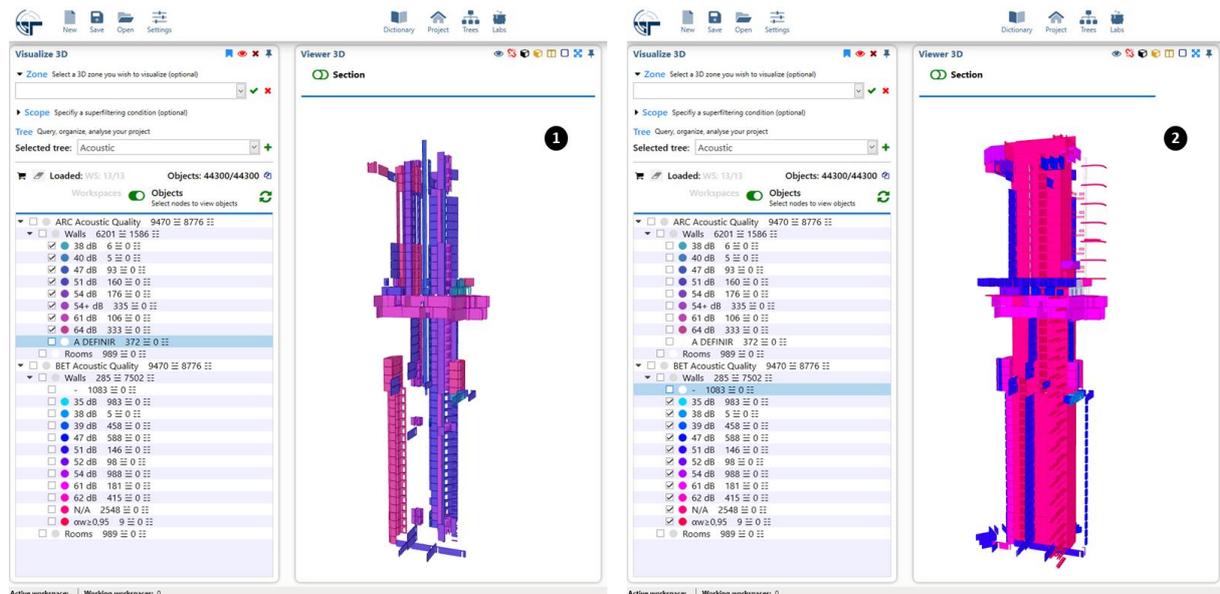


Figure 73 Co-saisie de paramètres de performance acoustique

Treegram peut être utilisé en lieu et place de cette méthode risquée et peu fiable. Cela été testé sur le projet (Figure 73) : deux arbres ont été créés, un arbre pour la discipline ARC (1), et un autre pour la discipline acoustique (ACO) (2); chaque nœud requête un paramètre de performance acoustique. L'acousticien, au lieu de remplir les paramètres via un tableau Excel,

les remplit dans Treegram, avec en support, la visualisation 3D du paramétrage acoustique de référence, ébauché par l'architecte. L'acousticien vérifie ensuite visuellement ses saisies de données, en comparant les deux arbres et les deux représentations 3D. **Treegram peut donc être utilisé pour faciliter le processus de co-modélisation entre l'architecte et l'ingénieur acousticien.**

Dans la section suivante, nous exposerons l'utilisation de Treegram dans un autre cadre d'interopérabilité.

5.2 Cas d'usage mono-métiers

Dans le cadre du projet de tour évoqué lors de la précédente section, Treegram a aussi été utilisé afin de résoudre des problèmes d'interopérabilité de la situation n° 1 évoquée dans le chapitre 3 : à l'intérieur d'une phase et d'un métier. Sur ce gros projet, dont la maquette BIM est fragmentée en plusieurs fichiers, différents besoins d'interopérabilité se sont posés ; seront détaillés ci-après, pour chacun de ces cas, le besoin métier concerné, le workflow mis en place, et l'apport de Treegram.

5.2.1 Comparaison automatisée de composants BIM dispersés dans divers fichiers

Besoin métier : Un problème à résoudre était celui de l'harmonisation des différents composants BIM (les familles et types Revit) dispatchés à travers les trois principaux fichiers Revit du projet. En effet, ces composants BIM, originellement issus du même fichier template de projet, peuvent être édités de manière parallèle dans les différents fichiers, sans garder de lien avec leur version originale. Par exemple, une famille Revit de porte A peut être modifiée dans le fichier 01 et 02, en parallèle ; ainsi, les familles A(01) et A(02), étant censées être identiques et représenter le même objet BIM, divergent. Si cette situation découle d'une disposition logicielle (la déconnexion des composants avec leur catalogue originel), elle est aussi organisationnelle : les différents modeleurs BIM ne se concertent pas forcément avant d'apporter des modifications à ces objets partagés. Il y a donc un besoin de tracer et contrôler ces divergences, afin de les limiter.

Workflow mis en place (Figure 74) : chaque fichier est scanné, et chaque famille et type Revit devient un `template` dans la base de données de Treegram (1).

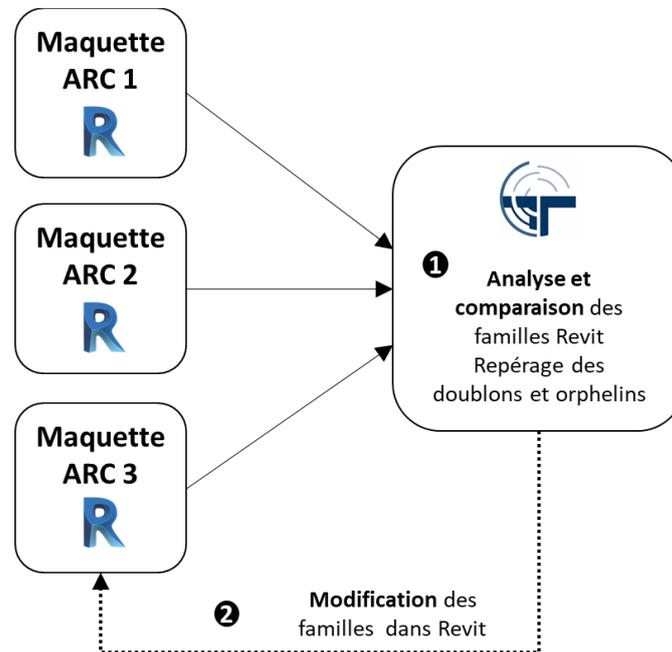


Figure 74 Processus de comparaison de composants BIM via Treegram

Puis la fonctionnalité de comparateur de `templates` de Treegram est lancée (Figure 74). Depuis ce comparateur, l'utilisateur analyse les différences entre les familles (Figure 74 - 2) présentées sous forme de tableau avec une colonne par fichier, une ligne par famille, et un code couleur (vert, quand aucune divergence n'a été trouvée ; bleu, quand la famille n'existe pas dans un fichier donné ; en orange, quand les familles existent dans tous les fichiers, mais divergent). Le comparateur est un observatoire de ces similitudes et divergences, permettant à l'utilisateur de les analyser et de les corriger (Figure 75).

Apport de Treegram : Treegram vient ici pallier le problème logiciel et organisationnel de la gestion des composants BIM dans une maquette fédérée, en permettant aux acteurs BIM (modeleurs, BIM managers, BIM coordinateurs) de comparer ces composants dispersés dans divers fichiers. L'obstacle constitué par l'enveloppe des fichiers est franchi par le décloisonnement des données dans la base de données Treegram ; l'obstacle du manque de centralisation du travail humain est franchi par l'interface du comparateur, qui permet de centraliser les composants édités par différentes personnes.

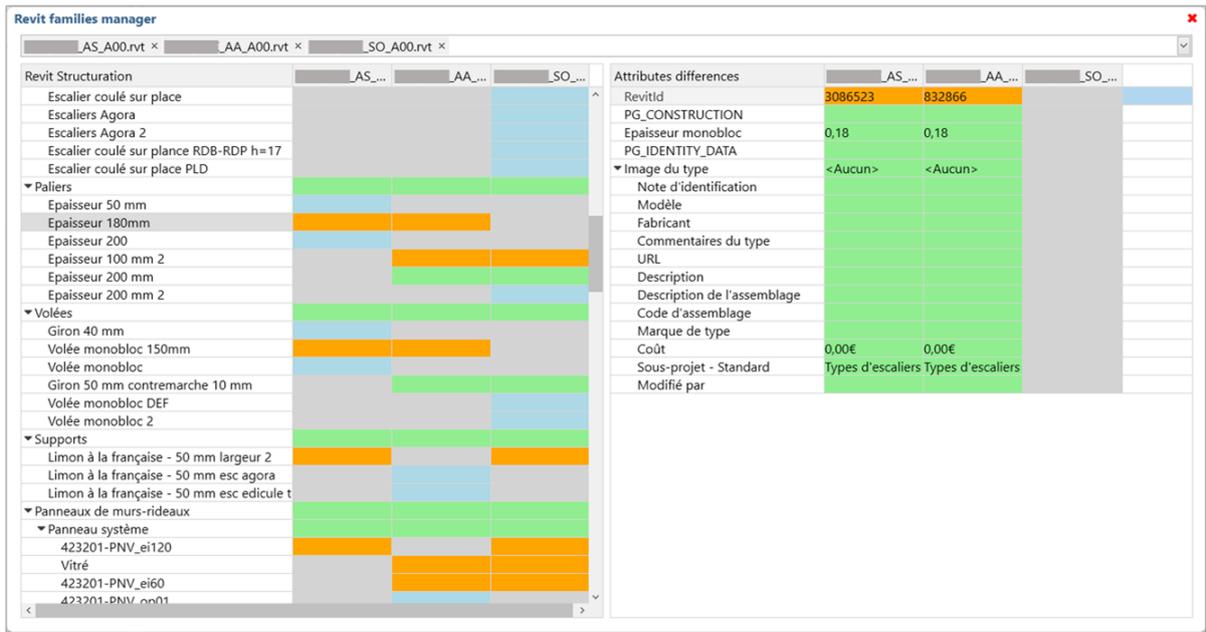


Figure 75 Comparateur de composants BIM

5.2.2 Codification automatisée de panneaux de murs-rideaux

Besoin métier : Le cahier des charges de la maquette de façade (FAC) imposait la génération d'un nom unique pour chacun des ~20 000 panneaux de murs-rideaux. Ce nom devait être composé d'une racine indiquant le type et l'étage de chaque panneau, ainsi qu'un numéro d'indexation, lié à la position géographique du panneau sur un étage donné (Figure 76).

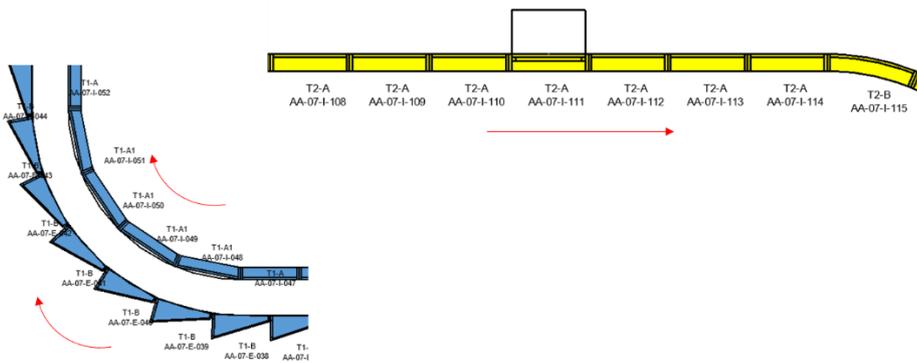


Figure 76 Règles de numérotation des panneaux de murs-rideaux

Ainsi le nom typique d'un panneau découle de trois paramètres : Type_Etage_NuméroD'index. La façade étant régulièrement modifiée, ce processus devait pouvoir être lancé régulièrement ; le volume de données concerné justifiait la mise en place d'un processus automatisé.

Workflow mis en place (Figure 77) : la maquette FAC est scannée dans Treegram, puis les panneaux de murs-rideaux sont requêtés dans des nœuds (1), avec exclusion des panneaux résiduels (panneaux secondaires non codifiés). On obtient dans Treegram un arbre qui classe les panneaux par type et par étage ; via ces nœuds, la racine du nom (Type_Etage) est implémentée (2). Le centre de gravité de chaque panneau est ensuite calculé dans un module d'analyse géométrique 3DMathHandler (3DMH) également développé par M4D (3). Il est à noter qu'un logiciel BIM/CAD doté d'un bon moteur géométrique comme CATIA ou Rhino aurait aussi pu fonctionner tout aussi bien. Cette donnée géométrique est importée dans Treegram (4) ; puis l'ensemble de ces données (type, étage, position géométrique) sont récupérées dans Treegram, via des packages Dynamo créés pour connecter Revit à Treegram (Figure 78), afin de les concaténer en un nom unique par panneau ; ce paramètre de nom est ensuite renvoyé dans la maquette source (6).

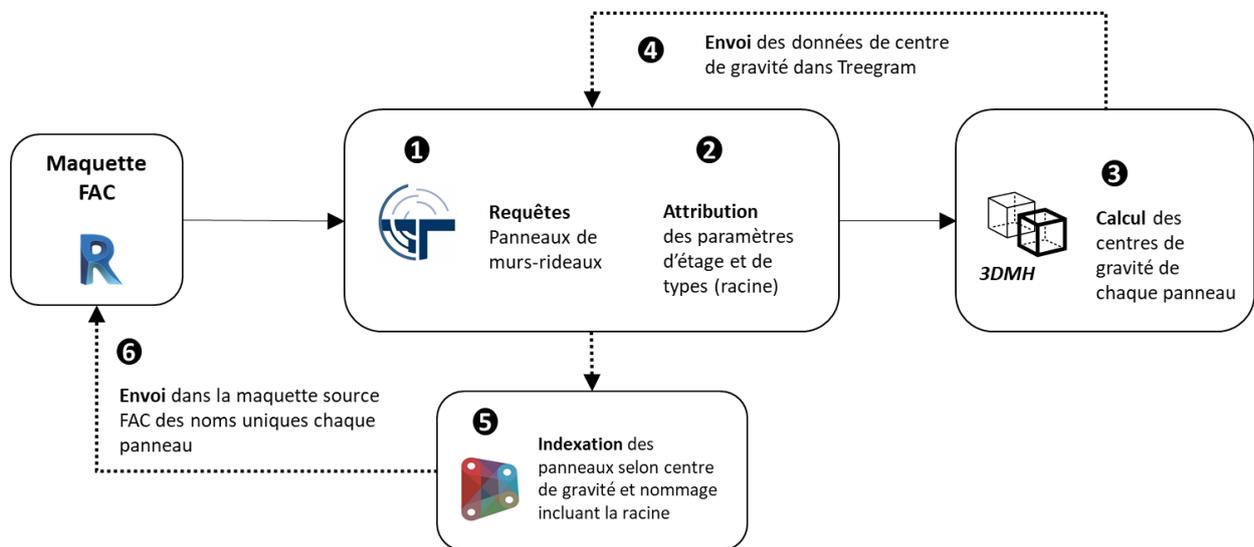


Figure 77 Workflow de génération d'un nom unique par panneau

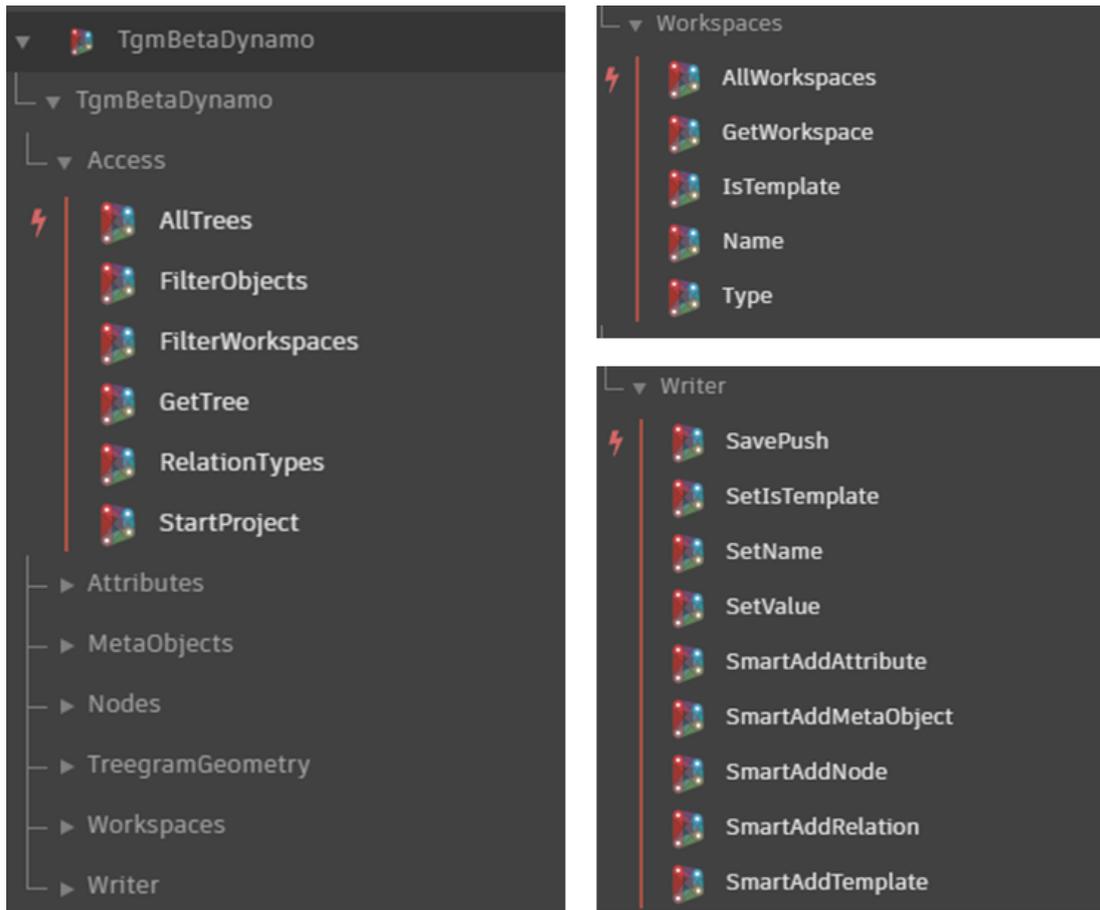


Figure 78 Blocks Dynamo pour connecter Revit à Treegram

Apport de Treegram : Au départ, le workflow complet se passait dans Dynamo, mais le processus de requête des panneaux, des données de type et d'étage était trop long et pas assez robuste (nombreux bugs, pas de gestion des exceptions) ; il en était de même pour le calcul du centre de gravité de chaque panneau. Ce processus a donc été déporté dans Treegram et 3DMH, afin de livrer à Dynamo des listes d'inputs propres : des panneaux triés par types, par étage, et par centre de gravité. In fine, Dynamo a juste été utilisé en rotule pour passer des données dans Revit. **L'apport de Treegram est donc de permettre de préparer des listes d'inputs propres, robustes, et vérifiables visuellement en 3D** – comme en témoignent les Figure 79 et Figure 80. **C'est cette constitution fiable de listes d'objets, via les requêtes dynamiques, qui permet de gérer l'interopérabilité** entre le module d'analyse géométrique 3DMH et Revit.

