

Exploitation du BIM pour la modélisation Chronographique de la planification et la simulation 4D

par

Thibault MAZARS

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M. SC. A.

MONTREAL, LE 17 NOVEMBRE 2017

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Thibault Mazars et Adel Francis 2017



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Adel Francis, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Daniel Boyd, codirecteur de mémoire
Groupe WSP

M. Edmond Miresco, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Conrad Botton, professeur
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Tia-Olivia Rajohnson, examinatrice externe
Groupe AECON QUÉBEC LTEE

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 26 OCTOBRE 2017

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Premièrement, je tiens à remercier mon directeur de recherche, Mr Adel Francis pour m'avoir donné l'opportunité de travailler dans d'excellentes conditions au sein du laboratoire MGPlan ainsi que pour ses conseils et son expertise qui m'ont guidé durant ces deux années de recherches.

Je tiens ensuite à remercier Mr Fabian Ardila, Mr Stéphane Morin Pépin et tous les membres du laboratoire MGPlan pour leur partage d'expérience et leur bienveillance.

Je tiens aussi à remercier tout particulièrement mes parents Fabienne et Patrice pour leur soutien durant toutes mes études. Je ne sais comment exprimer l'immense gratitude que j'ai à votre égard ni ô combien je suis heureux d'être votre fils.

Je tiens enfin à remercier Mélissa, Julien, Alexis, Paul-Alexandre ainsi que tous mes amis pour leur soutien et leurs encouragements durant ces deux années. Merci d'avoir contribué à rendre cette expérience si enrichissante.

EXPLOITATION DU BIM POUR LA MODÉLISATION CHRONOGRAPHIQUE DE LA PLANIFICATION ET LA SIMULATION 4D

Thibault MAZARS

RÉSUMÉ

La planification des projets de construction est une fonction managériale des plus importantes car elle influe directement sur le succès de la réalisation des travaux. Ces dernières années, différentes études ont été menées et divers outils ont été créés pour exploiter les possibilités de combiner le Building Information Modeling (BIM) et les méthodes traditionnelles de planification afin d'assister à la réalisation des calendriers de construction. Cependant, ces outils et méthodes sont principalement destinés à aborder les perspectives de conception des ouvrages. Leur utilisation pour la planification des travaux en phase de construction nécessite alors d'importants efforts pour remanier, d'une part les maquettes numériques BIM et d'autre part les échéanciers, notamment pour caractériser le caractère spatial des projets.

La méthode Chronographique développée au sein du laboratoire MGPlan offre une modélisation de la planification des projets de construction adaptée aux différentes contraintes d'exécution des travaux. L'objectif de la présente recherche est donc de créer une stratégie de communication entre les maquettes numériques BIM, la méthode Chronographique et les outils de simulation 4D afin de réaliser plus efficacement la planification de la réalisation des travaux et le montage des modèles 4D.

Afin de répondre à cette problématique, des études approfondies des mécanismes de la méthode Chronographique, des outils BIM de modélisation et de la simulation 4D ont été menées. Sur la base de ces observations, une stratégie de communication entre ces différents éléments a été conçue et des outils ont été mis en place pour l'assister. Une étude de cas d'un projet fictif a été réalisée pour éprouver cette stratégie.

Mots-clés : Méthode Chronographique, BIM, BIM 4D, simulation 4D, Planification des travaux.

BIM EXPLOITATION FOR THE CHRONOGRAPHICAL SCHEDULING AND 4D SIMULATION

Thibault MAZARS

ABSTRACT

The scheduling of construction projects is one of the most important management functions as it directly influences the success of the work execution. Recently, different studies have been led and many tools have been created to combine Building Information Modeling (BIM) and traditional scheduling methods, in order to assist the realisation of construction timetables. However, these tools and methods are mainly intended to the design perspectives. When used to apprehend the scheduling of works in construction phases, they then require important efforts to revise the BIM model on the one hand, and the schedule on the other. Particularly, to characterize the spatial nature of the projects.

The Chronographical method developed within the MGPlan research laboratory offers a construction schedule modelling adapted to various work execution constraints. The goal of this research is therefore to create a communication strategy between the BIM models, the Chronographical method and the 4D simulation tools, in order to realize more effectively the scheduling as well as to simplify the creation of 4D BIM models.

In order to answer this problem, in-depth studies of the mechanisms of the Chronological method, the BIM modeling tools and the 4D simulation were led. On the basis of these studies, a communication strategy between those different components has been conceived. Tools have also been set up to support it. A study case of a hypothetical project has been conducted in order to test this strategy.

Keywords: Chronographical method, BIM, 4D BIM, 4D simulation, construction works scheduling.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	7
1.1 La planification des projets de construction	7
1.1.1 Rôle de la planification	8
1.1.2 Niveau de détail de la planification	9
1.1.3 Différents formats de la planification	10
1.1.4 Représentations graphiques des échéanciers de construction	11
1.1.4.1 ADM « Arrow Diagram Method »	13
1.1.4.2 PDM « Precedence Diagram Method »	13
1.1.5 Limite des méthodes du chemin critique	15
1.1.6 Les réseaux temporels	16
1.1.7 Évolution de la logique de planification :	20
1.1.8 La méthode Chronographique	22
1.1.9 Analyse et discussion	25
1.2 La gestion des espaces	25
1.2.1 Enjeux et problématiques de la gestion des espaces sur les chantiers de construction	26
1.2.2 Définition des espaces	27
1.2.2.1 Définition en fonction de l'état d'occupation	27
1.2.2.2 Définition en fonction du type d'utilisation de l'espace	28
1.2.2.3 Définition en fonction des besoins des intervenants	30
1.2.3 Évolution des espaces au cours du temps	31
1.2.3.1 Différentes possibilités d'occupation de l'espace pour une même activité	31
1.2.3.2 Évolution physique des espaces au cours du temps	33
1.2.4 Détection des conflits spatio-temporels	35
1.2.5 Résolution des conflits	37
1.2.6 Analyse et discussion	37
1.3 Le BIM (Building Information Modeling)	38
1.3.1 La modélisation des informations du bâtiment	41
1.3.1.1 Présentation	41
1.3.1.2 Modélisation paramétrique	41
1.3.1.3 Interopérabilité	42
1.3.1.4 L'utilisation du BIM à différentes étapes du projet	43
1.3.1.5 La détection de conflit entre les maquettes numériques	44
1.3.1.6 Analyse et discussion	45
1.3.2 Le BIM 4D	46
1.3.2.1 L'utilisation du BIM pour la planification	46
1.3.2.2 La simulation 4D	46
1.3.2.3 Évolution du processus de simulation 4D	47

	1.3.2.4	Avantages de la simulation 4D	50
	1.3.2.5	Contraintes et déroulement du processus de simulation 4D	52
	1.3.2.6	Exemples d'application de la simulation 4D	53
	1.3.2.7	Analyse et discussion	55
1.4		Le Lean Construction et le Last Planner System	55
	1.4.1	Le Lean Manufacturing	55
	1.4.2	Le Lean Construction	56
	1.4.3	Le Last Planner System	56
	1.4.4	Analyse et discussion	58
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE			59
2.1		Motivations	59
2.2		Vue d'ensemble de la méthodologie	61
	2.2.1	Analyse des travaux antérieurs	62
	2.2.2	Analyse de la méthode Chronographique	62
	2.2.3	Analyse expérimentale	63
	2.2.3.1	Objectifs de l'analyse expérimentale :	63
	2.2.3.2	Déroulement de la recherche :	63
	2.2.4	Développement de la stratégie de communication	64
	2.2.4.1	Objectifs :	65
	2.2.4.2	Déroulement de la recherche	65
	2.2.5	Étude de cas	66
	2.2.5.1	Objectifs de l'étude de cas	66
	2.2.5.2	Déroulement de l'étude de cas	67
CHAPITRE 3 LA MÉTHODE CHRONOGRAPHIQUE			69
3.1		Objectifs de l'approche de planification Chronographique	69
3.2		Définition des éléments du concept	69
	3.2.1	Données d'entrées	70
	3.2.1.1	Les Activités	70
	3.2.1.2	Les matériaux	70
	3.2.1.3	Les zones	71
	3.2.1.4	Les ressources	73
	3.2.1.5	Les sous-traitants et les fournisseurs	74
	3.2.1.6	Les équipements	74
3.3		Définition des liens logiques entre les éléments	74
	3.3.1	Liens au niveau de la productivité	75
	3.3.2	Lien au niveau de la coordination	76
	3.3.2.1	Coordination au niveau des zones	76
	3.3.2.2	Coordination au niveau de la sous-traitance	76
	3.3.2.3	Coordination au niveau des approvisionnements	76
	3.3.3	Lien au niveau de l'échéancier :	77
3.4		Approches de modélisation Chronographique de la planification	77
	3.4.1	Représentations graphiques de la planification	78
	3.4.2	Illustrations des avantages de la méthode Chronographique	79

3.5	Le protocole graphique de la méthode Chronographique.....	83
3.6	La méthode Chronographique : un concept en évolution.....	84
3.7	Discussions	85
CHAPITRE 4 ANALYSE EXPÉRIMENTALE.....		87
4.1	Objectifs de l'analyse expérimentale.....	87
4.2	Réalisation du modèle expérimental.....	88
4.3	Outils utilisés pour la modélisation et la simulation 4D.....	88
4.3.1	La modélisation 3D.....	89
4.3.2	Structure des informations de la maquette numérique.....	90
4.3.2.1	Hiérarchie des familles Revit.....	90
4.3.2.2	Les différents types de familles	92
4.3.2.3	Les différents types de paramètres.....	93
4.4	Création de paramètres et ajout d'informations au modèle	95
4.4.1	Informations manipulées lors de l'étude expérimentale	95
4.4.2	Création de nouveaux paramètres.....	96
4.4.3	Renseignement des informations manquantes pour la méthode Chronographique.....	98
4.5	La simulation 4D.....	100
4.5.1	Fonctionnement de l'outil de simulation 4D	100
4.5.2	Spécifications sur les échéanciers dans Navisworks	101
4.5.3	Spécifications sur les modèles 3D	102
4.5.4	Processus de modélisation 4D	104
4.5.4.1	Élaboration de l'échéancier.....	104
4.5.4.2	Liens entre les activités et les éléments du modèle.....	104
4.5.4.3	Spécifications sur le montage des modèles 4D.....	105
4.6	Échange d'information - Outils d'export/import des nomenclatures	105
4.6.1	Outil de nomenclatures Revit.....	106
4.6.2	Outil de quantitatifs Navisworks	107
4.6.3	Les add-in Revit.....	107
4.6.3.1	L'add-in « Export/Import Excel » de BIM One.....	107
4.6.3.2	L'add-in ScheduleSync Pro	108
4.6.3.3	L'add-in « AutoExcel » de Avatar BIM	108
4.6.4	L'interface de programmation de Revit.....	109
4.6.5	Création d'un script Dynamo.....	110
4.7	Résultats de l'analyse expérimentale.....	111
4.7.1	Système retenu pour l'échange d'informations	111
4.8	Contraintes et problèmes relevés	113
4.8.1	Concernant la modélisation 3D et l'apport d'informations	113
4.8.2	Contraintes concernant la simulation 4D.....	115
4.9	Analyse du processus d'exploitation des maquettes numériques BIM pour la planification Chronographique et la simulation 4D.....	116
4.10	Discussions	118