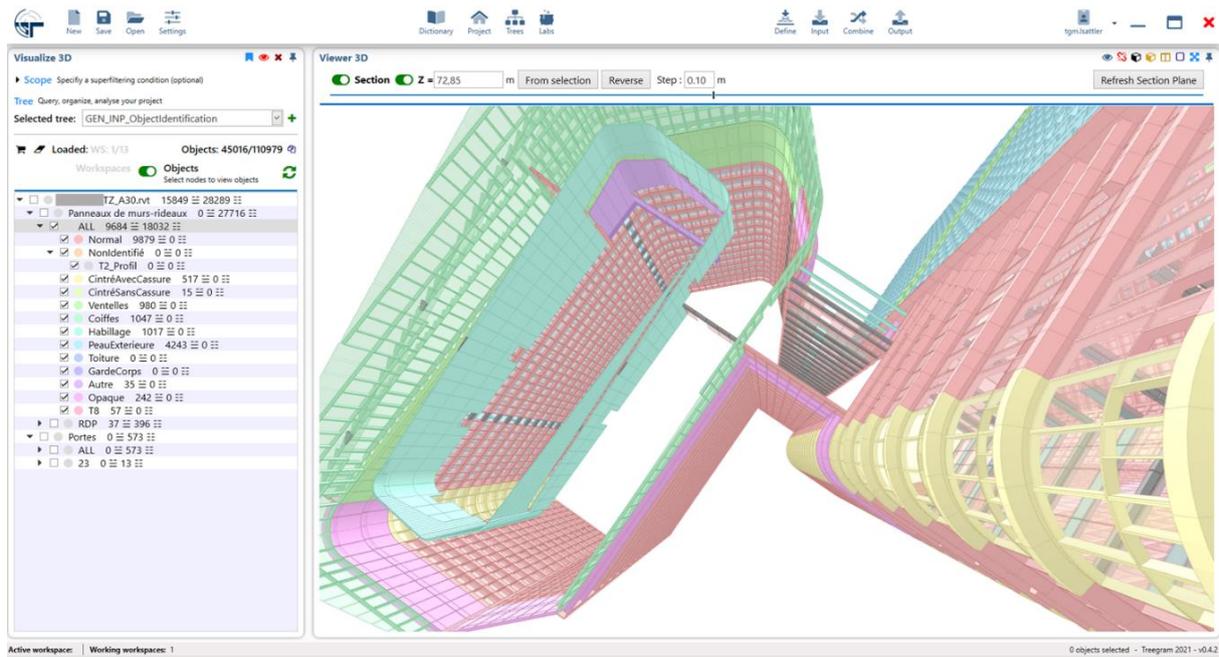


Figure 79 Arbre de vérification visuelle d'attribution des types des panneaux

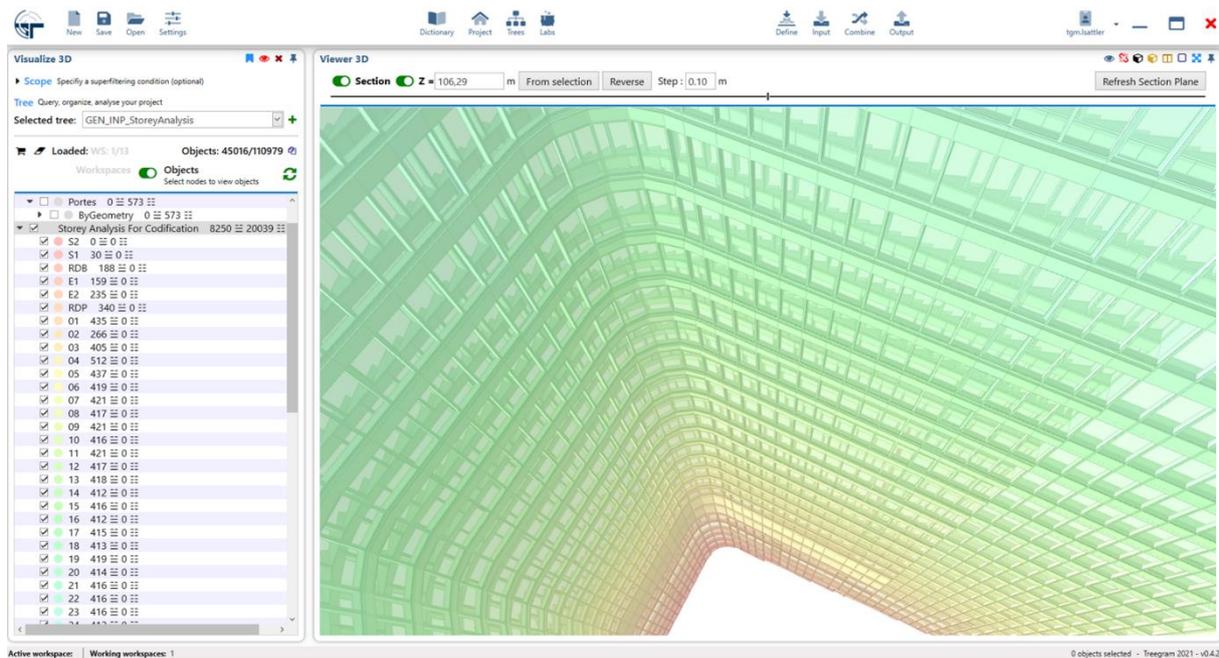


Figure 80 Arbre de vérification visuelle d'attribution des étages des panneaux

5.2.3 Modélisation automatisée de contours de surface utile

Besoin métier : Un sujet épineux du projet était la génération des surfaces utiles¹². Sur un gros projet, et a fortiori sur un projet de tour, le calcul de cette surface doit être effectué très précisément, car c'est une information sensible pour le maître d'ouvrage : beaucoup de m² sont en jeu – et donc, beaucoup d'argent. Ce calcul impliquait notamment de générer, à chacun des ~50 niveaux de la tour, les intersections précises entre les dalles et murs-rideaux, meneaux et panneaux inclus (intersection qui varie à chaque niveau, l'enveloppe ayant une morphologie non répétitive - Figure 81). La complexité de ce calcul était intensifiée par la quantité d'éléments impliqués : les façades contiennent au total ~20 000 panneaux, dont chacun aura au moins une intersection avec une dalle. Or cette opération géométrique, quantitativement importante, n'est pas exécutable dans le logiciel source de modélisation, Revit, qui n'a pas de moteur géométrique assez puissant. Ces intersections ont donc dû être générées dans un autre logiciel que Revit – le plugin 3DMH, évoqué précédemment ; l'enjeu était de créer des intersections propres, composées de polylignes jointives et fermées.

Workflow mis en place (Figure 82) : les maquettes FAC et ARC sont scannées dans Treegram, et les panneaux et meneaux de murs-rideaux sont requêtés, ainsi que les altimétries des dalles (1) ; les intersections entre les murs-rideaux et les plans correspondant aux altimétries des dalles sont générées via 3DMH, module qui vient chercher les données d'entrées dans les arbres de Treegram (2) ; les lignes d'intersection (~ 200 000 lignes, assemblées en polylignes fermées) sont ensuite importées dans Treegram (3) puis dans la maquette contenant les surfaces (SFC), en tant qu'objet BIM de catégorie *Area Separation Lines*, qui délimitent la surface utile (4). La Figure 83 montre les divers *Area Separation Lines* importées dans Treegram.

¹² La surface utile correspond à la surface intérieure d'un bâtiment, à laquelle on retire les espaces de circulations verticales et horizontales, les encombrements de l'ouvrage construit comme les murs, gaines, poteaux. C'est une métrique cruciale pour un maître d'ouvrage.

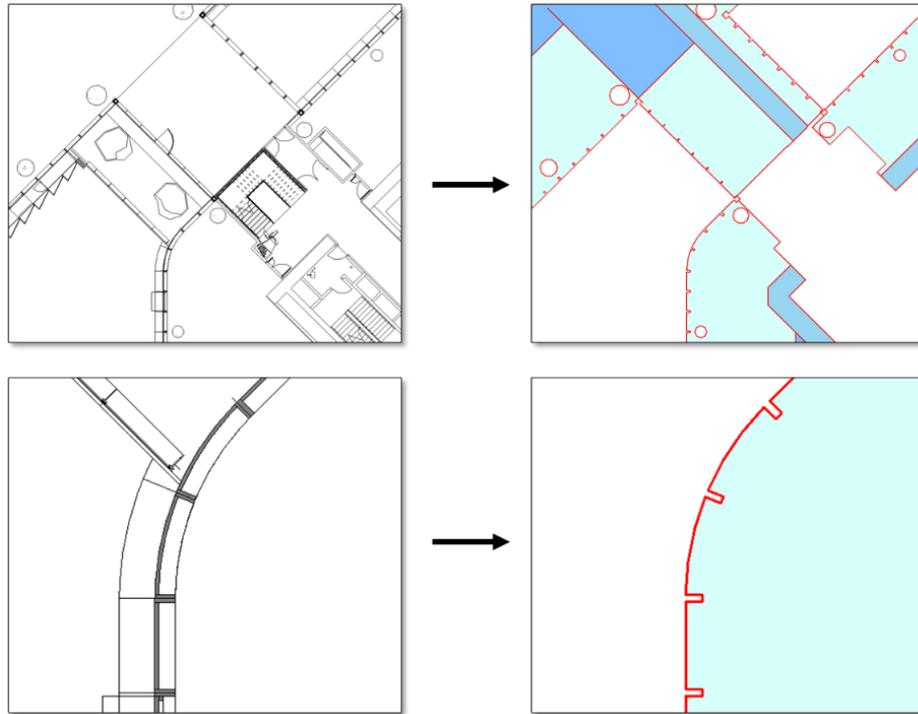


Figure 81 Type d'intersection géométrique à générer pour modéliser la surface utile

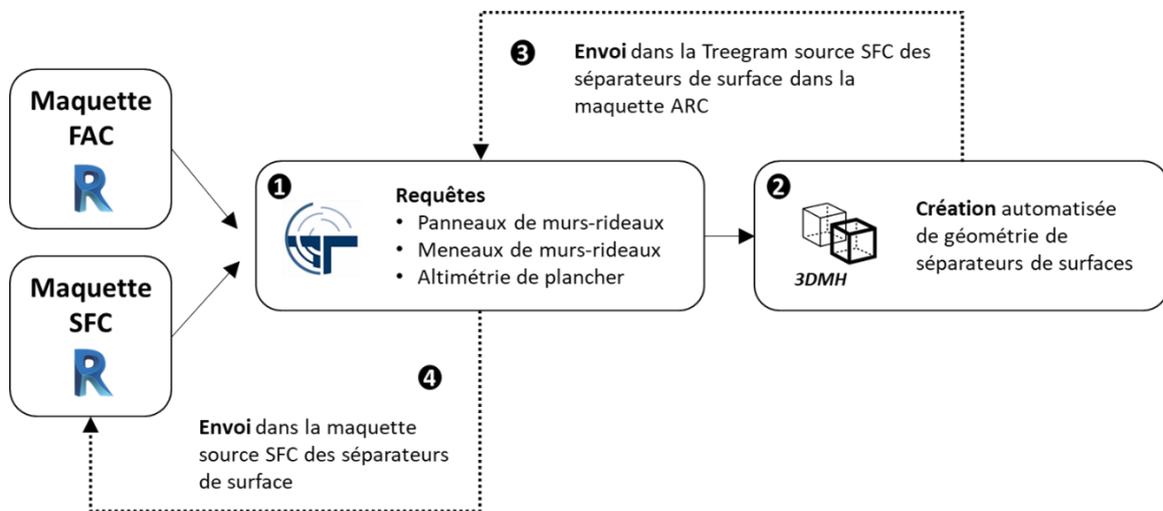


Figure 82 Workflow de génération des contours de surface utile

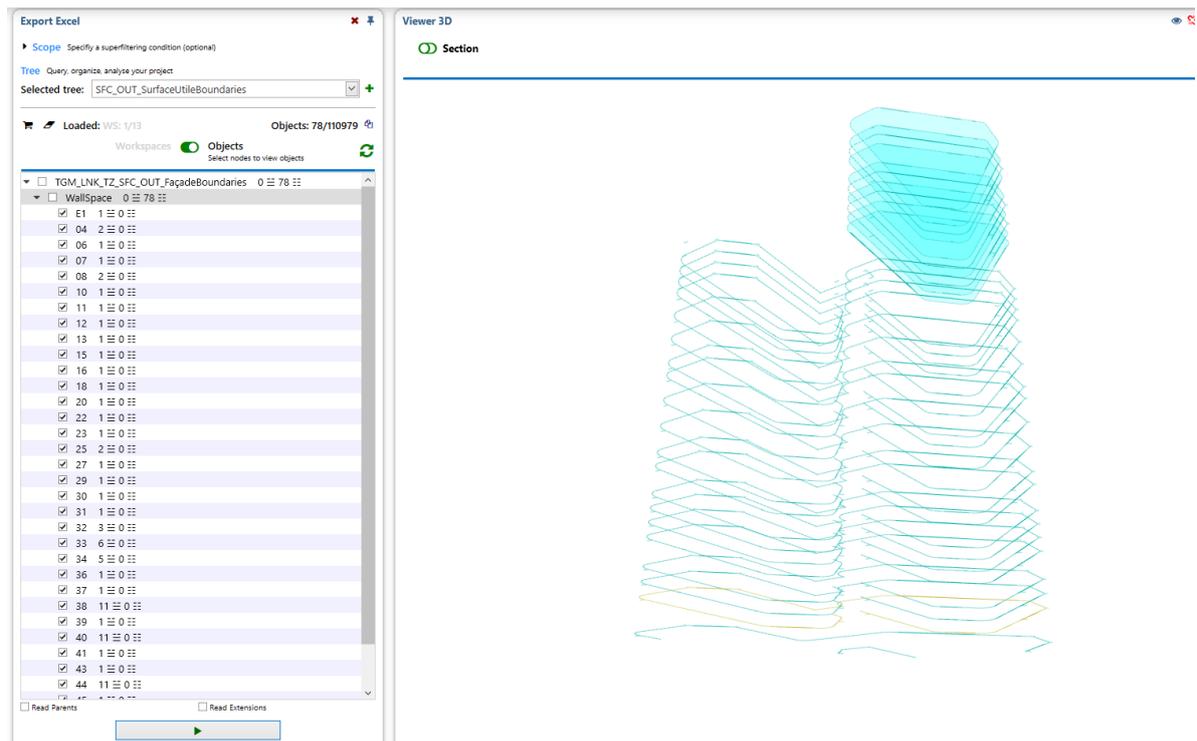


Figure 83 Visualisation des contours de surfaces utiles dans Treegram

Apport de Treegram : Ce processus a été répété chaque mois, durant le temps des études APS et APD, soit durant environ un an. **Treegram a permis d’améliorer l’interopérabilité dynamique entre Revit et le modeler géométrique 3DMH, via d’une part la gestion dynamique des requêtes pour récupérer des inputs, et via d’autre part la capacité d’enrichir la maquette source en retour** – qui se fait, cette fois, via la fonctionnalité `Feed`, et non plus via un plugin externe comme Dynamo, comme dans le cas d’usage précédent. Ici, **c’est l’intégralité du processus d’interopérabilité qui est pris en charge** dans Treegram.

5.2.4 Génération automatisée de calepinages de faux-plafonds

Besoin métier : Le calage des faux-plafonds était un point crucial sur ce projet de tour de bureaux. En effet, les faux-plafonds absorbent les contraintes de partition d’espaces, de réseaux techniques (gaines, chemins de câbles), de calepinage, d’esthétique, en plus d’une logique de répétition avec variation sur les ~50 étages de la tour. Ce faisceau de contraintes est similaire à celui d’une façade ; mais une façade qui se répéterait à chaque niveau, soit une cinquantaine de fois dans le projet. Ainsi, la génération de ces faux-plafonds impliquait nécessairement un

processus de génération géométrique complexe, automatisé, que le moteur géométrique limité de Revit ne pouvait pas gérer ; le choix du logiciel Rhino pour mener ce processus a donc été arrêté.

Le workflow requérait deux étapes : l'équipe d'architectes d'une part dessinait les génératrices ou drivers des grandes trames de faux-plafond (Figure 84, lignes colorées ; et Figure 85 - 1) soit le dessin du faux-plafond à un niveau de définition faible ; et l'équipe BIM se basait sur ces drivers pour augmenter ce niveau de définition, soit créer le calepinage des panneaux de faux-plafonds (Figure 84, lignes noires, Figure 85 - 2) en incorporant les différentes règles métier (fusion des panneaux à partir d'une certaine taille en fin de trame, par exemple). Pour ce processus, il a été décidé de tester le plugin RhinoInside, un plugin sorti en 2019, permettant d'envoyer des données depuis Rhino vers Revit, et vice-versa.



Figure 84 Exemple d'un plan de faux-plafond : trames et panneaux

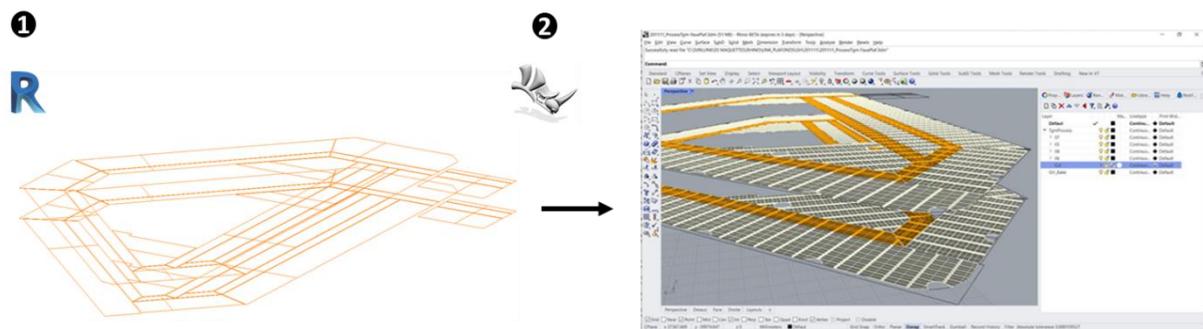


Figure 85 Modélisation multi-logicielle

Workflow mis en place (Figure 86) : Depuis Grasshopper dans l’environnement RhinoInside, les génératrices des trames et les altimétries des faux-plafonds sont requêtées (1) ; sur cette base, la géométrie des panneaux de faux-plafonds est générée ; les outputs, une surface par panneau, sont ensuite scannés dans Treegram (2), où elles sont requêtées dans des arbres, afin d’effectuer un monitoring et d’identifier la différence avec leur version précédente, au fil des itérations : modifications, ajouts, ou suppressions de panneaux. Cette information de versionnement est ensuite renvoyée sur chaque panneau dans RhinoInside (4) ; seuls les panneaux modifiés sont recréés dans Revit.

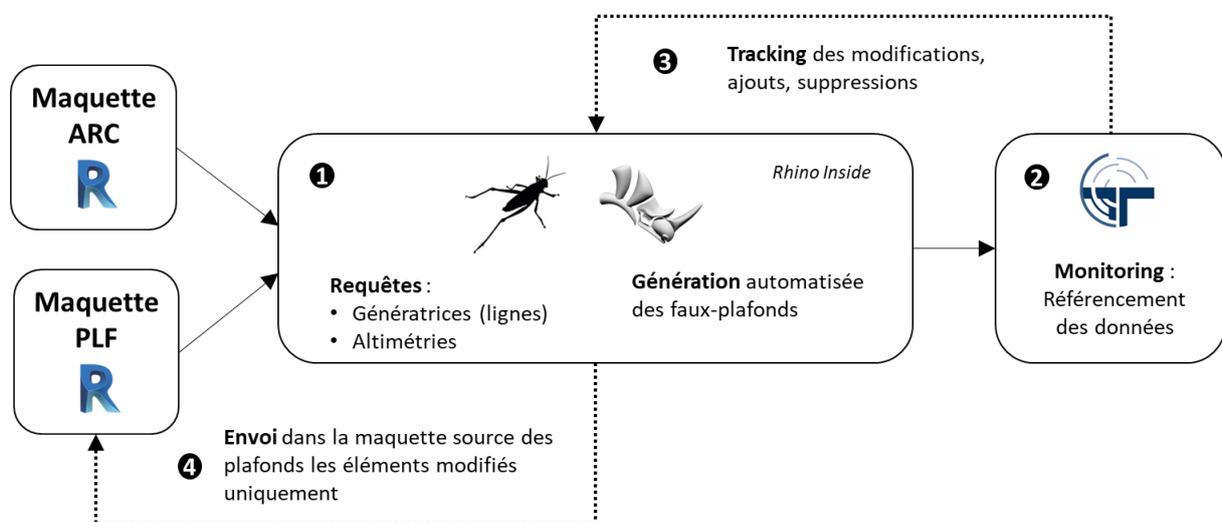


Figure 86 Workflow de génération des calepinages de faux-plafonds

Apport de Treegram : On notera ici que l’apport de Treegram ne résidait pas uniquement dans la capacité de lancer des requêtes, puisque certaines requêtes relativement simples ont été effectuées via le plugin RhinoInside. Le workflow de ce cas d’usage implique un **cadre de co-**

modélisation, partagée entre une équipe d'architecte qui donne les grandes lignes d'un dessin ; et une équipe d'*automatiseurs BIM* (nommés BAM chez M4D, pour *BIM AutoMatiseurs*) qui précise ce dessin. **L'apport de Treegram réside dans la partie monitoring du processus, avec la gestion des itérations, et la capacité de comparer les versions entre les éléments. In fine, le défi est de permettre une souplesse rythmée d'échanges de données entre les deux équipes, et d'éviter à une équipe d'écraser les données de l'autre – et réciproquement.**

5.2.5 Analyse et audit automatisés de maquettes BIM

Besoin métier : Sur ce projet, une autre nécessité, qui peut sembler basique et triviale, était de vérifier la configuration et le contenu des maquettes BIM Revit, afin de vérifier leur conformité avec la convention et le cahier des charges BIM. Ce processus de vérification des maquettes est le travail quotidien des BIM Managers et BIM Coordinateurs. Les caractéristiques suivantes des maquettes étaient interrogées : le ratio 3D/2D (pour analyser le degré de maquillage 2D des objets BIM 3D dans des plans ou des coupes), ou le nombre de filtres de vues, le paramétrage des murs et dalles, etc. Certaines de ces caractéristiques ne sont pas accessibles depuis l'interface utilisateur du logiciel source, Revit.

Workflow mis en place (Figure 87) : chaque fichier Revit est *scanné* dans Treegram, puis la base de données est requêtée. Pour chaque fichier, un rapport d'audit est créé, consultable dans Treegram, et exporté sous forme d'un tableau Excel. Les audits de plusieurs maquettes peuvent être lancés automatiquement en une fois.

Apport de Treegram : Treegram a été utilisé dans un autre cadre que celui de l'échange de données : dans le cadre d'une analyse de données. En effet, **le scan d'une maquette permet d'extraire des données statistiques de ces maquettes, et in fine, de nourrir l'analyse d'une maquette BIM en regard de différentes exigences de conformité** (de structuration ou de contenu de données BIM). Ce cas d'usage se situe dans une logique d'automatisation de la vérification de maquettes – vérification initialement permise par les requêtes. Un audit de maquette dans Treegram peut être considéré comme un assemblage formalisé de requêtes sur certaines valeurs de paramètres, mises en regard de valeurs clefs, à atteindre. **L'automatisation de l'analyse d'une maquette mène inévitablement à une logique big data – vers l'analyse quantitative de plusieurs maquettes, comme c'est le cas pour ce projet de tour. Cette**

logique de big data, avec ces analyses de données, fournit logiquement, un excellent terreau pour déployer des outils d'intelligence artificielle.

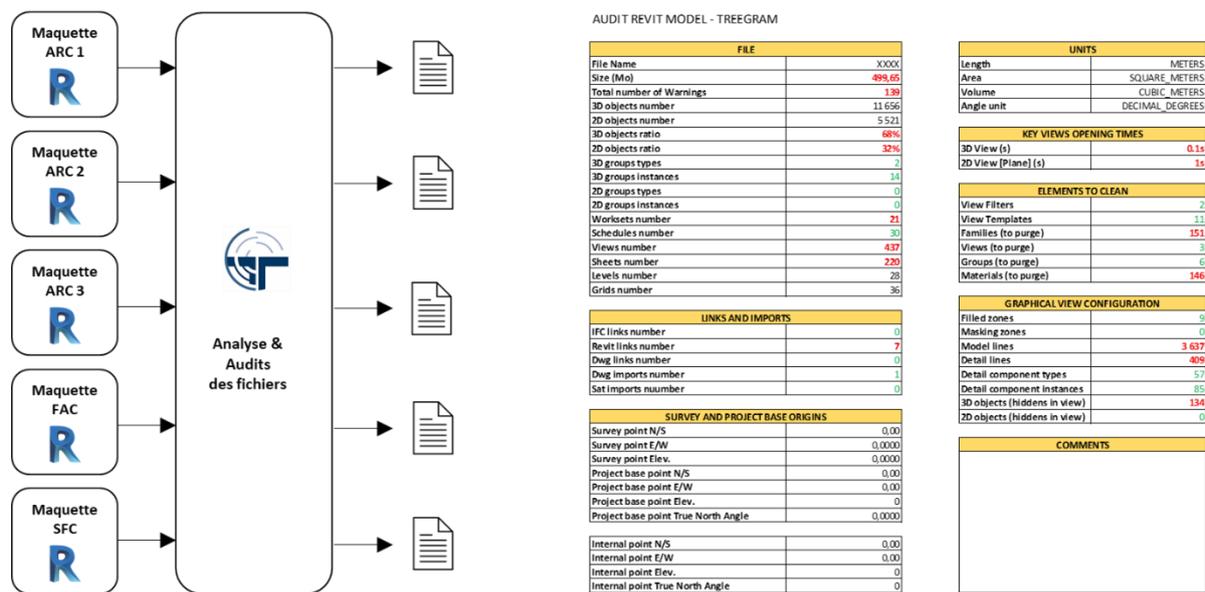


Figure 87 Automatisation de la vérification des maquettes

5.3 Conclusion

Dans les deux sections précédentes, nous avons montré différents usages de Treegram – dont nous tirerons ici conclusions et pistes de recherches.

5.3.1 Pistes d'améliorations du prototype Treegram

Treegram vise et à instaurer des workflows d'interopérabilité dynamique (Ferries & de Boissieu, 2018), via lesquels les acteurs s'envoient, éditent et se renvoient des données sans en faire de copies mortes ni écraser les données reçues ou envoyées. Treegram est, in fine, la combinaison de deux approches : l'approche fédérée, d'un point de vue organisationnel et processuel, chaque acteur gardant son indépendance en termes d'environnement d'édition de la donnée – soit d'outil de modélisation BIM ; et l'approche unifiée, d'un point de vue informatique, avec la mise en place d'une base de données neutre, qui sert de vecteur à l'information, sans pour autant modifier les données originales ni surtout créer de nouveau modèle de donnée ou de format.

Ce logiciel étant en plein développement, et non encore commercialisé, de nombreux freins restent à lever, via par exemple le développement des fonctionnalités collaboratives SAS (*Service As a Software*), l'import d'un plus grand nombre de formats, ou l'automatisation systémique des imports afin de permettre de lire plus rapidement des volumes conséquents de données – soit de s'éloigner du séquentiel et de se rapprocher de la temporalité continue des paradigmes de l'ingénierie concourante. Par ailleurs, **l'utilisation du web sémantique serait intéressante à développer dans le cadre de ce logiciel – idéalement, à terme, le modèle de données neutre de Treegram pourrait devenir une ontologie.**

Toutefois, un défi est de dépasser le paradoxe suivant : comment implanter, dans le monde déjà fragmenté et varié du logiciel BIM, un énième logiciel - quand bien même celui-ci vise à connecter tous les autres ? **Peut-on résoudre un problème d'interopérabilité, découlant lui-même de la fragmentation du paysage BIM, en ajoutant au paysage un énième logiciel - qui contribue paradoxalement à rajouter de la diversité et de la fragmentation ? Deux leviers nous semblent pouvoir relever ce défi. Du côté du logiciel, la qualité de l'interface, qui se devra très intuitive, presque universelle, avec une prise en main quasiment indolore pour un utilisateur, semble être déterminante pour le déploiement d'un tel outil ; du côté du business modèle, il est probable qu'un mode open-source, collaboratif et gratuit, à l'instar d'un outil comme Grasshopper, développé par une communauté de *power-users* soit plus en phase avec la visée originale de Treegram : décloisonner les données propriétaires.**

5.3.2 Workflows de co-modélisation BIM et ingénierie concourante

Les cas d'usage de Treegram dans une situation de production multi-métier montrent que la co-modélisation BIM effective reste un défi à relever ; il s'agit de l'aboutissement ultime d'un workflow d'interopérabilité. Comme indiqué précédemment, cela implique que, pour un métier donné, l'acteur d'une équipe A puisse enrichir directement un set de données BIM modélisées par une équipe B – et ceci sans dupliquer ni risquer d'écraser la donnée originale de l'équipe A ; et vice-versa.

La fonctionnalité des *extensions* de Treegram, présentée dans le chapitre 4, permet d'instaurer de tels workflows, mais reste à tester à grande échelle. Cette technologie semble prometteuse pour instaurer des processus de co-modélisation, mais un frein psychologique et organisationnel

subsiste, émanant d'une pratique, héritée de l'ère du papier et du calque, qui consiste, par ressaisies ou copies, à créer des doublons des données au moment de leurs échanges. Le manque d'interopérabilité technique (lié à des questions de compatibilité entre divers modèles de données) est certes en grande partie à l'origine de cette nécessité qu'ont les acteurs BIM de dupliquer ou de ressaisir mutuellement leurs données d'entrée afin de pouvoir les manipuler, les utiliser, les enrichir ; mais ce n'est pas la seule force à l'œuvre dans ce processus.

En effet, si les acteurs BIM d'une équipe A ressaisissent ou créent des copies mortes des données qu'ils héritent de l'équipe B, c'est aussi pour s'approprier ou apprivoiser le travail de l'équipe B ; pour vérifier ces données, et notamment, leur conformité contractuelle ; pour figer ces données dans le cadre d'une séquence de travail, les circonscrire à la révision précise d'une maquette BIM. Ce sont donc aussi des habitudes organisationnelles et contractuelles qui poussent globalement les acteurs à se méfier de la donnée de l'*autre* et contribuent à mettre une distance entre la donnée de l'équipe A et de l'équipe B ; soit des modes relationnels basés sur la défiance, comme évoqués précédemment (Soman & Whyte, 2020). Avec en trame de fonds les dispositifs contractuels de contestation, de remise en cause du travail effectué par l'*autre* équipe, de demandes d'honoraires supplémentaires pour toute modification de projet non prévue, de travaux supplémentaires – tout cela dans le cadre de devis et contrats basés sur des nombres de révisions.

L'instauration de workflows de co-modélisation, même si elle semble technologiquement possible, implique donc de remettre en cause deux paramètres encore fondamentaux de la structuration des projets dans l'AEC : la nette séparation des disciplines, et la temporalité séquentielle – soit de bouleverser la fragmentation en unités de métier et unités de temps, et épouser le paradigme de l'ingénierie concurrente. Cette nouvelle structuration entraînerait l'intégration en amont d'un grand nombre de contraintes de projet traditionnellement traitées en aval ; un enrichissement collectif de la donnée, des ajustements continus entre les disciplines ; la propagation automatisée des modifications de projet ; et surtout, un fort degré de confiance entre les acteurs, ou tout au moins, l'instauration de nouveaux modèles économiques plus vertueux entre les différents métiers – dont les intérêts convergeraient au lieu de diverger. Dans quelle mesure l'industrie du bâtiment pourra-t-elle embrasser de telles transformations – et quand ?

5.3.3 Comment la question de l'automatisation prend le relais sur celle de l'interopérabilité

Les cas d'usage de Treegram dans une situation de production mono-métier ont révélé que les quatre situations d'interopérabilité décrites au chapitre 3, découlant des paramètres de métiers et de phases, se retrouvent à une échelle différente à l'intérieur de la situation d'interopérabilité n° 1 (mono-phase, mono-métier). En effet, on retrouve à l'échelle micro (à l'intérieur d'une phase et d'un métier) les mêmes paradigmes qu'à l'échelle macro (à travers les phases et les métiers) – puisqu'un métier est souvent décomposé en sous-disciplines, et qu'au sein d'une phase, le projet subi différentes étapes. La donnée doit donc, dans la situation d'interopérabilité n° 1, comme dans la situation n° 4, franchir les frontières que sont les différents auteurs et utilisateurs des données, les multiples itérations de projet, et les divers outils de production et d'analyse BIM.

Or, dans les situations de production BIM mono-phase/mono-métier, il devient de plus en plus évident que l'automatisation est nécessaire pour garantir la qualité des maquettes BIM – et accélérer leur production. Dans les grands projets, automatiser la génération de façades via Grasshopper ou Dynamo est devenu une évidence ; dans les agences d'architecture, les bureaux d'études, les entreprises de construction, automatiser au moins partiellement la production des maquettes BIM s'impose afin de gagner en productivité. Cette automatisation est orchestrée, en 2021, par un profil très particulier de *power users*, les *BAM*, ayant à la fois des savoirs métiers et informatiques, capables d'automatiser des logiciels BIM et de programmer des fonctionnalités et plugins externes.