CHAPITRE 5	DÉVELOPPEMENT DE LA STRATÉGIE DE COMMUNICATION	121
5.1	Présentation de la stratégie.....	121
5.1.1	L'aspect technologique.....	121
5.1.2	Informations manipulées.....	122
5.1.3	Parties prenantes.....	123
5.1.4	Présentation générale du processus.....	125
5.2	Préparation de la maquette numérique.....	128
5.2.1	Problématiques rencontrées.....	128
5.2.2	Création d'un gabarit Revit, adapté à la planification Chronographique	129
5.2.2.1	Présentation des Gabarits Revit.....	129
5.2.2.2	Gabarit dédié à la planification Chronographique.....	131
5.2.3	Création d'outils pour faciliter la création des paramètres.....	133
5.2.4	Les bibliothèques d'éléments.....	134
5.2.5	Le cas particulier des familles multicouches.....	134
5.2.6	Saisie des informations.....	135
5.2.7	Processus détaillé de préparation de la maquette numérique.....	135
5.2.8	Discussions sur la préparation de la simulation 4D.....	137
5.3	Export/Import des informations du projet.....	139
5.3.1	Présentation de la logique pour réaliser l'export import d'information avec Dynamo.....	139
5.3.2	Contraintes à prendre en compte pour réaliser les scripts.....	141
5.3.3	Développement des scripts d'export et d'import d'information.....	144
5.3.3.1	Méthodologie de développement des scripts.....	145
5.3.3.2	Création de nœuds personnalisés.....	146
5.3.3.3	Création des scripts d'export et d'import des informations du projet.....	150
5.3.4	Structure de la base de données.....	152
5.3.5	Processus détaillé de l'export-import d'information entre Revit et Excel.....	152
5.3.6	Discussion sur l'export-import des informations avec Dynamo.....	154
5.4	Planification Chronographique.....	155
5.4.1	Présentation des fonctionnalités de l'application.....	156
5.4.2	Problématiques et limitations.....	159
5.4.3	Méthodologie suivie pour la création du lien.....	161
5.4.4	Présentation de la solution développée.....	162
5.4.5	Remontée d'informations vers Revit.....	163
5.4.6	Processus détaillé de planification avec la méthode Chronographique..	164
5.4.7	Discussion.....	165
5.5	Simulation 4D.....	166
5.5.1	Lier automatiquement les activités aux éléments du modèle.....	167
5.5.2	Processus détaillé.....	168
5.5.3	Discussion autour de la partie simulation 4D.....	169
5.6	Discussion autour de la stratégie.....	170

CHAPITRE 6	ÉTUDE DE CAS	173
6.1	Objectifs de l'étude de cas	173
6.2	Présentation du projet d'étude de cas.....	173
6.2.1	Hypothèses et limitations de l'étude de cas	174
6.2.2	Contenu du modèle	175
6.3	Application de la stratégie de communication développée.....	176
6.3.1	Étape 1 : Préparation de la maquette numérique	177
6.3.2	Étape 2 : Extraction des informations	178
6.3.3	Étape 3 : Planification Chronographique.....	178
6.3.4	Étape 4 : Remontée d'information vers la maquette numérique.....	185
6.3.5	Étape 5 : Création du modèle 4D.....	186
6.4	Visualisation des intervenants au sein des espaces dans la simulation 4D.....	188
6.4.1	Observations	193
CONCLUSION.....		195
RECOMMANDATIONS		199
ANNEXE I	SCRIPT DE CRÉATION DES PARAMÈTRES DE TYPE	203
ANNEXE II	PARAMÈTRES MANIPULÉS POUR LA STRATÉGIE DE COMMUNICATION.....	205
ANNEXE III	NŒUD D'ÉCRITURE DANS UN PARAMÈTRE INDÉPENDAMMENT DE L'OBJET.....	207
ANNEXE IV	MISE EN FORME SORTIE NŒUD NIVEAU	211
ANNEXE V	MISE EN FORME SORTIE NŒUD FAMILLE	213
ANNEXE VI	MISE EN FORME SORTIE NŒUD TYPE DE FAMILLE.....	215
ANNEXE VII	NŒUD NIVEAU UNIVERSEL.....	217
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		219

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 4.1	Utilité des différentes combinaisons des définitions de paramètres97
Tableau 4.2	Informations manipulées dans le modèle expérimental.....97
Tableau 4.3	Renseignement des informations du modèle99
Tableau 4.4	Critères de sélection du système pour traiter l'échange d'informations..112
Tableau 5.1	Contraintes et solutions pour la création des scripts Dynamo150
Tableau 6.1	Zones manipulées.....179
Tableau 6.2	Correspondance Timeliner/Feuille Compil.....187
Tableau 6.3	Couleurs associées aux intervenants.....192

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0.1	Plan du mémoire5
Figure 1.1	Intervenant clés à la planification des projets de construction9
Figure 1.2	Formats utilisés en planification pendant la pré-construction11
Figure 1.3	Diagramme à barres12
Figure 1.4	Méthode de la précédence.....14
Figure 1.5	ADM à l'échelle du temps17
Figure 1.6	PDM à l'échelle du temps.....18
Figure 1.7	Le Fenced Bar Chart19
Figure 1.8	ADM à l'échelle du temps20
Figure 1.9	Relations internes entre activités point-à-point.....23
Figure 1.10	Interdépendances probabilistes point-à-point entre les activités24
Figure 1.11	Fonction dynamique basée sur la production.....25
Figure 1.12	Les différents types d'espace définis par Winch et North28
Figure 1.13	Décomposition des espaces de construction30
Figure 1.14	Découpage de l'étage avec l'utilisation du Takt-Time31
Figure 1.15	Sous-ensembles comportementaux pour les aires de préfabrication (à gauche) et les espaces de travail (à droite).....32
Figure 1.16	Évolution des espaces33
Figure 1.17	Cycle de vie des espaces mobilisés par la réalisation d'un mur34
Figure 1.18	Identification des tâches spatialement critiques.....35
Figure 1.19	Représentation LOB de l'étage.....36
Figure 1.20	Représentation de la fragmentation verticale et horizontale de l'industrie de la construction.....40

Figure 1.21	Principe de la simulation 4D.....	47
Figure 1.22	Processus de création modèle 4D avant l'arrivée du BIM.....	48
Figure 1.23	Processus de création d'un modèle 4D dans un contexte BIM.....	49
Figure 1.24	Processus de gestion du site avec la simulation 4D.....	54
Figure 1.25	Last Planner System.....	57
Figure 2.1	Étapes de la recherche.....	62
Figure 3.1	Illustration du LBS, zones de la phase Création d'espaces (en haut) et de la phase Finition (en bas)	72
Figure 3.2	Représentation temporelle par étage et par lot.....	80
Figure 3.3	Représentation de l'occupation d'un étage pour une période donnée.....	81
Figure 3.4	Combinaison d'un plan d'étage et d'un échancier Gantt modifié.....	82
Figure 3.5	Cadre conceptuel du protocole graphique de la méthode Chronographique.....	83
Figure 3.6	Protocole graphique des entités physiques	84
Figure 4.1	Hiérarchie des familles Revit.....	92
Figure 4.2	Fenêtre de l'outil « Timeliner » de Navisworks	101
Figure 4.3	Différence des arborescences de sélection entre un même modèle enregistré au format Revit et au format IFC	103
Figure 4.4	Présentation de l'interface de dynamo	111
Figure 5.1	Rôles et relations entre les différents intervenants	124
Figure 5.2	Étapes du processus	127
Figure 5.3	Étape 1 « préparation de la maquette numérique ».....	128
Figure 5.4	Modèle dans deux gabarits différents (Construction en haut, Génie climatique en bas)	130
Figure 5.5	Processus de préparation de la maquette numérique	136
Figure 5.6	Étape 2 « export des informations » et étape 4 « import des informations »	139

Figure 5.7	Principe de l'export d'informations avec dynamo.....	140
Figure 5.8	Principe de l'import d'informations avec Dynamo	141
Figure 5.9	Différence de lecture du paramètre niveau	142
Figure 5.10	Lecture des paramètres d'occurrences et des paramètres de type de famille	143
Figure 5.11	Nœud de lecture de paramètre personnalisé	147
Figure 5.12	Nœud « Script Python » et interface de programmation.....	148
Figure 5.13	Script final d'export d'information.....	151
Figure 5.14	Processus d'export des informations	153
Figure 5.15	Processus d'import des informations.....	153
Figure 5.16	Fonctionnalité Dynamo Player	155
Figure 5.17	Étape 3 « Planification avec la méthode Chronographique ».....	155
Figure 5.18	Présentation de la vue « Revised »	157
Figure 5.19	Présentation de la vue « Niveaux ».....	158
Figure 5.20	Présentation de la vue « Vertical »	159
Figure 5.21	Présentation de la feuille « Compil ».....	163
Figure 5.22	Processus de planification Chronographique.....	165
Figure 5.23	Étape 5 « Modélisation 4D »	166
Figure 5.24	Paramétrage de la règle Navisworks.....	168
Figure 5.25	Processus de montage du modèle 4D.....	169
Figure 6.1	Modèle BIM réalisé pour l'étude de cas.....	176
Figure 6.2	Échéancier du projet dans la vue « Revised ».....	180
Figure 6.3	Échéancier dans la vue « Niveaux (regroupement par lot) »	181
Figure 6.4	Échéancier du projet avec la vue « Niveaux (regroupement par zones) »	182

Figure 6.5	Échéancier dans la vue « Vertical ».....	183
Figure 6.6	Étude des lignes caractérisant les activités	184
Figure 6.7	Échéancier réalisé dans la vue Revised	185
Figure 6.8	Modélisation des espaces sur Revit	190
Figure 6.9	Visualisation 4D des intervenants au sein des différents espaces du projet	193

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

BIM	Building Information Modeling
MGPlan	Modélisation Graphique de la Planification
2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions
4D	Quatre dimensions
5D	Cinq dimensions
IFC	Industry Foundation Classes
AON	Activity On Nodes
PDM	Precedence Diagram Method
CPM	Critical Path Method
LOB	Line of Balance
TI	Technologies de l'information
IAI	International Alliance for Interoperability
LPS	Last Planner System
WBS	Work Breakdown Structure
LOD	Level of Development

INTRODUCTION

Ces dernières années, l'industrie de la construction se voit quelque peu bousculée dans ses pratiques en raison de l'émergence de nouvelles technologies, de la complexité technique croissante des projets ou encore de nouvelles exigences en matière de qualité, de coût et de délais. La réussite des projets de construction est fortement influencée par la qualité de la planification. En effet M. Liu, Ballard, et Ibbs (2010) déclarent que mieux les flux de travail sont planifiés plus la productivité augmente. La planification est donc considérée par beaucoup comme la fonction managériale la plus importante (Laufer & Tucker, 1987; Winch & North, 2006). Et bien que la planification soit critique pour le succès d'un projet, elle n'en reste pas moins l'un des processus les plus difficiles à concevoir avec précision tant pour les équipes de conception que pour les équipes de construction (Newitt, 2005).

Les échéanciers de construction sont actuellement majoritairement réalisés avec des méthodes qui combinent la modélisation graphique du diagramme de Gant avec la logique de la Précédence pour démontrer les contraintes entre les activités, le chemin critique et les marges (Francis 2004). Les échéanciers servent traditionnellement à planifier les activités à réaliser. Les ressources sont ensuite attribuées comme allocation pour produire des échéanciers plus réalistes. Francis (2004) critique l'incapacité de cette méthode à planifier tout type de projet. Bertelsen, Koskela, Henrich, et Rooke (2006) déclarent que bien que cette méthode de planification soit d'une grande utilité pour planifier certains types d'activités, elle est inadaptée pour planifier la réalisation des travaux de construction. En effet, la planification des projets de construction vise à coordonner l'intervention des différents intervenants sur un chantier de construction (Adel Francis, 2015). Différents facteurs sont alors à prendre en considération pour déterminer les taux d'occupation optimums des espaces tout en évitant les congestions et ainsi augmenter la productivité (Francis & Miresco, 2016). Cependant, les diagrammes de Gantt ne permettent pas de visualiser les contraintes spatiales et la mobilisation des ressources par une activité (Koo & Fischer, 2000). L'utilisation de plans ou d'autres documents est alors nécessaire pour appréhender les différentes contraintes. Ainsi la tâche s'avère complexe dans

le cadre de grands projets. Pour cette raison, les entrepreneurs n'utilisent les échéanciers qu'accessoirement pour les communications avec le client ou pour gérer les réclamations.

Ces dernières années, de nouvelles perspectives pour la gestion des projets de construction sont apparues avec l'émergence du BIM (Building Information Modelling). Ce nouveau concept de gestion de projet permet aux différents acteurs des projets de construction, de travailler et d'échanger autour de maquettes numériques riches en informations de projet. Plusieurs recherches se sont attachées à exploiter le BIM pour la planification des projets de construction. Cependant, les outils BIM actuels sont majoritairement destinés pour la phase de conception des ouvrages, notamment pour la coordination 3D qui consiste à détecter conflits entre les différents modèles de conception (architecturale, structurel...). Les outils de simulation 4D associent les tâches d'un échéancier de type Gantt aux éléments d'un modèle 3D pour simuler les différentes étapes de la construction. Ceci permet, entre autres, de vérifier la cohérence du calendrier et de faciliter la communication des séquences de travaux prévues aux différents intervenants (Staub-French & Khanzode, 2007). Cependant, l'utilisation de ces outils exige un grand effort d'adaptation des échéanciers, d'une part et du modèle 3D d'autre part, afin que ceux-ci reflètent les perspectives de réalisations des travaux. De plus, les outils de simulation 4D ne sont pas à proprement parler des outils de planification, car ils exigent d'avoir un échéancier déjà réalisé.

Le laboratoire de recherche MGPlan a comme objectif la conception, le développement et la mise en place d'une modélisation Chronographique intégrée pour la planification des projets et des opérations de construction. Ce nouveau concept permet une planification spatiale des projets de construction et d'alterner entre différentes approches de visualisation des échéanciers. Chaque approche permet une nouvelle représentation graphique de l'information du projet. Francis (2013) décrit que :

The Chronographical approach is a more complete communication method, having the ability to alternate from one visual approach to another by manipulation of graphics by way of a set of defined graphical parameters. Each individual approach can help to schedule a certain project type or

speciality, show valuable information in a clear and comprehensible manner and facilitate the management of construction site problems visually. Visual communication can also be improved through layering, sheeting, juxtaposition, alterations and permutations, allowing for groupings, hierarchies and classification of project information. In this way, graphical representation becomes a living, transformable image, thus assisting planners in solving problems of a variable nature, and simplifying site management while simultaneously using the visual space as efficiently as possible.

La présente recherche s'intègre dans cet objectif et a comme but de fournir une stratégie de communication entre les concepts du BIM et la planification Chronographique afin de produire des modèles 4D et des échéanciers qui prennent en compte les différentes contraintes d'exécution, tel que les espaces de travail, la circulation, les ressources, les équipements, etc....

L'implantation du nouveau paradigme qu'est le BIM s'accompagne d'une redéfinition des pratiques industrielles. Son utilisation nécessite un remaniement du cadre légal des projets de construction pour redéfinir les rôles et responsabilités légales, civiles, contractuelles et professionnelles de chacun des intervenants. La présente recherche n'étudie pas ces aspects et d'autres recherches seront nécessaires pour résoudre ces difficultés. Le présent projet se concentre sur les possibilités d'exploitation des outils numériques permettant d'appliquer le concept du BIM pour la planification de l'exécution des projets de construction de bâtiments.

Les objectifs secondaires permettant de mener à bien ce projet sont les suivants :

1. Identifier les possibilités d'adaptation des maquettes numériques BIM pour refléter les perspectives de construction et ainsi fournir des informations utiles à l'élaboration d'échéanciers avec la méthode Chronographique ;
2. Identifier les possibilités d'échange d'informations entre le logiciel de modélisation BIM et l'outil informatique permettant d'appliquer le concept de modélisation Chronographique de la planification ;
3. Définir les étapes du processus permettant d'exploiter la maquette numérique pour alimenter le concept de planification Chronographique et de réaliser des simulations 4D des séquences de travaux planifiées ;

4. Développer et mettre en place des outils permettant de supporter ce processus.

La finalité du projet étant l'exploitation du BIM pour assister la gestion du projet en phase de réalisation des travaux, cette recherche permettra alors d'exposer certaines contraintes et limitations des outils BIM actuels pour une exploitation en phase de production.

Ce mémoire s'articule autour de six chapitres représentés dans la figure 1 :

Chapitre 1 – Revue de la littérature : Ce chapitre vise la revue des connaissances actuelles dans le domaine de la planification des projets de bâtiment durant la phase de construction.

Chapitre 2 – Méthodologie : Ce chapitre décrit la méthodologie de recherche employée pour développer une stratégie d'exploitation du BIM pour alimenter la planification Chronographique et produire des simulations 4D.

Chapitre 3 – La planification Chronographique : Ce chapitre décrit le concept de modélisation Chronographique et de communication de l'information des projets pour la planification des opérations de construction des projets de bâtiments.

Chapitre 4 – Analyse expérimentale : Ce chapitre présente l'analyse des fonctionnalités des logiciels permettant de créer et de manipuler les modèles numériques BIM ainsi que les possibilités d'échange d'information avec d'autres plateformes.

Chapitre 5 – Développement de la stratégie de communication : Ce chapitre détaille la stratégie de communication développée, les différentes étapes du processus proposé et les outils créés ou adoptés pour supporter cette stratégie dans l'exploitation des modèles BIM et des modélisations chronographiques de la planification pour créer des simulations 4D.

Chapitre 6 – Étude de cas : Ce chapitre présente une étude de cas pour l'application de la stratégie développée sur un projet fictif de construction.

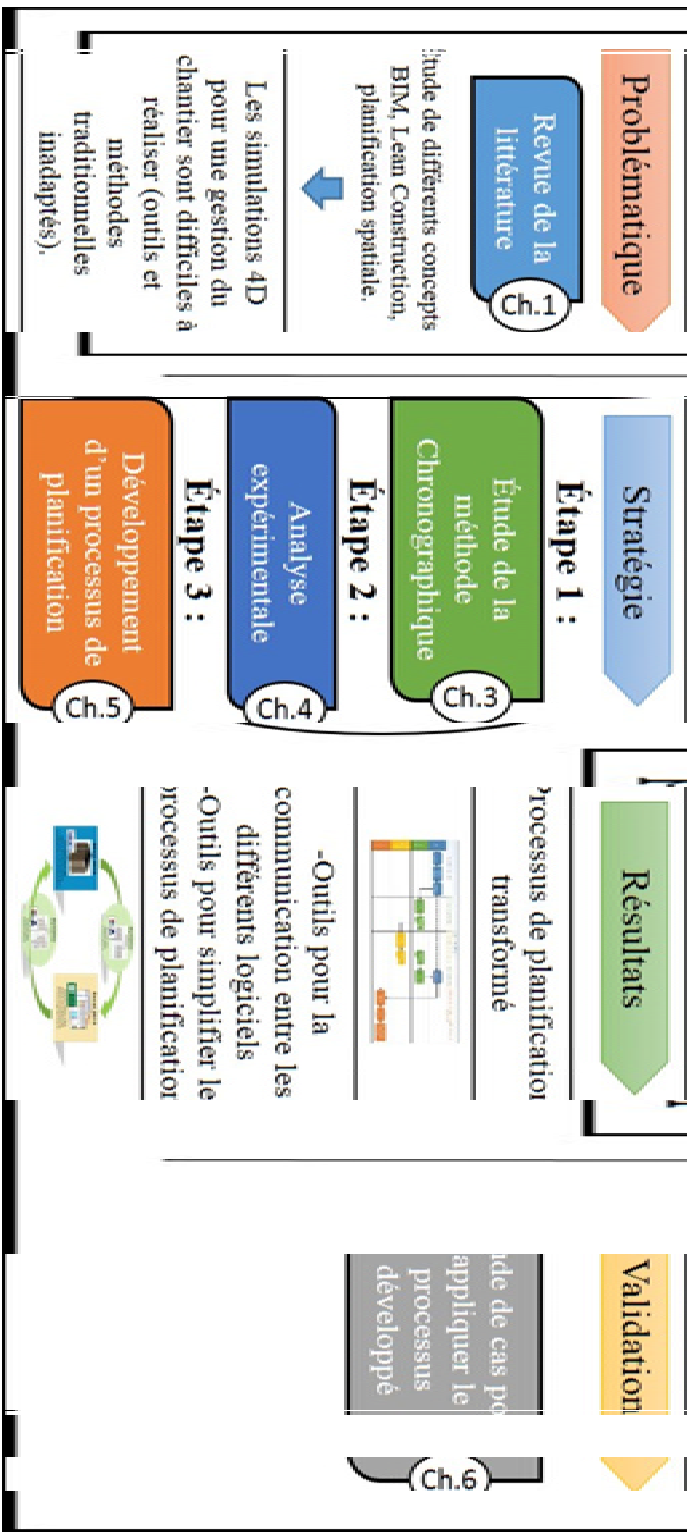


Figure 0.1 Plan du mémoire

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

La planification des projets de construction est un domaine vaste qui couvre de nombreux aspects et qui s'intéresse à toutes les phases de conception, de réalisation et d'exploitation des projets. Elle résume alors la mise en œuvre complète du projet ; du berceau au tombeau. La présente revue de littérature se concentre sur quatre aspects en lien avec la planification des ouvrages durant la phase de construction. Le premier aspect s'intéresse aux méthodes d'ordonnement graphiques traditionnellement utilisées pour la planification des projets de construction. Cette partie les décrit brièvement et discute de leurs avantages et faiblesses ainsi que leurs évolutions au cours du temps. Le second aspect étudié s'intéresse aux contraintes spatiales dans le processus de planification des travaux. Le troisième aspect présente le concept du BIM (Building Information Modelling) et l'impact de cette nouvelle philosophie et des technologies associées sur la planification des projets de construction. Le dernier aspect présente le concept du Lean Construction et notamment l'approche du Last Planner System pour la planification et l'exécution des travaux.

1.1 La planification des projets de construction

La planification des projets de construction est une activité complexe qui demande beaucoup de connaissances et d'expériences. En effet, il existe de nombreuses alternatives de planification possibles pour un projet de construction et même si l'expérience peut servir de guide pour planifier un projet, chaque projet possède ses propres problèmes et opportunités (Hendrickson & Au, 1989). La cause principale des difficultés rencontrées dans le processus de planification réside selon Laufer, Tucker, Shapira, et Shenhar (1994) dans la multiplicité des rôles, des utilisateurs, des plans, des formats et des échelles de temps de la planification.