Ainsi la question de l'interopérabilité entre des acteurs ou entre des logiciels s'est-elle déplacée vers la question de l'interopérabilité entre des processus de production. Cela explique pourquoi, dans les cas d'usage mono-métier, Treegram a été utilisé non seulement pour gérer les passages entre les différentes sous-disciplines, personnes, outils, mais aussi pour **gérer la production BIM de manière plus globale et orchestrer des workflows.**

Il est à noter que c'est une tendance assez logique de tout processus d'automatisation, qui mène inévitablement, ontologiquement, vers plus d'automatisation : un morceau de processus étant automatisé, on va naturellement automatiser les processus afférents, puis itérativement

automatiser l'automation même de ce processus. Si l'on considère qu'améliorer l'interopérabilité consiste à automatiser le passage des données entre deux logiciels, il est logique qu'une fois cette étape franchie, on soit tenté de déborder sur la meilleure gestion des inputs et des outputs afférents - d'automatiser ce processus en amont et en aval. Vient ensuite l'itération : on est tenté de compter les passages entre les deux logiciels, les qualifier, les analyser, et on finit par orchestrer des flux volumineux de données. **Traiter la problématique d'un passage de données a naturellement amené à la problématique du monitoring holistique d'une production. Ainsi la question de l'interopérabilité et des échanges de données a-t-elle mené à celle plus vaste de l'automation, qui, portée à l'échelle globale d'un projet, débouche inévitablement sur celle de l'ingénierie concourante.**

Conclusion

Le manque d'interopérabilité BIM et de collaboration digitale fluide dans l'AEC est reconnu sur le terrain et par la communauté scientifique ; la présente thèse a visé à élaborer des leviers pour résoudre ce double problème. Celle-ci a été réalisée en contrat CIFRE avec un partenaire industriel : une start-up développant un prototype de logiciel appelé Treegram, visant à consolider les flux de données BIM. Notre rôle a ici été d'étayer théoriquement le développement de ce logiciel, de contribuer à la conception de certaines fonctionnalités et de les implémenter sur des projets d'architecture, tout en évaluant son apport dans des situations de projets réels.

Notre question de recherche était la suivante : comment améliorer l'interopérabilité autour des données BIM ? Notre 1^{er} objectif a été de parcourir cette double problématique d'interopérabilité technique et métier, enracinée dans la fragmentation et la faible digitalisation de l'industrie AEC, et d'en établir une cartographie pour de futurs chercheurs. Nous avons ainsi mené un triple état de l'art sur la collaboration digitale dans l'AEC, à travers des allers-retours entre une période récente (2013-2018), vintage (1990-2000), et brûlante (2019-2021), et révélé que, si une vision beaucoup plus holistique de la collaboration digitale était à l'œuvre dans la période de gestation du BIM, mêlant les processus informatiques et métier, ce type d'approche s'est raréfiée durant les années 2010 pour réémerger très récemment. Dans le spectre de ce double regard, digital et organisationnel, une lacune dans la recherche nous est apparue prégnante – liée à la capacité technique *d'interroger* des données BIM pour répondre au besoin métier trivial de *retrouver* des informations précises au sein de larges maquettes BIM.

Notre 2^{ème} objectif a été d'étayer l'hypothèse selon laquelle la mise en œuvre de requêtes BIM, associée à des processus d'enrichissement de données, instaure un cadre collaboratif de co-modélisation à même d'améliorer l'interopérabilité BIM. Notre 3^{ème} objectif a été de tester un prototype logiciel implémentant un tel cadre : une base de données neutre, fédérant différentes sources de données BIM, requêtables et enrichissables par des utilisateurs. L'architecture et les fonctionnalités du logiciel ont été exposées, et les tests de robustesse et d'usage se sont révélés

concluants. Notre 4^{ème} objectif a été de valider le cadre collaboratif et le prototype logiciel associé, via une mise en application sur des projets réels. Nous avons montré que l'approche fonctionne dans un cadre de collaboration BIM mono-métier et multi-métier – tout en bousculant les aspects traditionnels de la collaboration AEC.

En effet, l'instauration de cadres collaboratifs de co-modélisation BIM questionne l'essence même de la structuration fragmentée de l'industrie AEC, et notamment la segmentation des projets par phases et par disciplines. Elle préfigure le déploiement imminent de logiques d'ingénierie concurrente dans les projets de bâtiments, impliquant le remplacement du séquentiel par le temps réel, et l'instauration de modèles d'affaires plus vertueux – plus synergiques, plus convergents. Cette migration vers une approche intégrative a commencé, par petites touches, chez quelques acteurs et entrepreneurs AEC encore dispersés. Elle reste à étudier et à orienter, notamment via le prisme des nouvelles technologies de l'industrie 4.0, qui pourraient en accélérer le cours.

Comme montré dans le chapitre 5, un workflow de co-modélisation alliant requêtes et enrichissements de données mutuelles semble certes être une solution aux problèmes d'interopérabilité BIM, ponctuellement en 2021, et lève les problèmes de compatibilité entre les formats, de propriété des données, permettant des échanges souples entre les différents métiers. Toutefois, la mise en place à grande échelle d'un tel cadre collaboratif peut-elle se faire malgré les freins psychologiques et institutionnels émanant des modèles d'affaire de l'AEC, liés à une forte fragmentation des acteurs ? En d'autres termes, peut-on instaurer des pratiques tendant vers l'ingénierie concurrente dans l'industrie du bâtiment sans bouleverser complètement au préalable les écosystèmes d'affaire en place ? Ces pratiques peuvent-elles s'instaurer progressivement, ou nécessairement dans une rupture avec les modes économiques, contractuels et organisationnels traditionnels ?

La présente thèse, puisqu'on écrit toujours *de quelque part*, a certainement en trame de fond diffuse l'idée suivante, inévitablement teintée d'idéal (qu'on n'espère pas trop idéologique) : l'idée selon laquelle la fragmentation de l'AEC a aussi des aspects bénéfiques, liés à la pluralité et diversité de ses acteurs, entraînant une certaine indépendance entre ses différentes entités, et une consolidation des connaissances métier (peut-être a-t-on ici en tête les guildes d'artisans italiens d'avant la renaissance, ou la multitude des savoir-faire sur les chantiers gothiques).

Ainsi, sans surtout verser dans le luddisme, on peut se demander si l'AEC, certes archaïque en termes de digitalisation, ne peut pas aussi constituer un terrain intéressant pour des disruptions technologiques non uniformes, décentralisées, voire bottom-up – à l'instar, par exemple, d'outils open-source comme Grasshopper. Est-ce que le déploiement de l'ingénierie concourante dans l'AEC se fera de manière top-down, avec des logiques de monopoles d'éditeurs de logiciels *winner takes all* comme on l'a vu avec l'édition de logiciels BIM jusqu'à présent – ou bien de manière bottom-up, voire organique ? Les logiques intégratives dans l'AEC peuvent-elles se développer tout en conservant la qualité multidisciplinaire et distribuée de cette industrie ?

Pour atteindre ce but, il semble souhaitable que les différentes entités de l'AEC s'emparent des nouvelles technologies de l'industrie 4.0. Ces technologies incluent le web sémantique (Costa & Sicilia, 2020; Pauwels et al., 2017), impliquant de migrer du paradigme des modèles de données à celui des ontologies, et permettraient entre autres de fluidifier les mappings entre différents systèmes. De plus, le web sémantique est un excellent terreau pour la généralisation de l'interrogation libre et aisée des données BIM. Dans la même lignée, les signatures invariantes (J. Wu et al., 2021), dépassant la question des modèles de données, semblent très prometteuses. Par ailleurs, l'utilisation de la technologie de la blockchain (Xue & Lu, 2020) permettrait de ramener de la transparence et de la confiance dans les échanges BIM – et dans l'AEC en général. Enfin, les technologies liées à l'intelligence artificielle, incluant notamment le machine learning (Koo & Shin, 2018) et le deep learning (Koo et al., 2021), jusqu'ici peu étudiées dans le champ du BIM, sont à considérer très sérieusement, car elles pourraient créer une rupture dans les pratiques de l'AEC. Le machine learning, timidement utilisé par quelques chercheurs pour corriger des erreurs de classification IFC (Koo & Shin, 2018), pourrait être utilisé à plus grande échelle pour détecter des erreurs de modélisations géométriques et métier dans les maquettes BIM, en regard de normes de construction par exemple, ou pour améliorer des vues métier, et établir des prédictions sur la base d'analyses croisées entre différentes maquettes BIM. Le deep learning pourrait être expérimenté pour les activités mêmes de conception architecturale et d'ingénierie, mais aussi, d'une manière plus globale, sur la base d'analyses d'un grand volume de données BIM de différents projets, pour prédire statistiquement les performances énergétiques et les coûts d'exploitation d'un bâtiment, ou pour améliorer des workflows au sein de l'AEC : en détecter les incohérences, analyser les processus

défaillants dans les flux de données entre les acteurs, ou dans la chaîne d'approvisionnement sur un chantier par exemple. Il faut espérer que l'industrie AEC s'empare sérieusement des technologies de l'industrie 4.0 et du big data, et en développe des usages qui lui sont spécifiques, afin d'être en mesure de ne pas subir la future vague de transformation digitale, mais bien d'y contribuer.

Liste des publications

Articles dans revues internationales à comité de lecture JCR (ISI Web of Science)

- [1] [2020] SATTTLER L., LAMOURE S., PELLERIN R., FORTINEAU V., LARABI M., MAIGNE T. “A query-based framework to improve BIM multi-domain collaboration”. Enterprise Information Systems (EIS). Pages 1-23. JCR. DOI: <https://doi.org/10.1080/17517575.2020.1845810>

Chapitres d’ouvrages

- [2] [2020] SATTTLER L., LAMOURE S., LARABI M., PELLERIN R., MAIGNE T. “L’interopérabilité BIM multi métiers : la collaboration par la requête” Chapitre 1 in Le BIM et l'évolution des pratiques. Ingénierie et architecture, enseignement et recherche. Pages 11-27. Editions EYROLLES. ISBN 978-2-212-67989-2
- [3] [2019] SATTTLER L., LAMOURE S., PELLERIN R., DENEUX D., MAIGNE T. “Les maquettes numériques rêvent elles d’intégration ? Perspectives et paradoxes autour de la collaboration et de l’interopérabilité BIM.” Chapitre 1 in Le BIM entre recherche et industrialisation Ingénierie et architecture, enseignement et recherche. Pages 15-38. Editions EYROLLES. ISBN 978-2-212-67802-4

Actes publiés de conférences internationales, congrès et colloques

- [4] [2020] PAVIOT T., PLESCH A., SATTTLER L., LAMOURE S. “STEP and IFC export to X3D”. The 25th International Conference on 3D Web Technology Korea University and online. Seoul, South Korea, 2020. p. 1-13.1-13. <https://doi.org/10.1145/3424616.3424706>
- [5] [2019] SATTTLER L., LAMOURE S., PELLERIN R., DENEUX D., LARABI M., MAIGNE T. “Multi-domain BIM interoperability: queries as data-exchange vectors”. International Conference on Industrial and Systems Management, Pages 1-6 (IESM'19-i4e2-IEEE), Shanghai Chine. DOI: 10.1109/IESM45758.2019.8948082. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8948082>
- [6] [2019] SATTTLER L., LAMOURE S., PELLERIN R., MAIGNE T. “Interoperability aims in Building Information Modeling exchanges: a literature review”. Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control. (MIM'19) IFAC. Berlin Germany. IFAC-PapersOnLine (Elsevier) Volume 52, Issue 13, 2019, Pages 271-276. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.180>
- [7] [2020] SATTTLER L., LAMOURE S., PELLERIN R. “Rétro-BIM ou la question de l’intégration : une revue anachronique”. 9ème Séminaire de Conception Architecturale Numérique (SCAN 20). Bruxelles, Belgique. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20208202003>

Actes publiés de conférences nationales, congrès et colloques

- [8] [2019] SATTTLER L., LAMOURE S., PELLERIN R., MAIGNE T. “Visées collaboratives de l’interopérabilité BIM: revue de littérature”. (CIGI-QUALITA 19), Montréal, Canada. .

Bibliographie

- A community of national and international design practices including:, AHMM, Allies and Morrison, Aukett Swanke, BVN Architectural Services, Corstorphine + Wright, Fletcher Priest Architects, Glenn Howells Architects, Grimshaw, PRP, Rogers, Stirk, Harbour and Partners, Scott Brownrigg, Sheppard Robson, Simpson Haugh, Stephen George + Partners, TTSP, Wilkinson Eyre Architects, & Zaha Hadid Architects. (2020, July). *Open letter to Andrew Anagnost, President and Chief Executive Officer, Autodesk*. http://aecmag.s3.amazonaws.com/AEC_Autodesk_customer_letter.pdf
- Abdal Noor, B., & Yi, S. (2018). Review of BIM literature in construction industry and transportation: Meta-analysis. *Construction Innovation*, 18(4), 433–452. <https://doi.org/10.1108/CI-05-2017-0040>
- Abuelmaatti, A. (2014). Collaborative Technologies for Small and Medium-sized Architecture, Engineering and Construction Enterprises: Implementation Survey. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 210–224.
- Afsari, K., Eastman, C. M., & Castro-Lacouture, D. (2017). JavaScript Object Notation (JSON) data serialization for IFC schema in web-based BIM data exchange. *Automation in Construction*, 77, 24–51. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.01.011>
- Afsari, K., Eastman, C., & Shelden, D. (2017). Building Information Modeling data interoperability for Cloud-based collaboration: Limitations and opportunities. *International Journal of Architectural Computing*, 15(3), 187–202. <https://doi.org/10.1177/1478077117731174>
- Ahn, K.-U., Kim, Y.-J., Park, C.-S., Kim, I., & Lee, K. (2014). BIM interface for full vs. Semi-automated building energy simulation. *Energy and Buildings*, 68, 671–678. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.063>
- Akanbi, T., Zhang, J., & Lee, Y.-C. (2020). Data-Driven Reverse Engineering Algorithm Development Method for Developing Interoperable Quantity Takeoff Algorithms Using

- IFC-Based BIM. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 34(5), 04020036.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000909](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000909)
- Alfares, M., Seireg, A. (1996). An integrated system for computer-aided design and construction of reinforced concrete buildings using modular forms. *Automation in Construction*.
- Alshawi, M., & Underwood, J. (1996). Applying object-oriented analysis to the integration of design and construction. *Automation in Construction*, 5(2), 105–121.
[https://doi.org/10.1016/0926-5805\(95\)00023-2](https://doi.org/10.1016/0926-5805(95)00023-2)
- Alwan, Z., Greenwood, D., & Gledson, B. (2015). Rapid LEED evaluation performed with BIM based sustainability analysis on a virtual construction project. *Construction Innovation*, 15(2), 134–150. <https://doi.org/10.1108/CI-01-2014-0002>
- Andriamamonjy, A., Saelens, D., & Klein, R. (2019). A combined scientometric and conventional literature review to grasp the entire BIM knowledge and its integration with energy simulation. *Journal of Building Engineering*, 22, 513–527.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.12.021>
- Antwi-Afari, M. F., Li, H., Pärn, E. A., & Edwards, D. J. (2018). Critical success factors for implementing building information modelling (BIM): A longitudinal review. *Automation in Construction*, 91, 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.03.010>
- Aranda, J. Á., Martin-Dorta, N., Naya, F., Conesa-Pastor, J., & Contero, M. (2020). Sustainability and Interoperability: An Economic Study on BIM Implementation by a Small Civil Engineering Firm. *Sustainability*, 12(22), 9581.
<https://doi.org/10.3390/su12229581>
- Arayici, Y., Fernando, T., Munoz, V., & Bassanino, M. (2018). Interoperability specification development for integrated BIM use in performance based design. *Automation in Construction*, 85, 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.10.018>
- Belsky, M., Eastman, C., Sacks, R., Venugopal, M., Aram, S., & Yang, D. (2014). Interoperability for precast concrete building models. *PCI Journal*, 59(2), 144–155.
<https://doi.org/10.15554/pcij.03012014.144.155>

- Belsky, M., Sacks, R., & Brilakis, I. (2016). Semantic Enrichment for Building Information Modeling: Semantic enrichment for building information modeling. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 31(4), 261–274. <https://doi.org/10.1111/mice.12128>
- Bernstein, P. (2020). The Distractions of Disruptions—Technical Supply in an Era of Social Demand. *Architectural Design*, 90(2), 14–23. <https://doi.org/10.1002/ad.2550>
- Bird, L., & LaBelle, G. (2010). Re-Animating Greg Lynn’s Embryological House: A Case Study in Digital Design Preservation. *Leonardo*, 43(3), 243–249. <https://doi.org/10.1162/leon.2010.43.3.243>
- Boiko, A. (2020, December 17). *Lobbyist Wars and the Development of BIM. Part 2: Open BIM VS closed BIM. Revit vs ArchiCAD and Europe VS the Rest of the World.* <https://www.linkedin.com/pulse/lobbyist-wars-development-bim-part-2-open-vs-closed-revit-boiko-artem/>
- Boiko, A. (2021, January 18). *Lobbyist Wars and BIM Development. Part 4: The fight between CAD and BIM. Monopolies and lobbyists in the construction industry.* <https://www.linkedin.com/pulse/lobbyist-wars-bim-development-part-4-fight-between-cad-artem-boiko/>
- Brown, F. E., Cooper, G. S., Ford, S., Aouad, G., Brandon, P., Child, T., Kirkham, J. A., Oxman, R., & Young, B. (1995). An integrated approach to CAD: Modelling concepts in building design and construction. *Design Studies*, 16(3), 327–347. [https://doi.org/10.1016/0142-694X\(94\)00002-U](https://doi.org/10.1016/0142-694X(94)00002-U)
- Brumana, R., Della Torre, S., Previtali, M., Barazzetti, L., Cantini, L., Oreni, D., & Banfi, F. (2018). Generative HBIM modelling to embody complexity (LOD, LOG, LOA, LOI): Surveying, preservation, site intervention—the Basilica di Collemaggio (L’Aquila). *Applied Geomatics*, 10(4), 545–567. <https://doi.org/10.1007/s12518-018-0233-3>
- BuildingSmart. (n.d.). *Industry Foundation Classes*. BuildingSmart.Org. Retrieved January 19, 2020, from <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/industry-foundation-classes/>