1.1.1 Rôle de la planification

La planification de la construction est le processus d'identification des activités et des ressources nécessaires pour transformer la conception en un ouvrage physique réel (Hendrickson & Au, 1989). La planification de la construction est un outil de gestion qui permet aux gestionnaires de la construction de diriger l'exécution des projets afin de les achever dans des temps et des coûts intéressants (Willis, 1986). Selon (Laufer & Tucker, 1987), la planification doit permettre de répondre aux questions suivantes :

- que fait-on ? (Activités) ;
- comment réalise-t-on les activités ? (Méthodes) ;
- qui réalise les activités et avec quels moyens ? (Ressources) ;
- quand doit-on réaliser les activités ? (Échéancier).

Toujours selon (Laufer & Tucker, 1987), la planification des projets de construction poursuit cinq objectifs principaux :

- **l'exécution** : est la raison d'être de la planification, il est donc important de bien comprendre les processus et les méthodes de réalisation pour pouvoir prendre les décisions appropriées ;
- **la coordination et la communication** : La planification doit servir de support pour coordonner et communiquer les différentes informations entre les parties prenantes du projet ;
- **le contrôle** : La planification permet aussi de contrôler que les activités se déroulent comme prévu et que les objectifs fixés sont atteints ;
- **les prévisions** : Planifier doit permettre de prévoir les performances du projet et de définir les jalons ;
- **l'optimisation** : La planification doit permettre d'étudier et d'analyser certains aspects du projet en vue de l'optimiser.

La figure 1.1 montre que la planification poursuit différents buts, est réalisée à différentes phases du projet et par différents acteurs. Ceci traduit le caractère collaboratif de la

planification. Weber (2005) décrit que la valeur principale d'un échancier en phase de pré-construction réside dans le fait que c'est un excellent outil de communication. Cet aspect collaboratif de la planification traduit le besoin de support pour que les différents acteurs puissent se comprendre et échanger.

Plan	Pre-bid planning	Pre-construction planning	During-construction planning
Engineering and method	PM (41)	GS, DE (33)	PM, GS, PE, DE, SC (30)
Organization and contract	PM, HO (52)	PM (43)	PM, HO, GS, PE (18)
Schedule	PM, HO, SC (82)	GS, SC, PM, PE (100)	GS, PE, PM, SC, CL (100)
Cost and cash flow	PM, HO (100)	PM, SC, GS, HO, CL (52)	PM, PE, GS, HO (68)
Major equipment	PM, HO (34)	GS (47)	GS, PM, PE (27)
Layout and logistics	PM (39)	GS, PM (61)	GS, PM (33)
Work methods	HO (47)	GS, PM (55)	GS, PM, SC, PE (38)
Manpower allocation	— (22)	SC, GS (37)	GS, PE, PM, SC (43)
Materials allocation	— (21)	GS, PM, SC (33)	GS, PE, SC, PM (25)

PM, project manager; SC, subcontractors; GS, general superintendent; CL, client/owner; PE, project engineer; DE, design engineers; HO, home office.
Participants are listed in descending order of their degree of involvement.
Bracketed figures denote per cents of relative planning effort.

Figure 1.1 Intervenant clés à la planification des projets de construction
Tirée de Laufer et al. (1994)

1.1.2 Niveau de détail de la planification

La planification est donc réalisée par différents acteurs et à différentes étapes du projet. Un facteur important pour la réalisation des échanciers est le niveau de détail des tâches à réaliser. Newitt (2005) déclare que c'est toujours un challenge de déterminer à quel point détailler les activités des projets de construction. En effet, si le niveau de détail n'est pas assez élevé, la logique du planning sera difficilement identifiable. Si, par contre, le découpage du projet est trop détaillé, il y a un risque que certains détails ne soient pas réellement nécessaires. Ce qui entrainerait une certaine confusion et nécessiterait plus de travail que ce qui est réellement

nécessaire. Par ailleurs le niveau de détail des calendriers de construction doit être adapté aux besoins de l'utilisateur (Willis, 1986). En effet, le client va avoir besoin d'un niveau de détail moins important que le surintendant ou les sous-traitants. Laufer et al. (1994) précisent aussi que le niveau de détail devient de plus en plus élevé au fur et à mesure de l'avancement du projet. Selon Francis (2004) le niveau de détail doit correspondre au niveau de contrôle. Chaque acteur du projet doit déterminer son niveau de détail en fonction de ses responsabilités et de son pouvoir sur le projet. Ainsi, les échéanciers produits par le client ou son représentant, l'entrepreneur général et les sous-traitants sont différents. Le premier s'intéresse aux jalons principaux de réalisation, aux changements et à la facturation, le second à une obligation de gestion du site et de la coordination des travaux et la gestion de son flux monétaire, tandis que l'objectif du dernier est l'utilisation optimale de ses ressources.

1.1.3 Différents formats de la planification

Le type de planning utilisé pour un projet dépend de la nature du projet (Willis, 1986). Par exemple pour un projet de taille modérée avec un nombre limité de tâches un simple diagramme à bar pourrait suffire alors que pour des projets à grande envergure des techniques de planification plus avancées seront sûrement requises. D'autre part, les études menées sur les pratiques de l'industrie par (Laufer et al., 1994), ont montré que plusieurs formats étaient utilisés pour l'élaboration et la représentation de la planification. Les formats de représentation usuels identifiés sont :

- le format textuel. (Listes, Liste de contrôle, protocoles de réunions, instructions verbales...);
- les diagrammes techniques et les plans ;
- les diagrammes organisationnels (Work Breackdown Structure, structures organisationnels...);
- les diagrammes de temps (Gantt, CPM, temps/ressources) ;
- les tableaux.

La figure 1.2 ci-après présente les différents formats utilisés pour la planification en phase de pré-construction.

Plan	Proportion of plans issuance (%)	Proportion of format use by type of format (%)					Total
		Textual	Technical diagrams	Organizational diagrams	Time charts	Tables	
Engineering and method	56	55	9	-	36	-	100
Organization and contract	67	59	-	35	-	6	100
Schedule	94	8	12.5	12.5	67	-	100
Cost and cash flow	78	20	-	-	30	50	100
Major equipment	72	47	20	-	13	20	100
Layout and logistics	89	30	60	-	5	5	100
Work methods	89	50	27	4	15	4	100
Manpower allocation	83	24	5	9.5	52	9.5	100
Materials allocation	78	45	5	-	25	25	100
Weighted mean	-	36	16	7	28	13	100

Figure 1.2 Formats utilisés en planification pendant la pré-construction
Tirée de Laufer et al. (1994)

A. Francis (2015) classifie les représentations graphiques ou tabulaires de la planification des projets. Ces modélisations seront présentées dans la section 3.4.1- Représentations graphiques de la planification.

1.1.4 Représentations graphiques des échéanciers de construction

Il existe plusieurs techniques pour réaliser la planification des projets de construction. Et l'utilisation d'une méthode ou d'une autre varie selon les différents projets ainsi que selon les différentes entreprises (Hinze, 2008). Cette section présente seulement aux diagrammes à barres et aux réseaux graphiques et temporels.

Les diagrammes à barres (ou diagrammes Gantt)

Les diagrammes à barres modernes peuvent retracer leurs origines vers 1765. L'auteur du concept semble être Joseph Priestley (Angleterre, 1733-1804). Son «diagramme de

biographie» traitait quelque 2000 durées de vies de personnes célèbres sur un graphique à l'échelle du temps (Weaver, 2012). Par la suite plusieurs recherches se sont basées sur les travaux de Priestly pour différents autres domaines.

Les diagrammes à bar utilisés pour la planification des projets de construction sont apparus dans les années 1910 suite aux travaux menés par Gantt (1919). Il s'agit de la technique la plus utilisée pour représenter le planning dans la construction (Coyne, 2008; Hinze, 2008; Weber, 2005). Dans ces diagrammes, les activités sont représentées par des barres de tailles proportionnelles à leurs durées (figure 1.3).

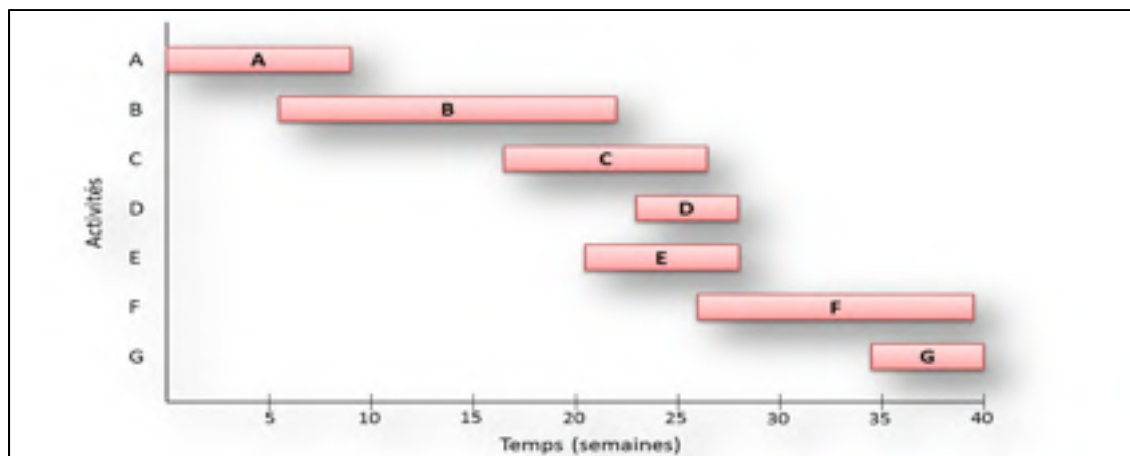


Figure 1.3 Diagramme à barres
Tirée de Botton (2013, p. 53)

Cette technique de représentation a l'avantage d'être facile à utiliser et rapide pour représenter le statut de la construction (Hinze, 2008). De plus, elle ne nécessite pas de connaissances particulières pour comprendre le statut d'un projet (Weber, 2005). Elle est décrite comme un outil de communication à tous les niveaux organisationnels, car elle permet de représenter graphiquement les différents niveaux d'exécution. Cependant les diagrammes à barres sont difficiles à modifier et à manier dans le cadre de grands projets.

Les réseaux d'ordonnement graphiques

Le développement des modèles d'ordonnement déterministes sous forme de graphe est lié à l'apparition de l'ordinateur. Les méthodes développées sont connues sous l'acronyme de CPM : Critical Path Method ou méthodes du chemin critique. Les deux variations les plus connues sont L'ADM : Arrow Diagram Method (Ford & Fulkerson, 1957; Kelley & James, 1961; Kelly & Walker, 1959) et La PDM : Precedence Diagram Method (Fulkerson, 1962).

1.1.4.1 ADM «Arrow Diagram Method »

À partir de 1957, le centre UNIVAC, sous la direction de John Mauchly, se joint à James Kelley et Morgan Walker de Dupont pour l'application de la théorie des graphes à la planification des projets. L'ADM ou la méthode Activités sur flèches crée est constituée par des nœuds et des flèches (voir figure 1.4). Les nœuds représentent les événements tandis que les flèches illustrent les activités.

1.1.4.2 PDM « Precedence Diagram Method »

Parallèlement aux travaux américains et dans le cadre des travaux de la Société d'économie et de mathématique appliquée en France, Bernard Roy propose la méthode dite **Potentiels-Tâches** (Roy, 1959, 1960).