- Burbidge, J. L., Falster, P., Riis, J. O., & Svendsen, O. M. (1987). Integration in Manufacturing. *Computers in Industry*, 9(4), 297–305. [https://doi.org/10.1016/0166-3615\(87\)90103-5](https://doi.org/10.1016/0166-3615(87)90103-5)
- Carpo, M. (2017). *The Second Digital Turn, Design Beyond Intelligence*. MIT Press.
- Cemesova, A., Hopfe, C. J., & Mcleod, R. S. (2015). PassivBIM: Enhancing interoperability between BIM and low energy design software. *Automation in Construction*, 57, 17–32. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.04.014>
- Chardon, S., Brangeon, B., Bozonnet, E., & Inard, C. (2016). Construction cost and energy performance of single family houses: From integrated design to automated optimization. *Automation in Construction*, 70, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.06.011>
- Choi, J., Lee, J., & Cho, J. (2018). Suggestion of the Core Element Technology to Improve BIM Data Interoperability Based on the Energy Performance Analysis. *International Journal of Grid and Distributed Computing*, 11(4), 157–168. <https://doi.org/10.14257/ijgdc.2018.11.4.14>
- Choi, J., Shin, J., Kim, M., & Kim, I. (2016). Development of openBIM-based energy analysis software to improve the interoperability of energy performance assessment. *Automation in Construction*, 72, 52–64. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.07.004>
- Choi, M., Cho, S., Lim, J., Shin, H., Li, Z., & Kim, J. J. (2018). Design framework for variable refrigerant flow systems with enhancement of interoperability between BIM and energy simulation. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32(12), 6009–6019. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-1151-3>
- Chong, H.-Y., Lee, C.-Y., & Wang, X. (2017). A mixed review of the adoption of Building Information Modelling (BIM) for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 142, 4114–4126. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.222>
- Ciribini, A. L. C., Mastrolembro Ventura, S., & Paneroni, M. (2016). Implementation of an interoperable process to optimise design and construction phases of a residential building: A BIM Pilot Project. *Automation in Construction*, 71, 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.03.005>

- Costa, G., & Madrazo, L. (2015). Connecting building component catalogues with BIM models using semantic technologies: An application for precast concrete components. *Automation in Construction*, *57*, 239–248. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.05.007>
- Costa, G., & Sicilia, A. (2020). Alternatives for facilitating automatic transformation of BIM data using semantic query languages. *Automation in Construction*, *120*, 103384. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103384>
- Costin, A., Adibfar, A., Hu, H., & Chen, S. S. (2018). Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure – Literature review, applications, challenges, and recommendations. *Automation in Construction*, *94*, 257–281. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.001>
- Čuš-Babič, N., Rebolj, D., Nekrep-Perc, M., & Podbreznik, P. (2014). Supply-chain transparency within industrialized construction projects. *Computers in Industry*, *65*(2), 345–353. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.12.003>
- Das, M., Cheng, J. C., & Kumar, S. S. (2015). Social BIMCloud: A distributed cloud-based BIM platform for object-based lifecycle information exchange. *Visualization in Engineering*, *3*(1). <https://doi.org/10.1186/s40327-015-0022-6>
- Dave, B., Kubler, S., Främling, K., & Koskela, L. (2016). Opportunities for enhanced lean construction management using Internet of Things standards. *Automation in Construction*, *61*, 86–97. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.10.009>
- Díaz, H., Alarcón, L. F., Mourgues, C., & García, S. (2017). Multidisciplinary Design Optimization through process integration in the AEC industry: Strategies and challenges. *Automation in Construction*, *73*, 102–119. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.09.007>
- Ding, L., & Xu, X. (2014). Application of Cloud Storage on BIM Life-Cycle Management. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, *11*(8), 129. <https://doi.org/10.5772/58443>
- Du, J., He, R., & Sugumaran, V. (2016). Clustering and ontology-based information integration framework for surface subsidence risk mitigation in underground tunnels. *Cluster Computing*, *19*(4), 2001–2014. <https://doi.org/10.1007/s10586-016-0631-4>

- Eastman, C. M. (1975). The Use of Computers Instead of Drawings in Building Design. *AIA Journal*, 63, 46–50.
- Eastman, C. M., Chase, S. C., & Assal, H. H. (1993). System architecture for computer integration of design and construction knowledge. *Automation in Construction*, 2(2), 95–107.
- Eastman, C. M., Eastman, C., Teicholz, P., & Sacks, R. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. John Wiley & Sons.
- Eastman, C. M., Fisher, D., Lafue, G., Lividini, J., Stoker, D., & Yessios, C. (1974). An Outline of the Building Description System. *Institute of Physical Planning*, 50, 22.
- El Asmi, E., Robert, S., Haas, B., & Zreik, K. (2015). A standardized approach to BIM and energy simulation connection. *International Journal of Design Sciences & Technology*, 21(1).
- El-Bibany, H., & Paulson, B. C. (1994). Collaborative Knowledge-integration Systems: A Tool for AEC Design, Management, and Coordination. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 9(1), 29–40. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.1994.tb00359.x>
- Evbuomwan, N. F. O., & Anumba, C. J. (1998). An integrated framework for concurrent life-cycle design and construction. *Advances in Engineering Software*, 29(7–9), 587–597. [https://doi.org/10.1016/S0965-9978\(98\)00024-6](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(98)00024-6)
- Fenves, S. J., Flemming, U., Hendrickson, C., Maher, M. L., & Schmitt, G. (1990). Integrated software environment for building design and construction. *Computer-Aided Design*, 22(1), 27–36. [https://doi.org/10.1016/0010-4485\(90\)90026-9](https://doi.org/10.1016/0010-4485(90)90026-9)
- Ferries, B., & de Boissieu, A. (2018). Pour une interopérabilité dynamique. In *Ingénierie et architecture, enseignement et recherche* (pp. 55–67).
- Fortineau, V. (2013). *Contribution à une modélisation ontologique des informations tout au long du cycle de vie du produit* [Génie des procédés, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers]. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-01064598/document>

- Fuchs, S., & Scherer, R. J. (2017). Multimodels—Instant nD-modeling using original data. *Automation in Construction*, 75, 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.11.013>
- Gallaher, M. P., O'Connor, A. C., Dettbarn, Jr., J. L., & Gilday, L. T. (2004). *Cost Analysis of Inadequate Interoperability in the U.S. Capital Facilities Industry* (pp. 223–253). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.GCR.04-867>
- Gao, X., & Pishdad-Bozorgi, P. (2019). BIM-enabled facilities operation and maintenance: A review. *Advanced Engineering Informatics*, 39, 227–247. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.01.005>
- Garber, R. (2009). Optimisation Stories: The Impact of Building Information Modelling on Contemporary Design Practice. *Architectural Design*, 2, 6–13. <https://doi.org/10.1002/ad.842>
- Gehry, F., Lloyd, M., & Shelden, D. (2020). Empowering Design—Gehry Partners, Gehry Tehnologies and architect-led industry change. *Architectural Design*, 90(2), 120–127. <https://doi.org/10.1002/ad.2542>
- Girard, C. (2014). Chapitre 8. L'architecture, une dissimulation. La fin de l'architecture fictionnelle à l'ère de la simulation intégrale. In *Modéliser & simuler – Tome 2* (pp. 245–292). Editions Matériologiques; Cairn.info. <https://doi.org/10.3917/edmat.varen.2014.01.0245>
- Gökçe, K. U., Gökçe, H. U., & Katranuschkov, P. (2013). IFC-Based Product Catalog Formalization for Software Interoperability in the Construction Management Domain. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 27(1), 36–50. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000194](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000194)
- Gómez-Romero, J., Bobillo, F., Ros, M., Molina-Solana, M., Ruiz, M. D., & Martín-Bautista, M. J. (2015). A fuzzy extension of the semantic Building Information Model. *Automation in Construction*, 57, 202–212. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.04.007>
- Grilo, A., & Jardim-Goncalves, R. (2010). Value proposition on interoperability of BIM and collaborative working environments. *Automation in Construction*, 19(5), 522–530. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.11.003>

- Grilo, A., Zutshi, A., Jardim-Goncalves, R., & Steiger-Garcao, A. (2013). Construction collaborative networks: The case study of a building information modelling-based office building project. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 26(1–2), 152–165. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2012.681918>
- Gupta, A., Cemesova, A., Hopfe, C. J., Rezgui, Y., & Sweet, T. (2014). A conceptual framework to support solar PV simulation using an open-BIM data exchange standard. *Automation in Construction*, 37, 166–181. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.005>
- Guzmán Garcia, E., & Zhu, Z. (2015). Interoperability from building design to building energy modeling. *Journal of Building Engineering*, 1, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2015.03.001>
- Hartmann, T., Amor, R., & East, E. W. (2017). Information Model Purposes in Building and Facility Design. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 31(6), 04017054. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000706](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000706)
- Hassan Ibrahim, N. (2013). Reviewing the evidence: USE of digital collaboration technologies in major building and infrastructure projects. *Journal of Information Technology in Construction*, 18, 40–63.
- Hernández, J., Martín Lerones, P., Bonsma, P., van Delft, A., Deighton, R., & Braun, J.-D. (2018). An IFC Interoperability Framework for Self-Inspection Process in Buildings. *Buildings*, 8(2), 32. <https://doi.org/10.3390/buildings8020032>
- Howard, H. C., Levitt, R. E., Paulson, B. C., Pohl, J. G., & Tatum, C. B. (1989). Computer Integration: Reducing Fragmentation in AEC Industry. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 3(1), 18–32. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(1989\)3:1\(18\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(1989)3:1(18))
- Hu, Z.-Z., Zhang, X.-Y., Wang, H.-W., & Kassem, M. (2016). Improving interoperability between architectural and structural design models: An industry foundation classes-based approach with web-based tools. *Automation in Construction*, 66, 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.02.001>
- Ilter, D., & Ergen, E. (2015). BIM for building refurbishment and maintenance: Current status and research directions. *Structural Survey*, 33(3), 228–256. <https://doi.org/10.1108/SS-02-2015-0008>

- ISO/IEC 2382-1:1993, *Information technology—Vocabulary—Part 1: Fundamental terms*. (1993). [ISO/IEC 2382-1:1993]. ISO. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:2382:-1:ed-3:v1:en>
- Jiang, Y., Yu, N., Watson, I., Ming, J., Lee, S., DeGraw, J., DeGraw, J., Yen, J., Messner, J. I., & Wu, D. (2015). Automatic building information model query generation. *Journal of Information Technology in Construction*, 20, 518–535.
- Kamel, E., & Memari, A. M. (2019). Review of BIM's application in energy simulation: Tools, issues, and solutions. *Automation in Construction*, 97, 164–180. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.008>
- Kang, T. W. (2017). Object composite query method using IFC and LandXML based on BIM linkage model. *Automation in Construction*, 76, 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.01.008>
- Karaman, S. G., Chen, S. S., & Ratnagar, B. J. (2013). Three-Dimensional Parametric Data Exchange for Curved Steel Bridges. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2331(1), 27–34. <https://doi.org/10.3141/2331-03>
- Karan, E., Irizarry, J., & Haymaker, J. (2015). Generating IFC models from heterogeneous data using semantic web. *Construction Innovation*, 15(2), 219–235. <https://doi.org/10.1108/CI-05-2014-0030>
- Kim, H., & Anderson, K. (2013). Energy Modeling System Using Building Information Modeling Open Standards. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 27(3), 203–211. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000215](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000215)
- Kim, J. B., Jeong, W., Clayton, M. J., Haberl, J. S., & Yan, W. (2015). Developing a physical BIM library for building thermal energy simulation. *Automation in Construction*, 50, 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.10.011>
- Kim, K. P., & Park, K. S. (2018). Delivering value for money with BIM-embedded housing refurbishment. *Facilities*, 36(13/14), 657–675. <https://doi.org/10.1108/F-05-2017-0048>
- Kim, M.-K., Cheng, J. C. P., Sohn, H., & Chang, C.-C. (2015). A framework for dimensional and surface quality assessment of precast concrete elements using BIM and 3D laser

- scanning. *Automation in Construction*, 49, 225–238.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.07.010>
- Kim, Y.-J. (2015). Bim to bem interoperability using web based process model. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10, 26969–26978.
- Kiwan, M. S., & Munns, A. K. (1996). A neutral object data model for integrated building design and construction environment. *Advances in Engineering Software*, 25(2–3), 131–140. [https://doi.org/10.1016/0965-9978\(95\)00105-0](https://doi.org/10.1016/0965-9978(95)00105-0)
- Koo, B., Jung, R., Yu, Y., & Kim, I. (2021). A geometric deep learning approach for checking element-to-entity mappings in infrastructure building information models. *Journal of Computational Design and Engineering*, 8(1), 239–250.
<https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa075>
- Koo, B., & Shin, B. (2018). Applying novelty detection to identify model element to IFC class misclassifications on architectural and infrastructure Building Information Models. *Journal of Computational Design and Engineering*, 5(4), 391–400.
<https://doi.org/10.1016/j.jcde.2018.03.002>
- Krijnen, T., & Beetz, J. (2020). An efficient binary storage format for IFC building models using HDF5 hierarchical data format. *Automation in Construction*, 113, 103134.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103134>
- Laakso, M. (2012). *The IFC Standard—A Review Of History, Development, And Standardization*. 29.
- Laakso, M., & Nyman, L. (2016). Exploring the Relationship between Research and BIM Standardization: A Systematic Mapping of Early Studies on the IFC Standard (1997–2007). *Buildings*, 6(1), 7. <https://doi.org/10.3390/buildings6010007>
- Ladenhauf, D., Berndt, R., Krispel, U., Eggeling, E., Ullrich, T., Battisti, K., & Gratzl-Michlmair, M. (2016). Geometry simplification according to semantic constraints: Enabling energy analysis based on building information models. *Computer Science - Research and Development*, 31(3), 119–125. <https://doi.org/10.1007/s00450-014-0283-7>

- Lee, J. K., & Kim, M. J. (2014). BIM-Enabled Conceptual Modelling and Representation of Building Circulation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 11(8), 127. <https://doi.org/10.5772/58440>
- Lee, Y.-C., Eastman, C. M., & Lee, J.-K. (2015). Validations for ensuring the interoperability of data exchange of a building information model. *Automation in Construction*, 58, 176–195. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.07.010>
- Lee, Y.-C., Eastman, C. M., & Solihin, W. (2016). An ontology-based approach for developing data exchange requirements and model views of building information modeling. *Advanced Engineering Informatics*, 30(3), 354–367. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.04.008>
- Lee, Y.-C., Eastman, C. M., & Solihin, W. (2018). Logic for ensuring the data exchange integrity of building information models. *Automation in Construction*, 85, 249–262. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.010>
- Lee, Y.-C., Eastman, C. M., & Solihin, W. (2021). Rules and validation processes for interoperable BIM data exchange. *Journal of Computational Design and Engineering*, 8(1), 97–114. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa064>
- Lee, Y.-C., Eastman, C. M., Solihin, W., & See, R. (2016). Modularized rule-based validation of a BIM model pertaining to model views. *Automation in Construction*, 63, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.11.006>
- Lee, Y.-C., Solihin, W., & Eastman, C. M. (2019). The Mechanism and Challenges of Validating a Building Information Model regarding data exchange standards. *Automation in Construction*, 100, 118–128. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.12.025>
- Li, B., Lou, R., Segonds, F., & Merienne, F. (2017). Multi-user interface for co-located real-time work with digital mock-up: A way to foster collaboration? *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 11(3), 609–621. <https://doi.org/10.1007/s12008-016-0335-2>

- Li, X., Wu, P., Shen, G. Q., Wang, X., & Teng, Y. (2017). Mapping the knowledge domains of Building Information Modeling (BIM): A bibliometric approach. *Automation in Construction*, *84*, 195–206. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.09.011>
- Liu, Z.-Q., Zhang, F., & Zhang, J. (2016). The Building Information Modeling and its Use for Data Transformation in the Structural Design Stage. *Journal of Applied Science and Engineering*, *19*(3), 273–284. <https://doi.org/10.6180/jase.2016.19.3.05>
- Luiten, G. T., Tolman, F. P., & Fischer, M. A. (1998). Project-modelling in AEC to integrate design and construction. *Computers in Industry*, *35*(1), 13–29. [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(97\)00081-X](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(97)00081-X)
- Lynn, G. (2020). Architects = Innovators (sometimes) Innovators ≠ Entrepreneurs (most of the time). *Architectural Design*, *90*(2), 82–87. <https://doi.org/10.1002/ad.2555>
- Malsane, S., Matthews, J., Lockley, S., Love, P. E. D., & Greenwood, D. (2015). Development of an object model for automated compliance checking. *Automation in Construction*, *49*, 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.10.004>
- Matarneh, S. T., Danso-Amoako, M., Al-Bizri, S., Gaterell, M., & Matarneh, R. (2019). Building information modeling for facilities management: A literature review and future research directions. *Journal of Building Engineering*, *24*, 100755. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100755>
- McGraw - Hill. (2012). *The Business Value in BIM North America—Multi-year Trend Analysis and Users Ratings (2007-2012)*. McGraw - Hill. <https://bimforum.org/wp-content/uploads/2012/12/MHC-Business-Value-of-BIM-in-North-America-2007-2012-SMR.pdf>
- McKinsey. (2020). *The next normal in construction: How disruption is reshaping the world's largest ecosystem*. <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/the-next-normal-in-construction-how-disruption-is-reshaping-the-worlds-largest-ecosystem#>
- McKinsey Global Institute. (2017). *Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity*. <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business%20Functions/Operations/Ou>

r%20Insights/Reinventing%20construction%20through%20a%20productivity%20revolution/MGI-Reinventing-Construction-Executive-summary.pdf

Model View Definition (MVD)—An Introduction. (n.d.). Retrieved April 14, 2021, from <https://technical.buildingsmart.org/standards/mvd/>

Morel, P., & Girard, C. (2017). Nous pensons qu'il faut dynamiser la façon d'enseigner l'architecture en France. *Le Monde*. https://www.lemonde.fr/campus/article/2017/06/24/nous-pensons-qu-il-faut-dynamiser-la-facon-d-enseigner-l-architecture-en-france_5150594_4401467.html

Muller, M. F., Garbers, A., Esmanioto, F., Huber, N., Loures, E. R., & Canciglieri Junior, O. (2017). Data interoperability assessment through IFC for BIM in structural design—a five-year gap analysis. *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(7), 943–954. <https://doi.org/10.3846/13923730.2017.1341850>

Musil, R. (1956). *L'homme sans qualités: Vol. Tome I* (Editions du Seuil, Point).

National BIM Standard—United States. (n.d.). Retrieved March 22, 2021, from <https://www.nationalbimstandard.org/about>

Nepal, M., Staub-French, S., & Pottinger, R. (2012). Providing Query Support to Leverage BIM for Construction. *Construction Research Congress 2012*, 767–777. <https://doi.org/10.1061/9780784412329.078>

Niknam, M., & Karshenas, S. (2017). A shared ontology approach to semantic representation of BIM data. *Automation in Construction*, 80, 22–36. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.03.013>

Nizam, R. S., Zhang, C., & Tian, L. (2018). A BIM based tool for assessing embodied energy for buildings. *Energy and Buildings*, 170, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.067>

Norton, B., Lo, S. N. G., Cronin, K. P., & Yohanis, Y. G. (1995). Towards the harmonious integration of information technology in building design and construction. *International Journal of Ambient Energy*, 16(2), 95–109. <https://doi.org/10.1080/01430750.1995.9675675>

- Notions clés du BIM - BuildingSmart France*. (n.d.). Retrieved March 22, 2020, from <https://buildingsmartfrance-mediaconstruct.fr/definition-notions-bim>
- Öztürk, G. B. (2020). Trends in interoperability in building information modeling (BIM) research: A scientometric analysis of authors and articles. *A/Z : ITU Journal of Faculty of Architecture*, 17(3), 169–183. <https://doi.org/10.5505/itujfa.2020.79026>
- Öztürk, G. B. (2020). Interoperability in building information modeling for AECO/FM industry. *Automation in Construction*, 113, 103122. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103122>
- Pärn, E. A., Edwards, D. J., & Sing, M. C. P. (2017). The building information modelling trajectory in facilities management: A review. *Automation in Construction*, 75, 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.12.003>
- Patti, E., Mollame, A., Erba, D., Dalmasso, D., Osello, A., Macii, E., & Acquaviva, A. (2017). Information Modeling for Virtual and Augmented Reality. *IT Professional*, 19(3), 52–60. <https://doi.org/10.1109/MITP.2017.43>
- Pauwels, P., Zhang, S., & Lee, Y.-C. (2017). Semantic web technologies in AEC industry: A literature overview. *Automation in Construction*, 73, 145–165. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.10.003>
- Paviot, T. (2010). *Méthodologie de résolution des problèmes d'interopérabilité dans le domaine du Product Lifecycle Management*.
- Paviot, T., Lamouri, S., & Cheutet, V. (2011). A generic multiCAD/multiPDM interoperability framework. *International Journal of Services Operations and Informatics*, 6(1/2), 124. <https://doi.org/10.1504/IJSOI.2011.038322>
- Perisic, A., Lazic, M., & Perisic, B. (2016). The Extensible Orchestration Framework approach to collaborative design in architectural, urban and construction engineering. *Automation in Construction*, 71, 210–225. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.005>
- Petri, I., Beach, T., Rana, O. F., & Rezgui, Y. (2017). Coordinating multi-site construction projects using federated clouds. *Automation in Construction*, 83, 273–284. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.011>

- Qing, L., Tao, G., & Ping, W.-J. (2014). Study on Building Lifecycle Information Management Platform Based on BIM. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 7(1), 1–8. <https://doi.org/10.19026/rjaset.7.212>
- Quattrini, R., Pierdicca, R., & Morbidoni, C. (2017). Knowledge-based data enrichment for HBIM: Exploring high-quality models using the semantic-web. *Journal of Cultural Heritage*, 28, 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.05.004>
- Raffee, S. M., Karim, M. S. A., & Hassan, Z. (2016). *Building sustainability assessment framework based on building information modelling*. 11(8), 5.
- Ramaji, I. J., & Memari, A. M. (2016). Interpreted Information Exchange: Systematic Approach for BIM to Engineering Analysis Information Transformations. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 30(6), 04016028. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000591](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000591)
- Ramaji, I. J., & Memari, A. M. (2018a). Extending the current model view definition standards to support multi-storey modular building projects. *Architectural Engineering and Design Management*, 14(1–2), 158–176. <https://doi.org/10.1080/17452007.2017.1386083>
- Ramaji, I. J., & Memari, A. M. (2018b). Interpretation of structural analytical models from the coordination view in building information models. *Automation in Construction*, 90, 117–133. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.025>
- Reinschmidt, K. F., Griffis, F. H. (Bud), & Bronner, P. L. (1991). Integration of Engineering, Design, and Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 117(4), 756–772. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1991\)117:4\(756\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1991)117:4(756))
- Ren, R., & Zhang, J. (2021). A New Framework to Address BIM Interoperability in the AEC Domain from Technical and Process Dimensions. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2021/8824613>
- Rio, J., Ferreira, B., & Poças-Martins, J. (2013). Expansion of IFC model with structural sensors. *Informes de La Construcción*, 65(530), 219–228. <https://doi.org/10.3989/ic.12.043>

- Roxin, A., & Hbeich, E. (2019). Semantic interoperability between BIM and GIS – review of existing standards and depiction of a novel approach. *Proceedings of the 36th International Conference of CIB W78, Newcastle-upon-Tyne, 36th CIB W78*, 359–369. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02279633/document>
- Ryu, J., Lee, J., & Choi, J. (2016). Development of Process for Interoperability Improvement of BIM Data for Free-form Buildings Design using the IFC Standard. *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, 10(2), 127–138. <https://doi.org/10.14257/ijseia.2016.10.2.11>
- Sacks, R., Gurevich, U., & Shrestha, P. (2016). A review of Building Information Modeling Protocols, Guides and Standards for Large Construction Clients. *Journal of Information Technology in Construction*, 21, 479–503.
- Sanhudo, L., Ramos, N. M. M., Poças Martins, J., Almeida, R. M. S. F., Barreira, E., Simões, M. L., & Cardoso, V. (2018). Building information modeling for energy retrofitting – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 249–260. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.064>
- Santos, R., Costa, A. A., & Grilo, A. (2017). Bibliometric analysis and review of Building Information Modelling literature published between 2005 and 2015. *Automation in Construction*, 80, 118–136. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.03.005>
- Sattler, L., Lamouri, S., Larabi, M., Pellerin, R., & Maigne, T. (2020). L'interopérabilité BIM multimétiers: La collaboration par la requête. In *Le BIM et l'évolution des pratiques: Ingénierie et architecture, enseignement et recherche* (Eyrolles). <https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/le-bim-et-l-evolution-des-pratiques-9782212679892/>
- Sattler, L., Lamouri, S., & Pellerin, R. (2020). *Rétro-BIM ou la question de l'intégration: Une revue anachronique*. SCAN 20 - SHS Web of Conferences, Bruxelles. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20208202003>
- Sattler, L., Lamouri, S., Pellerin, R., Deneux, D., Larabi, M., & Maigne, T. (2019). Multi-domain BIM interoperability: Queries as data-exchange vectors. *2019 International*

- Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*, 1–6.
<https://doi.org/10.1109/IESM45758.2019.8948082>
- Sattler, L., Lamouri, S., Pellerin, R., Deneux, D., & Maigne, T. (2019). Les maquettes numériques rêvent-elles d'intégration? In *Le BIM entre recherche et industrialisation: Ingénierie et architecture, enseignement et recherche* (Eyrolles).
<https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/le-bim-entre-recherche-et-industrialisation-9782212678024>
- Sattler, L., Lamouri, S., Pellerin, R., Fortineau, V., Larabi, M., & Maigne, T. (2020). A query-based framework to improve BIM multi-domain collaboration. *Enterprise Information System*. <https://doi.org/10.1080/17517575.2020.1845810>
- Sattler, L., Lamouri, S., Pellerin, R., & Maigne, T. (2019). Interoperability aims in Building Information Modeling exchanges: A literature review. *IFAC-PapersOnLine*, 52, 271–276. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.180>
- Sattler, L., & Maigne, T. (2018). L'ère post-BIM – Pour une obsolescence déprogrammée: Une étude de cas de deux projets de Frank Gehry en France, de 2008 à 2016. *Dnarchitecture*.
<https://dnarchi.fr/author/lea-sattler>
- Sénémaud, N. (2020). Architecture et pratique digitale, un business model à créer. *Dnarchitecture*. <https://dnarchi.fr/analyses/architecture-et-pratique-digitale-un-business-model-a-creer>
- Shadram, F., Johansson, T. D., Lu, W., Schade, J., & Olofsson, T. (2016). An integrated BIM-based framework for minimizing embodied energy during building design. *Energy and Buildings*, 128, 592–604. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.007>
- Shadram, F., & Mukkavaara, J. (2018). An integrated BIM-based framework for the optimization of the trade-off between embodied and operational energy. *Energy and Buildings*, 158, 1189–1205. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.017>
- Shin, T.-S. (2017). Building information modeling (BIM) collaboration from the structural engineering perspective. *International Journal of Steel Structures*, 17(1), 205–214.
<https://doi.org/10.1007/s13296-016-0190-9>

- Shirowzhan, S. (2020). BIM compatibility and its differentiation with interoperability challenges as an innovation factor. *Automation in Construction*, *112*, 103086. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103086>
- Sibenik, G., & Kovacic, I. (2020). Assessment of model-based data exchange between architectural design and structural analysis. *Journal of Building Engineering*, *32*, 101589. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101589>
- Solihin, W., Eastman, C., Lee, Y.-C., & Yang, D.-H. (2017). A simplified relational database schema for transformation of BIM data into a query-efficient and spatially enabled database. *Automation in Construction*, *84*, 367–383. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.10.002>
- Solnosky, R., & Hill, J. (2013). Formulation of systems and information architecture hierarchies for building structures. *Journal of Information Technology in Construction*, *18*, 261–278.
- Soman, R. K., & Whyte, J. K. (2020). Codification Challenges for Data Science in Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, *146*(7), 04020072. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001846](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001846)
- Sun, J., Liu, Y.-S., Gao, G., & Han, X.-G. (2015). IFCCompressor: A content-based compression algorithm for optimizing Industry Foundation Classes files. *Automation in Construction*, *50*, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.10.015>
- Tang, S., Shelden, D. R., Eastman, C. M., Pishdad-Bozorgi, P., & Gao, X. (2019). A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends. *Automation in Construction*, *101*, 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.020>
- Tchouanguem Djuedja, J. F., Abanda, F. H., Kamsu-Foguem, B., Pauwels, P., Magniont, C., & Karray, M. H. (2021). An integrated Linked Building Data system: AEC industry case. *Advances in Engineering Software*, *152*, 102930. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2020.102930>
- The Institute of Electrical and Electronics Engineers. (1990). *IEEE Standard Computer Dictionary—A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries—610*.

- Theiler, M., & Smarsly, K. (2018). IFC Monitor – An IFC schema extension for modeling structural health monitoring systems. *Advanced Engineering Informatics*, 37, 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.04.011>
- van Nederveen, G. A., & Tolman, F. P. (1992). Modelling multiple views on buildings. *Automation in Construction*, 1(3), 215–224. [https://doi.org/10.1016/0926-5805\(92\)90014-B](https://doi.org/10.1016/0926-5805(92)90014-B)
- Venugopal, M., Eastman, C. M., & Teizer, J. (2015). An ontology-based analysis of the industry foundation class schema for building information model exchanges. *Advanced Engineering Informatics*, 29(4), 940–957. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.09.006>
- Wang, H., Pan, Y., & Luo, X. (2019). Integration of BIM and GIS in sustainable built environment: A review and bibliometric analysis. *Automation in Construction*, 103, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.005>
- Wikipedia. (n.d.). *Deep Learning*. Retrieved April 14, 2020, from https://en.wikipedia.org/wiki/Deep_learning
- Wikipedia. (n.d.). *Machine Learning*. Retrieved April 14, 2020, from https://en.wikipedia.org/wiki/Machine_learning
- Wikipedia. (n.d.). *Requête*. Retrieved January 19, 2020, from <https://fr.wikipedia.org/wiki/Requ%C3%AAt>
- Wikipedia. (n.d.). *Semantic Web*. Retrieved April 14, 2020, from https://fr.wikipedia.org/wiki/Apprentissage_automatique
- Wong, J. K. W., Ge, J., & He, S. X. (2018). Digitisation in facilities management: A literature review and future research directions. *Automation in Construction*, 92, 312–326. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.04.006>
- Woo, J.-H., & Menassa, C. (2014). Virtual Retrofit Model for aging commercial buildings in a smart grid environment. *Energy and Buildings*, 80, 424–435. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.004>
- Wu, J., Sadraddin, H. L., Ren, R., Zhang, J., & Shao, X. (2021). Invariant Signatures of Architecture, Engineering, and Construction Objects to Support BIM Interoperability

- between Architectural Design and Structural Analysis. *Journal of Construction Engineering and Management*, 147(1), 04020148. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001943](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001943)
- Wu, J., & Zhang, J. (2019). New Automated BIM Object Classification Method to Support BIM Interoperability. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 33(5), 04019033. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000858](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000858)
- Wu, W., Mayo, G., McCuen, T. L., Issa, R. R. A., & Smith, D. K. (2018). Building Information Modeling Body of Knowledge. I: Background, Framework, and Initial Development. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(8), 04018065. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001518](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001518)
- Xu, Z., Huang, T., Li, B., Li, H., & Li, Q. (2018). Developing an IFC-Based Database for Construction Quality Evaluation. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 1–22. <https://doi.org/10.1155/2018/3946051>
- Xue, F., & Lu, W. (2020). A semantic differential transaction approach to minimizing information redundancy for BIM and blockchain integration. *Automation in Construction*, 118, 103270. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103270>
- Yamazaki, Y. (1992). Integrated design and construction planning system for Computer Integrated Construction. *Automation in Construction*, 1(1), 21–26.
- Yang, X., Hu, M., Wu, J., & Zhao, B. (2018). Building-information-modeling enabled life cycle assessment, a case study on carbon footprint accounting for a residential building in China. *Journal of Cleaner Production*, 183, 729–743. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.070>
- You, Z., & Wu, C. (2019). A framework for data-driven informatization of the construction company. *Advanced Engineering Informatics*, 39, 269–277. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.02.002>
- Zanchetta, C., Borin, P., Cecchini, C., & Xausa, G. (2017). Computational design and classification systems to support predictive checking of performance of building systems. *TECHNE - Journal of Technology for Architecture and Environment*, 13-Theories Practice Design, 329–336. <https://doi.org/10.13128/Techne-19759>

- Zekavat, P. R., Moon, S., & Bernold, L. E. (2014). Securing a Wireless Site Network to Create a BIM-Allied Work-Front. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 11(8), 132. <https://doi.org/10.5772/58441>
- Zhang, C., Beetz, J., & Weise, M. (2015). Interoperable validation for IFC building models using open standards. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 20(2), 24–39.
- Zhang, J., Liu, Q., Hu, Z., Lin, J., & Yu, F. (2017). A multi-server information-sharing environment for cross-party collaboration on a private cloud. *Automation in Construction*, 81, 180–195. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.06.021>
- Zhao, X. (2017). A scientometric review of global BIM research: Analysis and visualization. *Automation in Construction*, 80, 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.04.002>
- Zhong, B., Gan, C., Luo, H., & Xing, X. (2018). Ontology-based framework for building environmental monitoring and compliance checking under BIM environment. *Building and Environment*, 141, 127–142. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.046>

Annexes

Tableau afférent à l'état de l'art 2013-2018

Légende :

AEC subject

| | |
|----|--|
| 1 | Energy Analysis |
| 2 | All disciplines and regular buildings |
| 3 | Structure |
| 4 | Precast Concret Structure |
| 5 | Multi-criteria Performance Assessment |
| 6 | On-site operations - Construction management |
| 7 | Transportation infrastructure |
| 8 | HBIM |
| 9 | Building code & regulation |
| 10 | Complex geometry |
| 11 | Modular Building |

Interoperability Aim Type

| | |
|---|-------------------|
| A | Convert Data |
| B | Retrieve Data |
| C | Re-use Data |
| D | Check Data |
| E | Link Data |
| F | Combine Data |
| G | Combine Platforms |

Solving type

| | |
|---|--------------------|
| 1 | Top-down approach |
| 2 | Bottom-up approach |
| 3 | Integration |