Durant cette période la méthode Potentiels-Tâches était vulgarisée aux États-Unis par John Fondahl de l'Université de Stanford sous l'acronyme Méthode des précédences. La Précédence est aussi appelée Activités sur les nœuds. Cette méthode propose plusieurs types de relations entre les activités : Fin/Début, Début/Début, Fin/Fin et Début/Fin. 0, a, b, c et d. Ces relations désignent des contraintes potentielles entre les différentes tâches qui ne sont pas représentées par l'ADM.

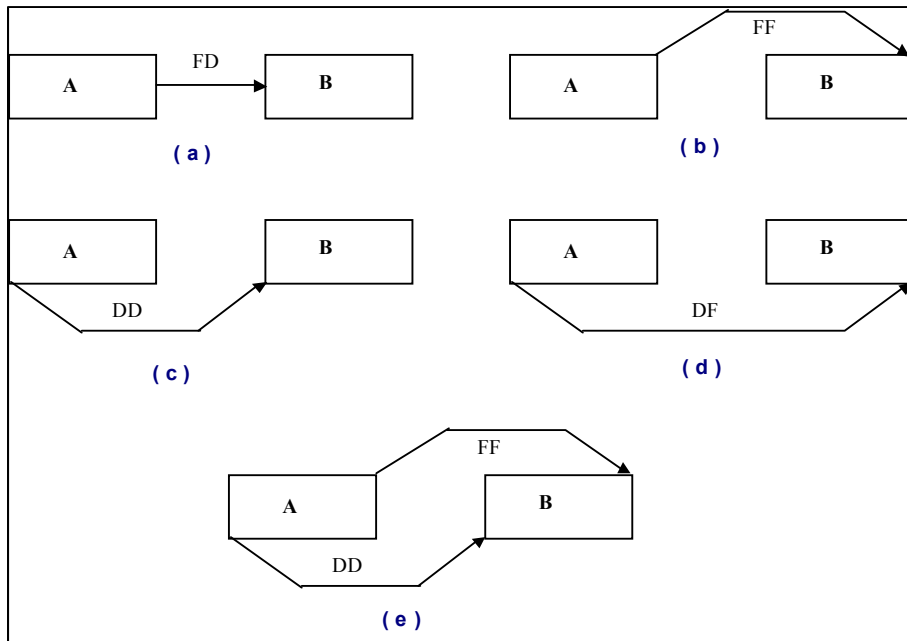


Figure 1.4 Méthode de la précédence
Tirée de Francis (2004, p. 44)

Ainsi ces réseaux présentent l'avantage de communiquer facilement les séquences d'exécution ainsi que d'être facile à utiliser et à interpréter.

Le chemin critique passe par les tâches qui doivent être accomplies à temps pour que l'intégralité du planning soit complétée dans les temps. Ces tâches sont alors appelées « tâches critiques » (Willis, 1986). Selon Willis (1986), le principal avantage de cette méthode réside dans le fait que la préparation de l'échéancier nécessite une analyse détaillée du projet. Le planificateur est donc amené à développer une meilleure compréhension du projet. Cette méthode est de plus décrite comme simple à comprendre (Weber, 2005). Certains auteurs indiquent que les représentations graphiques les plus adaptées pour cette méthode sont les réseaux à flèches. Cependant la tendance actuelle, est de combinée cette méthode avec une représentation graphique de type diagramme à barre (Hinze, 2008).

Les méthodes du chemin critique sont décrites par Antill et Woodhead (1990) comme un outil puissant pour la planification et la gestion de tous les types de projets. Ils illustrent la planification par le biais de diagrammes ou de réseaux temporels qui dépeignent les séquences

et relations entre les composants d'un projet (Antill & Woodhead, 1990). Une fois le découpage du projet en plusieurs activités et leurs durées évaluées, la méthode du chemin critique permet d'analyser les dépendances entre ces activités dans le but d'identifier :

- les dates de début et de fin au plus tôt des activités ;
- les dates de début et de fin au plus tard des activités ;
- les flottements entre les activités ;
- les activités qui font partie du chemin critique.

1.1.5 Limite des méthodes du chemin critique

Les méthodes du chemin critique peuvent fournir une grande aide pour la planification des projets de construction. Leurs utilisations sont très courantes dans l'industrie et bien qu'elle soit souvent exigée pour la phase de réalisation des projets de construction, plusieurs auteurs déclarent que ces méthodes ne sont pas complètement adaptées pour planifier tous les types de projets (Hinze, 2008). En effet, comme vu précédemment, l'utilisation du PDM, la méthode du chemin critique la plus utilisée actuellement, est souvent combinée avec une représentation graphique sous forme de diagramme à barres. D'après (Koo & Fischer, 2000) le diagramme Gantt est une représentation abstraite du projet. Cela pose donc deux limitations à l'utilisation de ces calendriers, selon eux :

- les calendriers peuvent être très complexes à étudier pour de gros projets. Ce qui augmente le nombre d'erreurs potentielles dans le calendrier, car il est difficile de les repérer et d'établir les liens logiques entre les différentes tâches ;
- les membres du projet peuvent développer des interprétations différentes de l'échéancier. Ce qui ne facilite assurément pas la collaboration entre les différents acteurs.

D'autres part une telle représentation de l'échéancier rend difficile l'analyse de l'impact des modifications (Weber, 2005). Ces méthodes sont donc peu adaptées pour l'étude de différents scénarios (Coyne, 2008).

Plusieurs auteurs remettent par ailleurs en question le chemin critique déterminé avec cette méthode étant donné qu'il est calculé uniquement sur la base des durées des activités (Francis & Miresco, 2000). De plus la difficulté de modifier les échéanciers implique des difficultés pour étudier l'impact de ces retards sur les autres activités du projet (Coyne, 2008).

Cette manière de procéder apparaît peu adaptée aux projets de construction étant donné qu'elle ne prend pas en compte différents facteurs :

- **le contexte spatial** : Un planning de type Gantt ne donne aucune information sur le contexte spatial. Ceci force les différents intervenants à consulter les plans en parallèle pour pouvoir interpréter les informations transmises par l'échéancier ;
- **les ressources** : Cette représentation utilise les ressources comme des attributs aux activités. Elle permet donc difficilement de planifier la continuité d'utilisation des équipes et de décrire graphiquement les ressources nécessaires à l'exécution des tâches ;
- **la difficulté des travaux à réaliser** : Il n'est pas possible d'identifier quelles tâches sont les plus difficiles à accomplir en visualisant le planning.

1.1.6 Les réseaux temporels

Les réseaux graphiques qui ne sont pas représentés à l'échelle du temps peuvent difficilement représenter les niveaux d'exécution du projet. Pour remédier à cette situation, plusieurs recherches ont été menées. Notamment pour l'ADM (Fondahl, 1962), voir Figure 1.5, et pour le PDM (Fondahl, 1964), voir Figure 1.6.

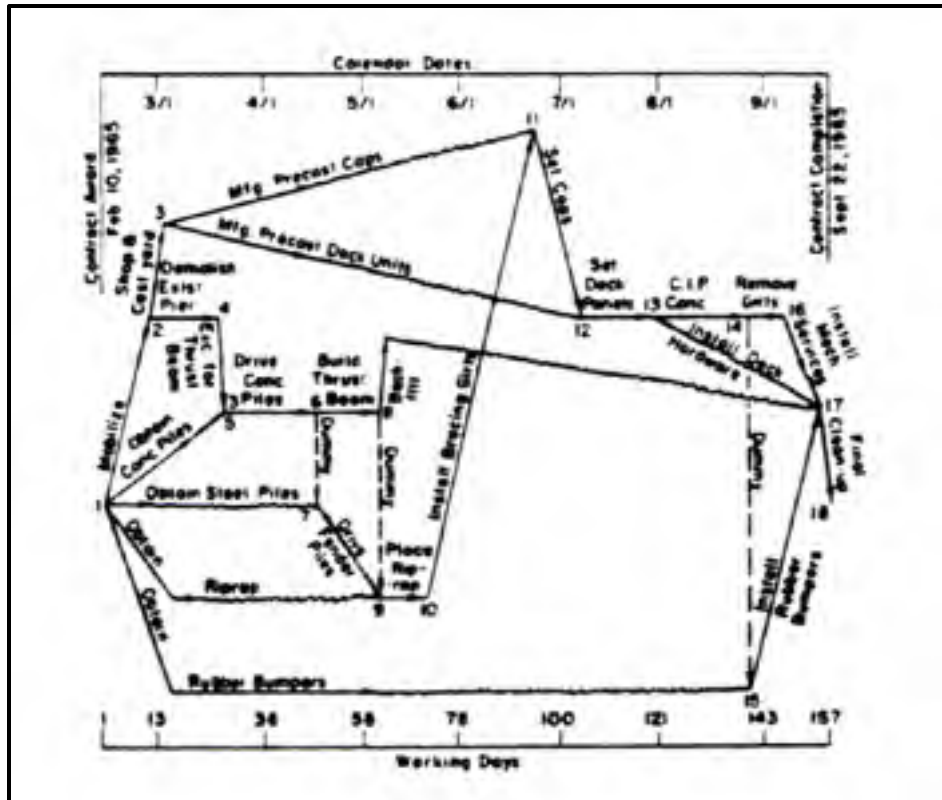


Figure 1.5 ADM à l'échelle du temps
Adaptée de Fondahl (1962)

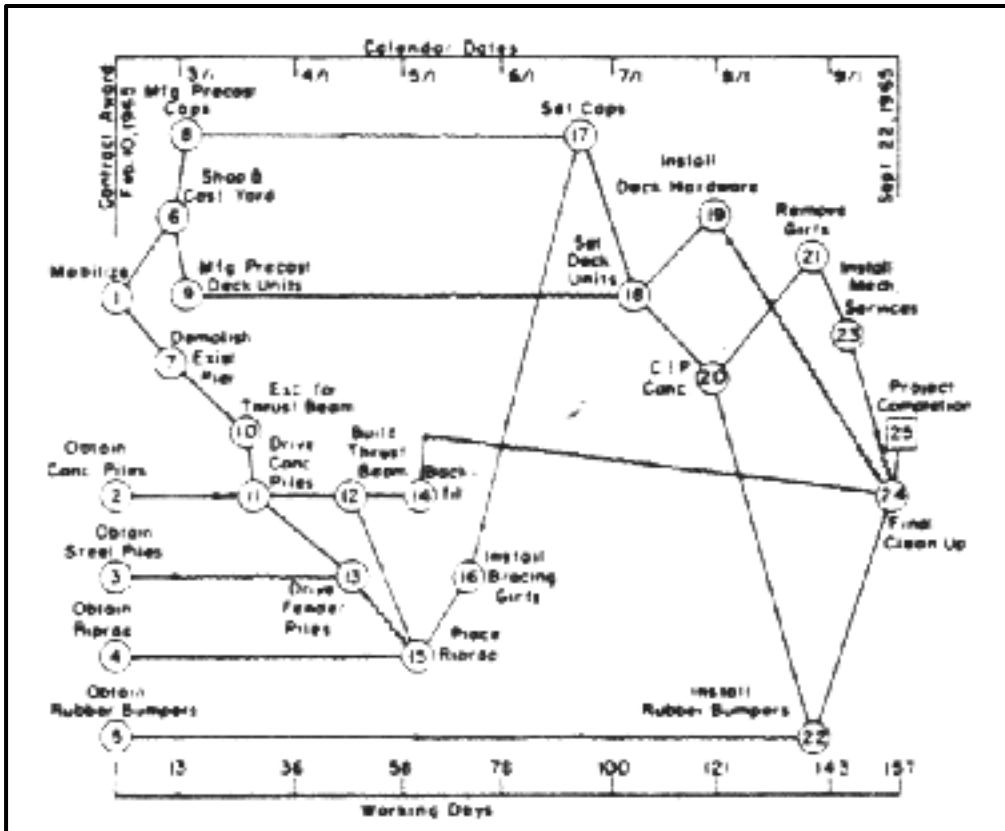


Figure 1.6 PDM à l'échelle du temps
Adaptée de Fondahl (1964)

En 1981, Melin et Whiteaker proposent la méthode **Fenced Bar Chart**, Figure 1.7.

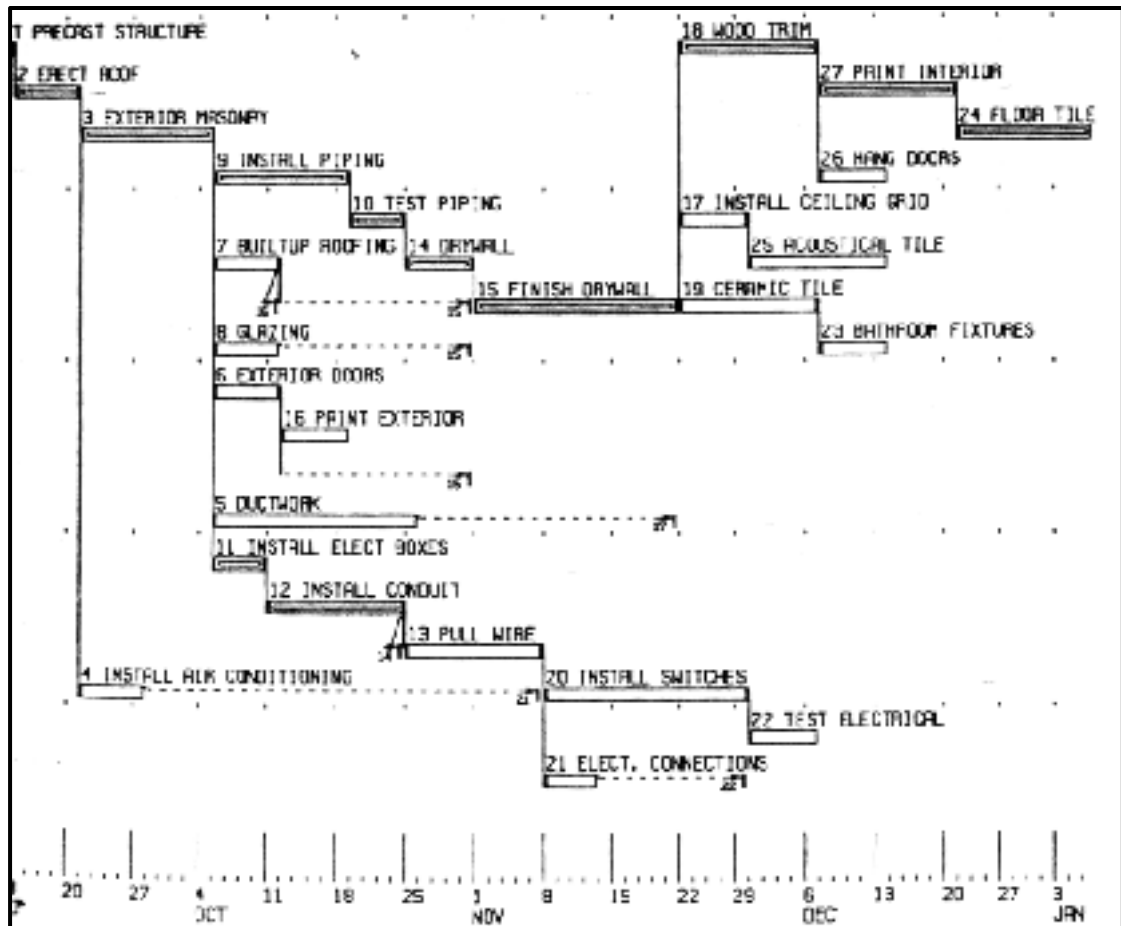


Figure 1.7 Le Fenced Bar Chart
Adaptée de Melin et Whiteaker (1983)

Plusieurs autres chercheurs ont proposé des alternatives. Une des plus importantes est celle proposée par Miresco et al. (1987) voir figure 1.8.

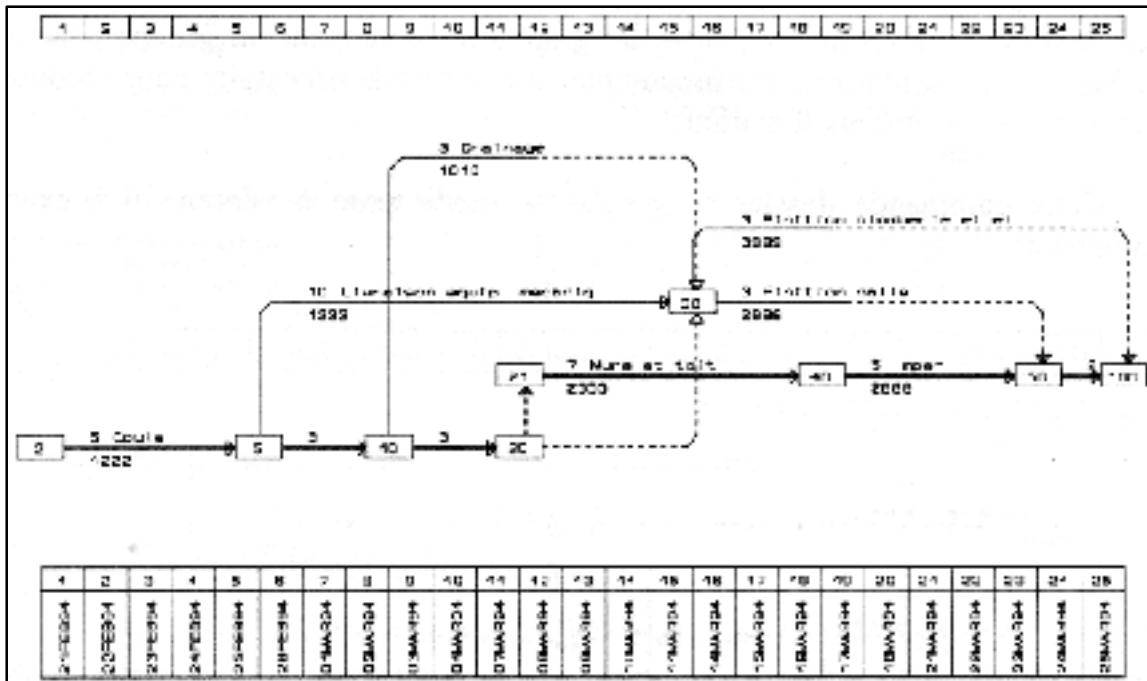


Figure 1.8 ADM à l'échelle du temps
Tirée de Miresco, Beliveau , et Gilbert (1987)

Francis et Miresco (2002) ont proposé la modélisation Chronographique qui présente les réseaux à l'échelle du temps. Cette modélisation supporte la décomposition interne des activités en fonction des quantités. Ainsi sont créées des relations internes en fonction de ces divisions. Cette méthode propose aussi une approche spatiale de la planification des projets et sera discutée plus en détail dans le **CHAPITRE 3 La méthode Chronographique**.

1.1.7 Évolution de la logique de planification :

Les faiblesses des réseaux d'ordonnancement graphiques, connus sous le nom du Diagramme de Précédence (PDM), largement utilisé dans l'industrie ont été discutées durant les quatre dernières décennies. L'identification de ces faiblesses a commencé par le chemin critique inversé lors de l'utilisation des liens de type Début-début ou Fin-Fin lors du calcul du réseau (Wiest, 1981). Il a été constaté ensuite que l'utilisation des délais était incorrecte pour simuler la production et le chevauchent des activités (Francis & Miresco, 2000; Francis & Miresco, 2006; Francis & Miresco, 2002). Puis il a été remarqué que lors de l'utilisation de calendrier

multiple, les relations de type Début/Fin avec un décalage nul entraînaient des retards négatifs (K. Kim & de la Garza, 2005).

La logique Chronographique a fourni la première solution à ces limites en proposant des divisions internes d'activités en fonction des quantités et de la relation point-à-point, générant des dépendances réalistes et de nouveaux types de marges (Francis & Miresco, 2000; Francis & Miresco, 2006; Francis & Miresco, 2002). Cette même logique a été suivie par quelques études très similaires, telles que « relationship diagramming method » (Plotnick, 2004), le format intervalle-à-intervalle proposé par la méthode « intermediate function of temporal logic » (Song & Chua, 2007) et la méthode de « graphical diagramming method » (Ponce de Leon, 2008).

Plusieurs développements ont suivi dont :

- la transformation automatique des schémas dans un réseau PDM ; les relations de type différentes que Fin/Début sont automatiquement remplacées en relation équivalente de type Fin/Début (Lu & Lam, 2009) ;
- les dépendances probabilistes entre les activités proposées par la relation Chronographique fondée sur la production (Francis & Miresco, 2011) ;
- la représentation graphique du «bee-line diagram's » à l'aide d'une relation ligne-abeille (S. G. Kim, 2012). Dont le but est de représenter les relations entre deux activités se chevauchant ;
- les fonctions dynamiques de production Chronographique pour suivre les interdépendances entre deux activités (Francis, Bibai, & Miresco, 2013) ;
- les relations en continu pour une meilleure modélisation des activités en chevauchement (M. Hajdu, 2015) ;
- l'introduction de lignes d'influence dans le calcul des réseaux de planification des projets et la caractérisation de neuf types d'activités critiques possibles (M Hajdu, Skibniewski, Vanhoucke, Horvath, & Brilakis, 2016) ;
- le calcul des réseaux et des marges avec la logique Chronographique en utilisant des échelles externes (temporelles) et internes (quantité de travail) (Francis, 2016b) ;

- le calcul du chemin critique basé sur les chemins des marges (PFCCPM) (M. Hajdu, 2016);
- l'intégration de l'impact des zones de travail sur le calcul des marges (Francis & Miresco, 2016) ;
- la modélisation des incertitudes intégrées aux opérations, aux processus et au travail aux relations point-à-point et aux fonctions dynamiques basées sur la production (Francis, 2017).

La logique de la Précédence considère le temps comme la seule contrainte pour calculer le chemin critique et les marges, négligeant la disponibilité des ressources et des zones de travail. Ce qui produit des échéanciers peu adaptés aux conditions du chantier. Une sur affectation des ressources ou des équipes sans considération de la disponibilité des emplacements de travaux peut créer une congestion sur le chantier, affecter négativement la productivité et créer un chemin critique trop optimiste. À l'inverse, une sous-affectation des équipes sur les différentes zones du chantier peut prolonger inutilement le chemin critique. Sans l'appréciation de la disponibilité des espaces de travail, les échéanciers seront alors trop optimistes ou pessimistes.

1.1.8 La méthode Chronographique

La méthode Chronographique est une technique d'ordonnancement des réseaux graphiques à l'échelle du temps mieux adaptée à la modélisation des projets et plus précise. Cette logique propose des divisions internes aux activités en fonction des quantités et des relations externes et internes permettant un suivi plus étroit de l'exécution. La logique étudie les probabilités associées à la production, à la qualité du travail et aux contraintes relationnelles. La méthode propose aussi des liens point-à-point basés sur la production et des fonctions déterministes et probabilistes.