Solving subtype

| | |
|-----|---|
| 1,1 | Data representation |
| 1,2 | IFC/MVD Extension |
| 1,3 | MVD implementation enhancement |
| 2,1 | Data automatic deduction & transformation |
| 2,2 | IFC / MVD validation |
| 2,3 | Conversion enhancement |
| 2,4 | Easy queries and extraction |
| 3,1 | Data Articulation |
| 3,2 | Data Centralization & Connection |
| 3,3 | Workflows Orchestration |
| 3,4 | Semantic Web & Ontologies |

| | | | | AF1 | ANALYTICAL FRAMEWORK 2 | | ANALYTICAL FRAMEWORK 3 | | |
|---|--|---|------|------------|------------------------|---|------------------------|-------------|--|
| Article Title | Author | Journal | Date | AEC Domain | Interoperability Aim | INTEROPERABILITY AIM - Summary | Category | Subcategory | SOLVER - Summary |
| Formulation of systems and information architecture hierarchies for building structures | Solnosky, R., Hill, J. | Journal of Information Technology in Construction | 2013 | 3 | A | How to improve the robustness of a BIM structural file format, in term of domain encapsulation? | 1 | 1,1 | Proposal of a new schema for structural modelling: new classes and system breakdown, to allow a wider granularity. |
| Interoperability for precast concrete building models | Belsky, M., Eastman, C., Sacks, R., (...), Aram, S., Yang, D. | PCI Journal | 2014 | 4 | A | How to make IFC conversion through IDM/MVD more reliable, robust and standardized? | 1 | 1,3 | MVD Formalization: Modularization of model views development via SEM (semantic exchange modules), re-usable in many MVD, across different domains. |
| IFCCompressor: A content-based compression algorithm for optimizing Industry Foundation Classes files | Sun, J., Liu, Y.-S., Gao, G., Han, X.-G. | Automation in Construction | 2015 | 2 | A | How can an IFC file size be reduced to ameliorate big file transfer? | 2 | 2,3 | Proposal of a content-based compression algorithm, which can delete redundant information of an IFC file. |
| Data interoperability assessment though IFC for BIM in structural design—a five-year gap analysis | Muller, M.F., Garbers, A., Esmanioto, F., (...), Loures, E.R., Canciglieri, O. | Journal of Civil Engineering and Management | 2017 | 3 | A | Has the conversion of BIM models to structural models been improved in 5 years? | 2 | 2,3 | Technical interoperability has grown 38% in five years. |
| JavaScript Object Notation (JSON) data serialization for IFC schema in web-based BIM data exchange | Afsari, K., Eastman, C.M., Castro-Lacouture, D. | Automation in Construction | 2017 | 4 | A | How to improve the conversion of IFC file into web format? | 2 | 2,3 | In order to convert IFC into a web format, the JSON data serialization seems to be a good alternative to ifcxml. |

| | | | | | | | | | |
|---|--|---|------|---|---|--|---|-----|---|
| An ontology-based analysis of the industry foundation class schema for building information model exchanges | Venugopal, M., Eastman, C.M., Teizer, J. | Advanced Engineering Informatics | 2015 | 4 | A | How to make IFC conversion through IDM/MVD more reliable, robust and standardized? | 3 | 3,4 | MVD Formalization: Proposal of (1) a new hierarchical structure based on ontological definition of IFC (2) semantic exchange modules, "SEM", as a base for MVD creation. |
| An ontology-based approach for developing data exchange requirements and model views of building information modeling | Lee, Y.-C., Eastman, C.M., Solihin, W. | Advanced Engineering Informatics | 2016 | 4 | A | How to make IFC conversion through IDM/MVD more reliable, robust and standardized? | 3 | 3,4 | MVD Formalization: Proposal of a systemisation of the generation of IDM and MVD using an ontology-based automated knowledge framework. |
| Automatic building information model query generation | Jian, Y., Yu, N., Ming, J., (...), Messner, J.I., Wu, D. | Journal of Information Technology in Construction | 2015 | 1 | B | How to facilitate the process of querying a BIM model? | 2 | 2,4 | Set up of a prototype tool that automates the generation of MVD-based query code on BIM models, and that can be used by a BIM end-user with no programming skills. |
| A fuzzy extension of the semantic Building Information Model | Gómez-Romero, J., Bobillo, F., Ros, M., (...), Ruiz, M.D., Martín-Bautista, M.J. | Automation in Construction | 2015 | 2 | B | Can a informal request be performed on a BIM model? | 2 | 2,4 | Informal queries can be performed on BIM models with the use of fuzzy logic. |
| Knowledge-based data enrichment for HBIM: Exploring high-quality models using the semantic-web | Quattrini, R., Pierdicca, R., Morbidoni, C. | Journal of Cultural Heritage | 2017 | 8 | B | Can semantic web technologies allow the representation and queries of rich HBIM data sets? | 3 | 3,4 | Creation of a semantic-web-technology based workflow to represent and allow queries on HBIM data sets: ontology modeling, data-enrichment, and data-conversion. Formalization of the process via a web prototype application, that allows to visualize and exploit HBIM 3D data and structured meta-data. |
| Generating IFC models from heterogeneous data using semantic web | Karan, E., Irizarry, J., Haymaker, J. | Construction Innovation | 2015 | 2 | B | Can a semantic web query be sent into a BIM model? | 3 | 3,4 | Semantic web query results, performed with SPARQL query language, can be syntactically translated into an IFC through the ifcXML format, and be loaded into a BIM authoring tool. |

| | | | | | | | | | |
|---|---|--|------|----|---|---|---|-----|---|
| Geometry simplification according to semantic constraints: Enabling energy analysis based on building information models | Ladenhauf, D., Berndt, R., Krispel, U., (...), Battisti, K., Gratzl-Michlmair, M. | Computer Science - Research and Development | 2016 | 1 | C | How to automate the transformation of a BIM model to feed an energy analysis? | 2 | 2,1 | Geometry transformation and simplification: deduction from a BIM model of the required spaces and zones to feed an energy analysis. |
| Development of process for interoperability improvement of BIM data for free-form buildings design using the IFC standard | Ryu, J., Lee, J., Choi, J. | International Journal of Software Engineering and its Applications | 2016 | 10 | C | How to add BIM semantic to a 3D geometrical NURBS-based model? | 2 | 2,1 | Use of plugin that transforms 3D CAD geometrical objects into BIM objects mappable in IFC. |
| Improving interoperability between architectural and structural design models: An industry foundation classes-based approach with web-based tools | Hu, Z.-Z., Zhang, X.-Y., Wang, H.-W., Kassem, M. | Automation in Construction | 2016 | 3 | C | How to feed a structural analysis with a BIM IFC data? | 2 | 2,1 | Creation of an IFC web-based tool that transforms and optimizes IFC data to allow it to feed a structural analysis model. |
| Interpreted Information Exchange: Systematic Approach for BIM to Engineering Analysis Information Transformations | Ramaji, I.J., Memari, A.M. | Journal of Computing in Civil Engineering | 2016 | 3 | C | How to transform of a BIM coordination model into a structural model? | 2 | 2,1 | BIM Model transformation automation via IIE methodology (Interpreted Information Exchange): deduction of implicit facts from explicit data. |
| The building information modeling and its use for data transformation in the structural design stage | Liu, Z.-Q., Zhang, F., Zhang, J. | Journal of Applied Science and Engineering | 2016 | 3 | C | How to transform a BIM coordination model into a structural model? | 2 | 2,1 | Creation of a Revit plugin that automates the transformation of a BIM model to feed a structural analysis model. |

| | | | | | | | | | |
|--|---------------------------------------|---|------|---|---|--|---|-----|---|
| Interpretation of structural analytical models from the coordination view in building information models | Ramaji, I.J., Memari, A.M. | Automation in Construction | 2018 | 3 | C | How to transform of a BIM coordination model into a structural model? | 2 | 2,1 | BIM Model transformation automation via IIE methodology (Interpreted Information Exchange): deduction of implicit facts from explicit data. |
| Semantic Enrichment for Building Information Modeling | Belsky, M., Sacks, R., Brilakis, I. | Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering | 2016 | 4 | C | How to enrich the semantic of a given BIM received model? | 2 | 2,1 | Creation of a tool that infers semantic content from explicit and implicit data of a BIM model. |
| Three-dimensional parametric data exchange for curved steel bridges | Karaman, S., Chen, S., Ratnagar, B. | Transportation Research Record | 2013 | 7 | C | How to avoid re-modelling during the process of data exchanges for a bridge project? | 3 | 3,1 | Use of a 3D CAD wireframe geometrical model as a driver base for data exchange on a steel bridge project. |
| Building information modeling (BIM) collaboration from the structural engineering perspective | Shin, T.-S. | International Journal of Steel Structures | 2017 | 3 | C | How to reinforce the use of a structural model in the collaboration process? | 3 | 3,1 | Mapping of typical two-ways possible exchanges between structural model and architectural / construction / fabrication models, using IFC or API methodologies. |
| Interoperable validation for IFC building models using open standards | Zhang, C., Beetz, J., Weise, M. | Journal of Information Technology in Construction | 2015 | 2 | D | How to check an IFC file against a specific MVD? | 2 | 2,2 | Development of an IFC model view checker prototype, on top of bimservers.org (open source), based on MVDxml format and BCF standards for visual report. |
| Validations for ensuring the interoperability of data exchange of a building information model | Lee, Y.-C., Eastman, C.M., Lee, J.-K. | Automation in Construction | 2015 | 2 | D | What is the best MVD/IFC checker? | 2 | 2,2 | The surveyed tools operate in similar ways, via three checking types: IFC schema syntactic check, syntactic & semantic MVD check, content check (against regulation, owner requirement, performances, etc.) |
| Applying novelty detection to identify model element to IFC class misclassifications on architectural and infrastructure Building Information Models | Koo, B., Shin, B. | Journal of Computational Design and Engineering | 2018 | 2 | D | How to detect IFC misclassified elements in a BIM model? | 2 | 2,2 | Creation of a novelty detection learning algorithm: training individual one-class SVM's on multiple BIM model, to detect IFC misclassified elements. |

| | | | | | | | | | |
|---|---|----------------------------|------|---|---|---|---|-----|--|
| Modularized rule-based validation of a BIM model pertaining to model views | Lee, Y.-C., Eastman, C.M., Solihin, W., See, R. | Automation in Construction | 2016 | 4 | D | How to check an IFC file against a specific MVD? | 2 | 2,2 | MVD Formalization: proposal of a robust and modularized MVD validation process. IfcSvr-based application, object-oriented checking method. |
| Logic for ensuring the data exchange integrity of building information models | Lee, Y.-C., Eastman, C.M., Solihin, W | Automation in Construction | 2018 | 4 | D | How to check an IFC file against a specific MVD? | 2 | 2,2 | MVD Formalization: development of rule logic and validation framework to syntactically and semantically check an IFC instance against a specific MVD via a user friendly interface. |
| Development of an object model for automated compliance checking | Malsane, S., Matthews, J., Lockley, S., Love, P.E.D., Greenwood, D. | Automation in Construction | 2015 | 9 | D | How to structure a BIM model in order to check building regulation? | 3 | 3,1 | Development of a building-regulation-specific and semantically rich object model, that allows the implementation of automated building-regulation compliance checking. |
| Computational design and classification systems to support predictive checking of performance of building systems [Computational design e sistemi di classificazione per la verifica predittiva delle prestazioni di sistema degli organismi edilizi] | Zanchetta, C., Borin, P., Cecchini, C., Xausa, G. | TECHNE | 2017 | 5 | D | How to check building performances on the base of a BIM model? | 3 | 3,1 | Use of a standard performance-based classification system as a vector to implement performance checking on a BIM model. Mapping of BIM data with Omniclass via a VPL (Visual Language Programming) |
| Ontology-based framework for building environmental monitoring and compliance checking under BIM environment | Zhong, B., Gan, C., Luo, H., Xing, X. | Building and Environment | 2018 | 1 | D | How to check building environmental performance, within a context of environmental sensor monitoring data and BIM data? | 3 | 3,4 | Set up of an ontology-base framework: development of four ontologies, conversion of bim and sensors data into RDF data model, compliance checking using SPARQL rules. |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|------|----|---|--|---|-----|---|
| BIM-enabled conceptual modelling and representation of building circulation | Lee, J.K., Kim, M.J. | International Journal of Advanced Robotic Systems | 2014 | 2 | E | How to represent pedestrian circulation in a BIM Model? | 1 | 1,1 | Use of BIM space objects, corresponding to a specific IFC class, "IfcSpace", to represent circulations in a BIM model. Transformation of agent-oriented circulation rules to BIM-enable space object-based rules. |
| Extending the current model view definition standards to support multi-storey modular building projects | Ramaji, I.J., Memari, A.M. | Architectural Engineering and Design Management | 2018 | 11 | E | How to embed modular building systems in a BIM model? | 1 | 1,2 | Suggestion of an MVD extension: development of new MVD concepts to describe modular-specific objects that are not addressed by available MVD standards. |
| IFC-based product catalog formalization for software interoperability in the construction management domain | Gökçe, K.U., Gökçe, H.U., Katranuschkov, P. | Journal of Computing in Civil Engineering | 2013 | 2 | E | How to improve the connection between a BIM model and product catalog? | 1 | 1,2 | Proposal of a new product catalog structure complying with IFC schema, and the extension of an IFC concept (IfcConstructionResource) to ensure catalog data representation in BIM models. |
| Expansion of IFC model with structural sensors | Rio, J., Ferreira, B., Poças-Martins, J. | Informes de la Construcción | 2013 | 3 | E | How to embed Structural Health Monitoring systems (SHM) into a BIM model? | 1 | 1,2 | Proposal of an IFC extension with a new group of kinematic sensor classes. |
| IFC Monitor – An IFC schema extension for modeling structural health monitoring systems | Theiler, M., Smarsly, K. | Advanced Engineering Informatics | 2018 | 3 | E | How to embed Structural Health Monitoring systems (SHM) into a BIM model? | 1 | 1,2 | IFC schema extension, and creation of a semantic technology independent metamodel to describe SHM systems. |
| Energy modeling system using building information modeling open standards | Kim, H., Anderson, K. | Journal of Computing in Civil Engineering | 2013 | 1 | E | How to easily and promptly run an Energy Performance Analysis (EPA) on the basis of a BIM model? | 2 | 2,1 | Proposal of a semi-automatic and open-standard-based workflow to feed a simulation engine with a BIM IFC model, via IfcXml and INP translations. |
| BIM interface for full vs. semi-automated building energy simulation | Ahn, K.-U., Kim, Y.-J., Park, C.-S., Kim, I., Lee, K. | Energy and Buildings | 2014 | 1 | E | How to ease the exchanges between a BIM model and an energy simulation tool? | 2 | 2,1 | Development of an IFC-IDF translator, with (1) a fully automatic option (2) semi-automatic option, that allows the end-user to process to a data enrichment process. |

| | | | | | | | | | |
|--|--|---|------|---|---|--|---|-----|--|
| Interoperability from building design to building energy modeling | Guzmán Garcia, E., Zhu, Z. | Journal of Building Engineering | 2015 | 1 | E | How to convert a BIM model into a BEM model? | 2 | 2,1 | Development of an automated XSLT-based converter that facilitate exchanges from the gbXML schema to the DOE-2INP schema. |
| Rapid LEED evaluation performed with BIM based sustainability analysis on a virtual construction project | Alwan, Z., Greenwood, D., Gledson, B. | Construction Innovation | 2015 | 1 | E | Can a design be quickly assessed against LEED performance label on the base of its BIM data? | 2 | 2,1 | LEED performance can be partially assessed on the base of BIM models, via the setup of a flexible data exchange process and semi-automated data analysis. |
| Development of openBIM-based energy analysis software to improve the interoperability of energy performance assessment | Choi, J., Shin, J., Kim, M., Kim, I. | Automation in Construction | 2016 | 1 | E | How to connect a BIM model to an Energy Performance Assessment (EPA) tool? | 2 | 2,1 | Development of a BIM-based EPA software using (1) a materials library (2) an EPA support system to connect BIM model to energy modeling. |
| A standardized approach to BIM and energy simulation connection | El Asmi, E., Robert, S., Haas, B., Zreik, K. | International Journal of Design Sciences and Technology | 2015 | 1 | E | How to connect a BIM model and an energy simulation tool? | 3 | 3,1 | Conclusion that buildingSmart open-BIM IFD, MVD, IDM are efficient components to set up a BIM-to-energy-simulation case study. However, AEC still misses tools to allow dynamic interoperability and backward integration. |
| Developing a physical BIM library for building thermal energy simulation | Kim, J.B., Jeong, W., Clayton, M.J., Haberl, J.S., Yan, W. | Automation in Construction | 2015 | 1 | E | How to connect a BEM model to a BIM model? | 3 | 3,1 | Development of a Modelica library that can represent object semantics, and facilitate semi-automatic translations from BIM models to Modelica BEM models using a BIM authoring tool's API. |
| PassivBIM: Enhancing interoperability between BIM and low energy design software | Cemesova, A., Hopfe, C.J., McLeod, R.S. | Automation in Construction | 2015 | 1 | E | How to connect a Building Performance Simulation tool (BPS) and a BIM model? | 3 | 3,1 | Extension of the IFC schema with energy concepts, and creation of a tool, "PassivBim", to allow exchanges between a BPS tool (PHPP) and IFC files. |
| An integrated BIM-based framework for minimizing embodied energy during building design | Shadram, F., Johansson, T.D., Lu, W., Schade, J., Olofsson, T. | Energy and Buildings | 2016 | 1 | E | How to base an embodied energy assesment on a BIM model? | 3 | 3,1 | Use of the Extract Transform Load (ETL) technology/frameworks to map and connect data between the Environmental Product Declarations (EPD) repository and the BIM model. |

| | | | | | | | | | |
|--|--|---|------|---|---|--|---|-----|--|
| Building sustainability assessment framework based on building information modelling | Raffee, S.M., Karim, M.S.A., Hassan, Z. | ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences | 2016 | 1 | E | How to assign a Green Building Index (GBI) score to a building on the basis of its BIM model? | 3 | 3,1 | Development of a software prototype, that transforms BIM data to calculate a sustainability rating score. Creation of a report to facilitate decision making. |
| An integrated BIM-based framework for the optimization of the trade-off between embodied and operational energy | Shadram, F., Mukkavaara, J. | Energy and Buildings | 2018 | 1 | E | How to base a multi-objective energy performance analysis on a BIM Model? | 3 | 3,1 | Creation of a framework that bilaterally connects a multi-criteria optimization module to a BIM model, using programming tools. The result of the optimization can be re-imported back into the BIM input model. |
| Building-information-modeling enabled life cycle assessment, a case study on carbon footprint accounting for a residential building in China | Yang, X., Hu, M., Wu, J., Zhao, B. | Journal of Cleaner Production | 2018 | 1 | E | How to base an life-cycle assessment (LCA) process on BIM data? | 3 | 3,1 | Proposal of a framework combining BIM tools (geometric, components and material data), energy simulation tools (including weather data, embodied and operational energy consumption tools) and LCA tools. |
| Design framework for variable refrigerant flow systems with enhancement of interoperability between BIM and energy simulation | Choi, M., Cho, S., Lim, J., (...), Li, Z., Kim, J.J. | Journal of Mechanical Science and Technology | 2018 | 1 | E | How to estimate the cooling and heating energy of a building at the design stage on the base of a BIM model? | 3 | 3,1 | Creation of a plugin based on a BIM commercial tool's API. Automatic conversion of BIM data and VRF systems, from the BIM tool into an energy simulation engine. |
| Suggestion of the core element technology to improve BIM data interoperability based on the energy performance analysis | Choi, J., Lee, J., Cho, J. | International Journal of Grid and Distributed Computing | 2018 | 1 | E | How to base an energy performance analysis (EPA) on a BIM model? | 3 | 3,1 | Creation of a framework that facilitates (1) EPA and (2) BIM material inputting. Creation of open-BIM-based requirement framework, an integrated material library and an IFC to IDF converter. |