Les liens point-à-point :

La modélisation Chronographique analyse les contraintes relationnelles et les dépendances entre les activités utilisant des fonctions temporelles et des divisions internes. Les fonctions

temporelles connectent les activités sur un ou plusieurs points, appelés points de connexion. L'utilisation de multiples fonctions temporelles (figure 1.9) permet le suivi d'interdépendances entre deux activités.

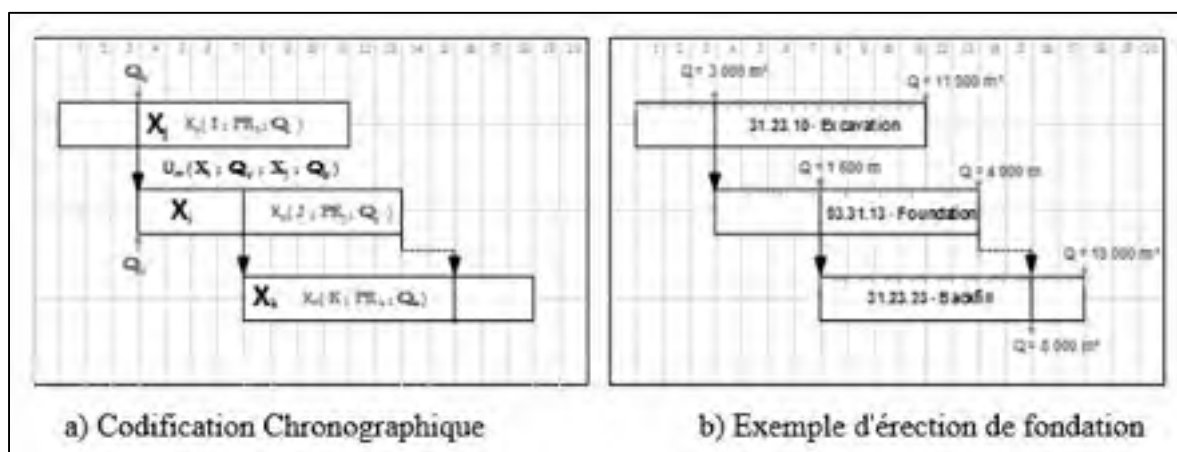


Figure 1.9 Relations internes entre activités point-à-point
Adaptée de Francis (2017)

Les activités peuvent avoir une ou plusieurs divisions internes. Ces divisions peuvent être liées à des échelles externes ou internes. Les échelles externes représentent généralement le temps, alors que l'échelle interne représente habituellement les quantités. Les relations traditionnelles entre les activités sont remplacées par des liens point-à-point générant des dépendances réalistes et de nouveaux types de marges (Francis & Miresco, 2006).

Relations Chronographiques basées sur la production :

Les relations Chronographiques basées sur la production étendent le rôle des fonctions temporelles à une relation dynamique entre les activités interconnectées. Cela permet des dépendances probabilistes entre les activités, ce qui signifie qu'elles permettent des décalages (écarts) dans les interdépendances (Francis et al., 2013).

Ces relations dynamiques peuvent représenter le cas de dépendances à une ou deux directions (figure 1.10). Avec la dépendance à sens unique, l'activité successeur dépend du taux de

production de l'activité prédécesseur. Cela signifie que le point de connexion sur l'activité successeur peut supporter un retard dans l'activité prédécesseur inférieur ou égal à la valeur de l'écart permis. Dépassant cette limite, l'activité successeur sera retardée ou interrompue. Dans le cas des dépendances bidirectionnelles, les deux activités sont co-dépendantes tout au long de leurs exécutions. La différence, avec la dépendance à sens unique, est que l'activité prédécesseur dépendra également de la productivité de l'activité successeur. Cela signifie que les deux points de connexion sur les activités prédécesseur et successeur peuvent supporter un retard dans l'autre activité inférieure ou égale à la valeur de l'écart. Sinon, ces activités peuvent être retardées ou interrompues.

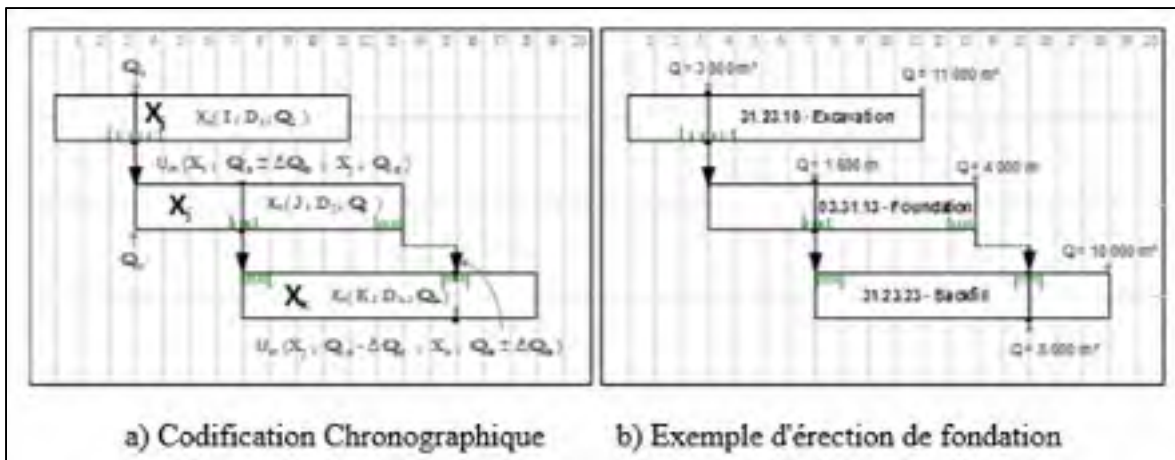


Figure 1.10 Interdépendances probabilistes point-à-point entre les activités
Adaptée de Francis (2017)

Le défi avec cette approche est qu'elle nécessite un travail de préparation détaillé, ce qui est moins approprié lorsque plusieurs activités sont interconnectées tout au long de leurs exécutions. Afin de proposer une solution pratique, les interdépendances internes peuvent être représentées par une fonction mathématique dynamique basée sur la production.

Fonction dynamique basée sur la production :

Les fonctions dynamiques basées sur la production (Francis et al., 2013) proposent de remplacer plusieurs interdépendances internes entre les activités par une fonction

mathématique continue ou sectionnelle associée à une fonction temporelle unique (Figure 3). Cette fonction contient les règles qui gèrent les interdépendances continues ou sectionnelles entre deux activités. Les fonctions sont présentées graphiquement par un trapèze dans le cas d'une dépendance à sens unique ou par une boucle dans le cas d'une dépendance bidirectionnelle (voir figure 1.11).

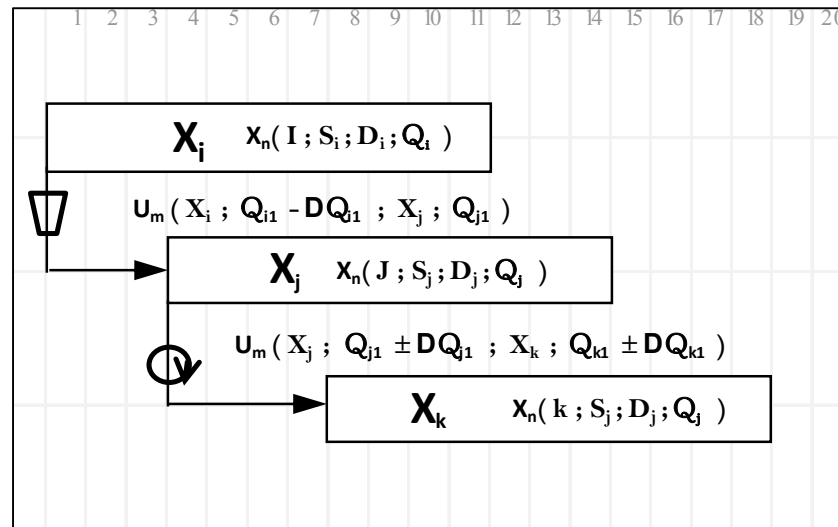


Figure 1.11 Fonction dynamique basée sur la production
Adaptée de Francis (2017)

1.1.9 Analyse et discussion

La planification poursuit différents objectifs et son élaboration nécessite différents supports visuels. Cependant les méthodes et modes de représentations de la planification traditionnellement utilisées présentent certaines limites pour l'appréhension de certaines contraintes d'exécution des travaux (espaces, ressources...).

1.2 La gestion des espaces

L'une des principales limitations des méthodes traditionnelles de planification réside dans la difficulté de prendre en compte le caractère spatial des projets de construction. Plusieurs

recherches ont été menées pour apporter des solutions à ces limites. Cette partie présente donc certains de ces travaux.

1.2.1 Enjeux et problématiques de la gestion des espaces sur les chantiers de construction

La construction d'un édifice requiert des espaces pour les déplacements, le stockage, l'assemblage ou encore la réalisation des travaux. Ces espaces vont être amenés à changer au fur et à mesure que le projet évolue. Les projets de construction nécessitent l'intervention de plusieurs sous-traitants, ceux-ci vont avoir des besoins différents en termes d'espaces de travail, d'équipement, d'espaces de stockage ou encore d'accès au chantier ou d'espaces protégés (Guo, 2002). D'autre part le caractère unique des projets de construction est aussi à prendre en considération. En effet les accès au chantier, les besoins en matériel, les besoins en installations temporaires (bureaux, vestiaires, sanitaires...) vont varier à chaque projet. Mawdesley, Al-jibouri, et Yang (2002) qualifient l'appréhension des espaces comme un problème difficile à résoudre théoriquement et cependant indispensable à traiter dans la pratique. La gestion des espaces est par ailleurs directement reliée à la planification des travaux. Et de la même manière qu'il est difficile d'obtenir une planification optimale, il sera difficile de définir la meilleure planification des espaces possible.

Les gestionnaires de projet sont donc amenés à planifier les besoins requis en termes d'espaces pour l'exécution des travaux. Selon Mawdesley et al. (2002), cette étape vise à positionner les travaux dans le temps et l'espace dans le but d'optimiser la construction de l'ouvrage. Il s'agit donc d'une étape essentielle qui aura un impact direct sur la durée, les coûts, la sécurité ainsi que d'autres facteurs du projet. Cependant, plusieurs auteurs font le constat que cette partie est souvent négligée par les gestionnaires de projet (Guo, 2002; Riley & Sanvido, 1995). Certains éléments ne sont pas abordés jusqu'à ce qu'ils ne deviennent problématiques pour l'avancement du projet. Bien entendu, les planificateurs de projets expérimentés prennent en considération l'espace requis pour l'exécution des travaux, cependant, ces considérations sont généralement basées sur leur intuition et sont rarement formalisées (Winch & North, 2006).

L'outil traditionnellement utilisé pour la gestion des espaces du chantier est le plan d'installation de chantier. Ces plans sont généralement élaborés par les gestionnaires en début de projet comme outil d'allocation et de gestion des espaces de livraison, de zones de chargements ou encore pour l'emplacement des grues. Cependant Riley et Sanvido (1995) font le constat que ces plans sont bien souvent sous-utilisés. En effet, bien que les gestionnaires créent des plans pour chaque phase, ceux-ci ne définissent souvent pas précisément les zones de stockage ou de circulations. On assiste alors bien souvent à des congestions d'espaces de travail. Les congestions seraient à l'origine d'une perte d'efficacité de l'ordre de 65% selon (Sanders, 1989). Winch et North (2006) constatent aussi un manque de technologie permettant de traiter informatiquement la planification de l'utilisation des espaces.