| | | | | | | | | | |
|--|---|-------------------------------|------|---|---|---|---|-----|---|
| Developing an IFC-Based Database for Construction Quality Evaluation | Xu, Z., Huang, T., Li, B., Li, H., Li, Q. | Advances in Civil Engineering | 2018 | 6 | E | How to base a construction quality evaluation on BIM data? | 3 | 3,1 | BIM can be used as a base for construction quality compliance assessment. Creation of an IFC-based evaluation framework and tools: design of an IFC-based construction quality database, and data mapping between BIM and quality assessment databases. |
| From the generation of layouts to the production of construction documents: An application in the customization of apartment plans | Veloso, P., Celani, G., Scheeren, R. | Automation in Construction | 2018 | 2 | E | How to link a design algorithmic generation and BIM detailed production process? | 3 | 3,1 | Automation of the transformation of 3D-CAD models into BIM models, using a VPL (visual programming language) plugin. |
| Delivering value for money with BIM-embedded housing refurbishment | Kim, K.P., Park, K.S. | Facilities | 2018 | 5 | E | Can a life-cycle cost (LCC) be calculated on the basis of a BIM model? | 3 | 3,1 | Test of a framework articulating IFC and gbXML data, using two BIM simulation tools. Highlights the lack of BIM data interoperability, lack of BIM component standardization, and broken feedback loop between IFC and gbXML data. |
| A BIM based tool for assessing embodied energy for buildings | Nizam, R.S., Zhang, C., Tian, L. | Energy and Buildings | 2018 | 1 | E | How to base an embodied energy assessment on a BIM model during the design development? | 3 | 3,2 | Creation of a a prototype tool that (1) collects and maps design and construction data in a BIM model, and connect it with an LCA database (2) calculates an embodied energy assessment on top of this articulated set of data. |
| Interoperability specification development for integrated BIM use in performance based design | Arayici, Y., Fernando, T., Munoz, V., Bassanino, M. | Automation in Construction | 2018 | 1 | E | How to connect a performance-based design process to an integrated BIM use? | 3 | 3,3 | Prescription of (1) interoperability specification and (2) cross-organizational workflow and human processes based on IDM buildingSmart recommendations. |
| Connecting building component catalogues with BIM models using semantic technologies: An application for precast concrete components | Costa, G., Madrazo, L. | Automation in Construction | 2015 | 4 | E | How to make the connection between a BIM model and a component catalogue more robust? | 3 | 3,4 | Use of semantic web technologies to develop a product component catalogue accessible through a BIM authoring tool. Highlights a strong need for component parametricity in AEC. |

| | | | | | | | | | |
|--|--|---|------|---|---|--|---|-----|--|
| Generative HBIM modelling to embody complexity (LOD, LOG, LOA, LOI): surveying, preservation, site intervention—the Basilica di Collemaggio (L'Aquila) | Brumana, R., Della Torre, S., Previtali, M., (...), Oreni, D., Banfi, F. | Applied Geomatics | 2018 | 8 | F | How to combine mixed granularity level HBIM rich data? | 3 | 3,1 | Proposal of a complex mixed-LOD approach framework: navigation between various granularity levels networks (LOD, LOI, LOA, LOG and GOG) and use of NURBS-based parametric modelling as a matching tool and interoperability vector between these levels. |
| A framework for dimensional and surface quality assessment of precast concrete elements using BIM and 3D laser scanning | Kim, M.-K., Cheng, J.C.P., Sohn, H., Chang, C.-C. | Automation in Construction | 2015 | 4 | F | How to combine BIM data and laser scanning data to feed a quality surface assessment for concrete precast structure? | 3 | 3,1 | Development of an IFC based workflow, including an inspection (1) check-list (2) procedure (3) data storage and (4) delivery method. Information exchanged between the BIM model and the 3D scanner are in IFC format. |
| Bim to bem interoperability using web based process model | Kim, Y.-J. | International Journal of Applied Engineering Research | 2015 | 1 | F | How to combine BIM data and BIM data? | 3 | 3,2 | Creation of a process driven energy simulation interface. Integration of a business process model with a dynamic building energy simulation tool in a web environment. |
| Supply-chain transparency within industrialized construction projects | Čuš-Babič, N., Rebolj, D., Nekrep-Perc, M., Podbreznik, P. | Computers in Industry | 2014 | 6 | F | How to combine CAD and ERP data in a BIM model to feed a construction supply-chain management (SCM) system? | 3 | 3,2 | Proposal of a theoretical model to automate, within a BIM model, the mapping of 3 distinct various granularity data sets : CAD data (design and pre-fabrication) and ERP data (on-site construction), |
| Opportunities for enhanced lean construction management using Internet of Things standards | Dave, B., Kubler, S., Främling, K., Koskela, L. | Automation in Construction | 2016 | 6 | F | How to combine heterogeneous construction data sources to set up a lean construction management process? | 3 | 3,2 | The Internet of Thing (IoT) and its related standards (O-MI/O-DF) are promising components to set up lean processes in AEC. Their generic interfaces allow the exchange of any type of information. |

| | | | | | | | | | |
|---|---|--|------|---|---|--|---|-----|---|
| Information Modeling for Virtual and Augmented Reality | Patti, E., Mollame, A., Erba, D., (...), Macii, E., Acquaviva, A. | IT Professional | 2017 | 6 | F | How to enable exchanges between smart-building devices and BIM data-bases to feed VR and AR applications? | 3 | 3,2 | Development of a multi-layer architecture software that combines BIM data and heterogeneous real-time information collected by smart devices. |
| An IFC interoperability framework for self-inspection process in buildings | Hernández, J.L., Leronés, P.M., Bonsma, P., (...), Deighton, R., Braun, J.-D. | Buildings | 2018 | 6 | F | How to combine data from different sources to feed the building self-inspection process? | 3 | 3,2 | Development of a multi-layer architecture and IFC compliant tool that merges data coming from different sources (BIM, sensors, thermography, etc.) to allow end-users to access it for self-inspection. |
| Application of cloud storage on BIM life-cycle management | Ding, L., Xu, X. | International Journal of Advanced Robotic Systems | 2014 | 2 | F | How to combine multiple BIM files? | 3 | 3,2 | Creation of a BIM collaborative platform, mostly based on data storage: user access rights and BIM document management. Some collaborative features are suggested, more on the project level rather than on BIM data. |
| Study on building lifecycle information management platform based on BIM | Qing, L., Tao, G., Ping, W.J. | Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology | 2014 | 2 | F | How to combine BIM data and online collaboration? | 3 | 3,2 | Creation of a BIM collaborative platform, with two main functions: design work management (collaborative workspace for BIM data, by discipline) and project work management (costs, procurement, workflows, etc). |
| Social BIMCloud: a distributed cloud-based BIM platform for object-based lifecycle information exchange | Das, M., Cheng, J.C., Kumar, S.S. | Visualisation in Engineering | 2015 | 2 | F | How to combine project BIM data and project social interaction data? | 3 | 3,2 | Set up of an integrated nD BIM platform, that captures and manages formal and informal interactions. Facilitation of object-based partial information exchanges, dynamic merging and splitting of models. Data partitioning, data replication strategies, multi-node structure. |
| Virtual Retrofit Model for aging commercial buildings in a smart grid environment | Woo, J.-H., Menassa, C. | Energy and Buildings | 2014 | 5 | F | How to combine data from Bim, energy simulation, agent-based modeling, multi-criteria decision support system to feed a retrofit simulation? | 3 | 3,2 | Proposal of a prototype software based on an xml-parsing engine, that collect and confronts: BIM data, environmental data and sensors data. |
| A conceptual framework to support solar PV simulation using an open-BIM data exchange standard | Gupta, A., Cemesova, A., Hopfe, C.J., Rezgui, Y., Sweet, T. | Automation in Construction | 2014 | 1 | F | How to combine IFC data and heterogeneous energy related data? | 3 | 3,3 | Creation of a conceptual multi-model framework based on a central IFC model, to which simulation models and other information repositories are linked. |

| | | | | | | | | | |
|--|---|--|------|---|---|--|---|-----|---|
| Information Model Purposes in Building and Facility Design | Hartmann, T., Amor, R., East, E.W. | Journal of Computing in Civil Engineering | 2017 | 7 | F | What are the conceptual locks that impede BIM data combining? | 3 | 3,3 | Presentation of three conflicting BIM quality indicators - semantic representation, conceptual completeness, and ease of implementation - that hinders BIM interoperability. |
| Construction collaborative networks: the case study of a building information modelling-based office building project | Grilo, A., Zutshi, A., Jardim-Goncalves, R., Steiger-Garcao, A. | International Journal of Computer Integrated Manufacturing | 2013 | 2 | F | What is the business context that allow an efficient BIM-based collaboration? | 3 | 3,3 | Development of a business interoperability quotient model measurement (BIQMM), to evaluate on a organizational level the overall collaborative potential of a BIM-based project. |
| The Extensible Orchestration Framework approach to collaborative design in architectural, urban and construction engineering | Perisic, A., Lazic, M., Perisic, B. | Automation in Construction | 2016 | 2 | F | How to combine data from Urban Planning (UP), Architectural Design (AD) and Construction Engineering (CE)? | 3 | 3,3 | Set up of a flexible and distributed framework integrating multiple domain-specific languages (DSL): articulation of different models and softwares via extensibility features and orchestration mechanisms. |
| Multimodels — Instant nD-modeling using original data | Fuchs, S., Scherer, R.J. | Automation in Construction | 2017 | 2 | F | How to combine AEC cross-domain information? | 3 | 3,3 | Development of a linked-data framework, that homogenizes data access rather than format. Creation of consistent links between various original domain-specific models, accessible via a generic multimodel. |
| Implementation of an interoperable process to optimise design and construction phases of a residential building: A BIM Pilot Project | Ciribini, A.L.C., Mastrolembo Ventura, S., Paneroni, M. | Automation in Construction | 2016 | 5 | F | How to combine data to optimize design and construction phase? | 3 | 3,3 | Set up of an interoperable IFC-based framework to allow semi-automatic model checking against codes and regulation, a smooth BIM coordination process and 4D BIM simulation. |
| Multidisciplinary Design Optimization through process integration in the AEC industry: Strategies and challenges | Díaz, H., Alarcón, L.F., Mourgues, C., García, S. | Automation in Construction | 2017 | 5 | F | Can some BIM authoring tools be integrated to Process Integrator Design Optimization (PIDO) platforms? | 3 | 3,3 | Survey of five BIM authoring tools, and demonstration that they cannot all be integrated to a PIDO. Such integration would require an improvement of their component interoperability, automation and model parameterization. |

| | | | | | | | | | |
|---|--|---|------|---|---|--|---|-----|--|
| Clustering and ontology-based information integration framework for surface subsidence risk mitigation in underground tunnels | Du, J., He, R., Sugumaran, V. | Cluster Computing | 2016 | 7 | F | How to combine data from different sources to analyze surface risk subsidence? | 3 | 3,4 | Use of a (1) clustering method to analyze surface subsidence risk factors and (2) an IFC ontology-based framework as a basis for (3) an inference process with a reasoning engine. |
| A shared ontology approach to semantic representation of BIM data | Niknam, M., Karshenas, S. | Automation in Construction | 2017 | 2 | F | How to align the various AEC domain-specific ontologies? | 3 | 3,4 | Creation of BIM Shared Ontology (BIMSO) to represent the common concepts shared by different AEC domains. The BIMSO acts as a semantic mediator to align the various domain-specific ontologies. |
| Construction cost and energy performance of single family houses: From integrated design to automated optimization | Chardon, S., Brangeon, B., Bozonnet, E., Inard, C. | Automation in Construction | 2016 | 5 | F | How to combine BIM data with cost and energy data to optimize the cost and energy performance of a building? | 3 | 3,4 | Coupling of energy and cost assessment tools via an ontology-based and rule-inferring automated framework. |
| Securing a wireless site network to create a BIM-allied work-front | Zekavat, P.R., Moon, S., Bernold, L.E. | International Journal of Advanced Robotic Systems | 2014 | 6 | G | How to use BIM data on construction site when internet connection is limited? | 3 | 3,2 | Creation of a construction-site secure network, to ensure a continuous Wi-Fi quality despite work-front related interferences, in order to allow seamless information sharing between BIM data and live construction data (GPS, sensors, 3D scans, etc.) |
| A multi-server information-sharing environment for cross-party collaboration on a private cloud | Zhang, J., Liu, Q., Hu, Z., Lin, J., Yu, F. | Automation in Construction | 2017 | 7 | G | How to combine several private clouds in the context of a BIM-based project collaboration? | 3 | 3,2 | Proposal of a multi-server approach on a private cloud, to control data ownership and privacy within a BIM collaborative environment, in order to prevent data retention and promote data sharing. |
| Coordinating multi-site construction projects using federated clouds | Petri, I., Beach, T., Rana, O.F., Rezgui, Y. | Automation in Construction | 2017 | 7 | G | How to combine several private clouds in the context of a BIM-based project collaboration? | 3 | 3,2 | Presentation of a cloud federated framework: a distributed collaborative environment where each team maintains its own data without having to migrate it to a central site. Use of CometCloud open-source solution. |

| | | | | | | | | | |
|--|--------------------------------------|--|------|---|---|---|---|-----|---|
| Building information modeling data interoperability for cloud-based collaboration: Limitations and opportunities | Afsari, K., Eastman, C., Shelden, D. | International Journal of Architectural Computing | 2017 | 2 | G | How to combine multiple BIM cloud-based collaboration tools together? | 3 | 3,2 | Highlights some key neutral network components that would allow interoperability between BIM platforms: cloud APIs, data transfer protocols, data formats and standardizations. |
| Cloud-Marketplaces: Distributed e-procurement for the AEC sector | Grilo, A., Jardim-Goncalves, R. | Advanced Engineering Informatics | 2013 | 2 | G | How to combine BIM, SOA, Cloud Computing and e-marketplaces to allow AEC business interoperability? | 3 | 3,3 | Development of a new approach that enables interoperability not only inside a cloud-computing cluster, but also through different clusters. |



Léa SATTLER

**Amélioration de l'interopérabilité BIM
via un cadre de co-modélisation
par requêtes et enrichissements
itératifs de données**



Résumé : Le manque d'interopérabilité dans le BIM (Building Information Modeling) est reconnu par la communauté scientifique et par les acteurs de l'AEC (Architecture, Engineering and Construction), et impacte la collaboration digitale : sur le terrain, les échanges de données liées au BIM ne sont ni normés ni automatisés et conduisent à des ressaisies et pertes de données lors des itérations, entravant les flux de données et de travail. La présente thèse vise à investiguer cette double question, impliquant des considérations techniques (interopérabilité technologique : compatibilité entre modèles de données, formats) et organisationnelles (interopérabilité métier : modèles d'affaires, coopération humaine) au sein d'une industrie fragmentée et peu numérisée. Un triple état de l'art – à travers des allers-retours entre une période récente (2013-2018), vintage (1990-2000), et brûlante (2019-2021) – révèle que ces deux pendents ne sont que trop rarement traités conjointement dans la littérature scientifique. Un levier à la fois technique et organisationnel est donc proposé afin d'améliorer l'interopérabilité BIM : un cadre collaboratif basé sur des cycles itératifs de requêtes et d'enrichissements collectifs de données. Ce cadre, qui vise à instaurer des processus de co-modélisation BIM multi-métier, est appuyé par un prototype logiciel, Treegram, permettant de fédérer et de transcrire des données BIM hétérogènes dans une base de données neutre, que les utilisateurs peuvent interroger et enrichir. Les requêtes constituant l'atome des échanges de données, la collaboration BIM s'organise autour de cycles de requêtes/vérifications/enrichissements de données. L'utilisation de Treegram sur un projet réel montre que le cadre proposé, s'il fonctionne d'un point de vue technique et améliore les flux de données, interroge les limites des modes traditionnels de production de projet dans l'AEC et soulève la question des modèles d'affaires susceptibles d'accueillir les logiques intégratives de l'ingénierie concurrente et des technologies de l'industrie 4.0.

Mots-clés : Building Information Modeling (BIM), Interopérabilité, Collaboration, Co-modélisation, Requêtes

Abstract: The lack of interoperability in building information modeling (BIM) is acknowledged by the scientific community and by architecture, engineering and construction (AEC) actors and impacts digital collaboration. In the field, BIM data exchanges are neither standardized nor automated and lead to data re-entry and loss during iterations, hindering data flows and workflows. This thesis aims at investigating this double issue, involving technical (technological interoperability: compatibility between data models, formats) and organizational (business interoperability: business models, human cooperation) considerations in the context of a fragmented and low-digitalized industry. A three-pronged state of the art – through comparisons between recent (2013-2018), vintage (1990-2000), and proximate (2019-2021) periods – reveals that these two realms are but seldom considered together in the scientific literature. A technical as well as organizational device is therefore proposed to improve BIM interoperability: a collaborative framework, based on iterative cycles of collective data queries and enrichment. This framework aims at establishing interprofessional BIM co-modeling processes and is supported by a software prototype, Treegram, allowing to federate and transcribe heterogeneous BIM data into a neutral database, which users can query and enrich. As queries are the core of data exchange, BIM collaboration is organized around data query/verifications/enrichment cycles. The use of Treegram on an actual project shows that while the proposed framework works from a technical point of view and improves data flows, it nevertheless questions the limits of the traditional modes of project production in AEC and raises the question of the business models likely to accommodate the integrative rationales of concurrent engineering and industry 4.0 technologies.

Key words: Building Information Modeling (BIM), Interoperability, Collaboration, Co-modeling, Queries