Plusieurs travaux de recherches ont alors été menés pour apporter des outils décisionnels pour la gestion des espaces des chantiers de construction. Ces travaux abordent généralement la définition des espaces, la prise en compte de leur évolution au cours du temps et la détection et la résolution des conflits spatio-temporels.

1.2.2 Définition des espaces

Plusieurs auteurs se sont attachés à développer des méthodes de planification basée sur une meilleure appréhension des espaces. Un point récurrent dans plusieurs travaux réside dans la séparation du chantier en plusieurs zones de travail dont dépendent les activités du projet. Cependant, la manière de définir ces espaces varie selon les travaux. Certains auteurs se concentrent plus sur l'état des espaces tandis que d'autres s'attachent à étudier le type d'utilisation de ces zones.

1.2.2.1 Définition en fonction de l'état d'occupation

Winch et North (2006) ont abordé la définition des espaces dans l'optique qu'elle soit utilisable pour n'importe quel type de travaux. Leurs travaux se concentrent sur les espaces requis pour

l'exécution des travaux, les espaces de stockage et de circulations sont alors décrits en fonction de leur état. Winch et North (2006) identifient cinq types d'espaces différents (figure 1.12) :

- l'espace total ;
- l'espace produit. C'est l'espace occupé par l'élément fini (par exemple un mur) ;
- l'espace des installations. Il s'agit de l'espace occupé par les installations du chantier, les aires de préfabrication et les plateformes d'accès ;
- l'espace disponible ;
- l'espace requis.

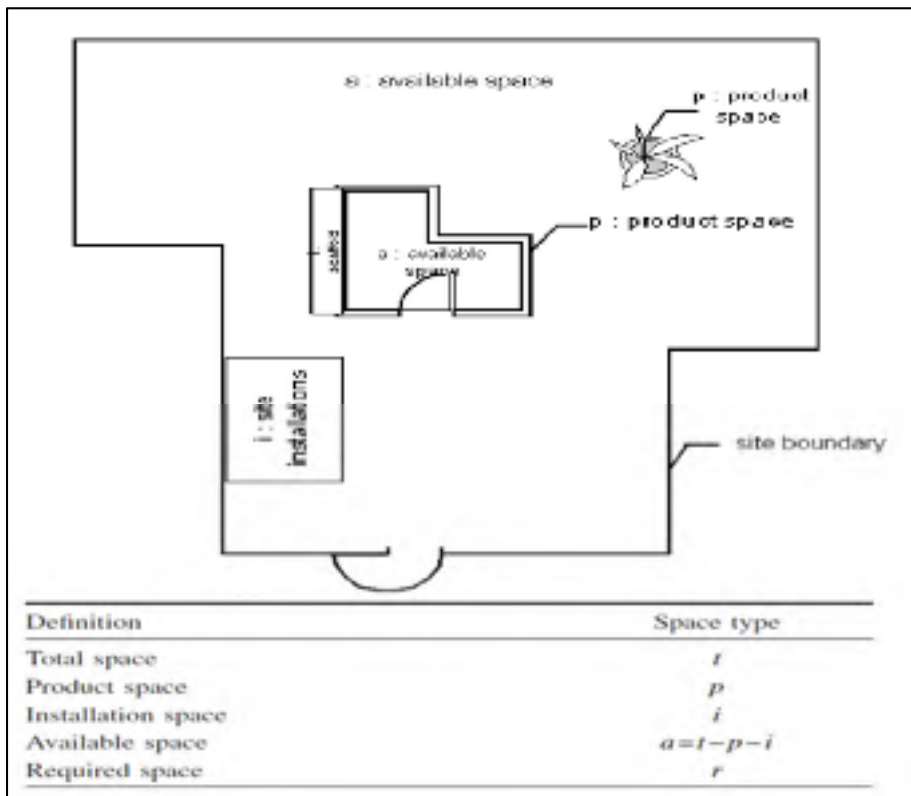


Figure 1.12 Les différents types d'espace définis par Winch et North
Tirée de Winch et North (2006, p. 474)

1.2.2.2 Définition en fonction du type d'utilisation de l'espace

Les travaux de Riley et Sanvido (1995) définissent les espaces d'une manière plus précise voir figure 1.13. Premièrement, ils définissent trois familles d'espaces différentes reflétant leur

état ; les espaces libres (1), les espaces occupés par les processus de fabrication des ouvrages (2) et les espaces occupés par le produit fini (3).

Ensuite ils définissent douze types d'espaces différents pour la famille d'espaces occupés par les processus de fabrication :

- **espace produit** : Qui représente l'espace qu'occupera le produit une fois l'activité terminée ;
- **espace de déchargement** : Espace occupé par le déchargement des matériaux ;
- **chemin d'acheminement des matériaux** : Espace nécessaire pour la circulation des matériaux des zones de déchargement vers les espaces de travail ;
- **zone de dépôt** : Espace requis temporairement pour déposer les matériaux près des zones de travail ;
- **zone de circulation du personnel** : Chemin emprunté par le personnel pour réaliser les travaux ;
- **espace de stockage** : Espace nécessaire au stockage des matériaux jusqu'à leur utilisation ;
- **zone de préfabrication** : Espace utilisé pour préparer, assembler les matériaux avant leur installation ;
- **espaces de travail** : Espace nécessaire à la réalisation de l'ouvrage ;
- **espace équipement** : Espace occupé par les équipements qui assistent les équipes dans la réalisation des travaux ;
- **chemin d'évacuation des déchets** : Espaces utilisés pour évacuer les déchets résultant de la réalisation des travaux ;
- **zones de danger** : Espace inutilisable pour assurer la sécurité du personnel ;
- **zones protégées** : Espace dédié à la protection des produits.

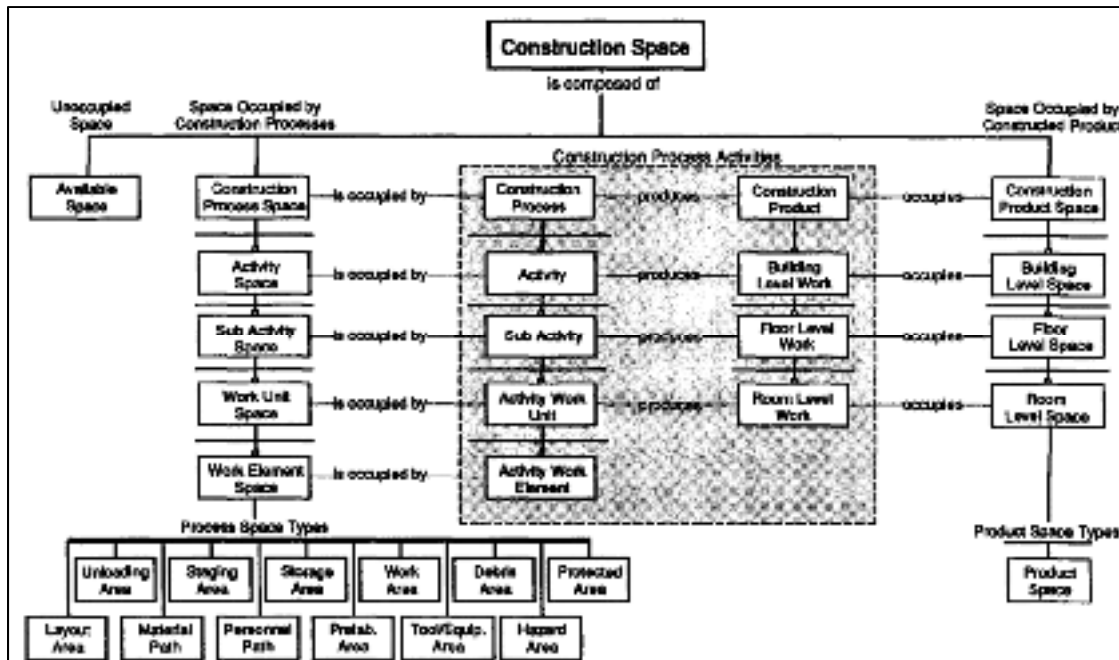


Figure 1.13 Décomposition des espaces de construction
Tirée de Riley et Sanvido (1995, p. 466)

Afin d'offrir plus de précisions, les processus de construction peuvent être subdivisés en sous-activité à l'échelle du bâtiment, de l'étage ou de la pièce où se situent les travaux.

1.2.2.3 Définition en fonction des besoins des intervenants

Francis (2004, 2013 et 2016) divise le site de projet en différentes zones et attribut une couleur claire distincte à chaque zone. Les emplacements des équipes de travail pour exécuter les activités sont considérés comme des attributs de ces zones de travaux. Des couleurs foncées ont été choisies pour identifier les différentes équipes de travail et des textures ont été choisies pour définir les types d'activités. Les gammes et nuances de couleurs claires et foncées et les attributs ont été déterminés par un Protocol graphique (Francis & Ardila, 2015). Frandson et Tommelein (2014) ont développé un système de planification basé sur le Takt-Time (voir figure 1.14). La productivité des activités est alors fixée pour répondre au besoin du client. Ce système vise la création de calendriers de production pour les travaux de construction. Leur système implique alors une forte collaboration avec les sous-traitants. Ceux-ci sont tous rencontrés un par un et plusieurs fois afin d'identifier les besoins de chacun pour atteindre la

productivité désirée. À la suite de ces rencontres, les planificateurs découpent le projet en différentes zones qui serviront de base pour l'étude de l'enchaînement des activités. Cette méthodologie a été éprouvée lors de la rénovation d'un étage d'hôpital en service.



Figure 1.14 Découpage de l'étage avec l'utilisation du Takt-Time
Tirée de Frandson et Tommelein (2014, p. 1650)

1.2.3 Évolution des espaces au cours du temps

Les parties précédentes montrent que l'évolution des espaces sur les chantiers de construction de bâtiment est un processus hautement dynamique et complexe à décrire théoriquement. En effet, d'une part la taille et le nombre des espaces sont contraints à l'avancement des travaux et d'autre part leur évolution suit des comportements différents (Su & Cai, 2014). Les espaces mobilisés pour un même processus de construction peuvent par ailleurs varier selon le mode de production choisi.

1.2.3.1 Différentes possibilités d'occupation de l'espace pour une même activité

Les travaux de Riley et Sanvido (1995) présentés dans les parties précédentes tiennent compte des différentes possibilités d'utilisation de l'espace pour un même processus de construction. En effet la mobilisation de l'espace au cours du temps peut varier pour une même activité selon

plusieurs facteurs. Par exemple, l'espace, la taille et le temps de mobilisation des espaces de stockage d'une activité peuvent varier selon si l'on choisit de stocker les matériaux à chaque étage d'un bâtiment où à l'extérieur de celui-ci. De plus, selon la solution choisie, la mobilisation d'espace pour la circulation des matériaux est différente. Ces différentes considérations vont donc avoir un impact direct sur l'évolution de l'espace mobilisé pour la réalisation des activités.

Le comportement de chacun des 12 types d'espaces définis précédemment (Zone de stockage, chemin de circulation, espace de travail...) peut alors se décrire par des sous-ensembles comportementaux (entre trois et six sous-ensembles selon les types d'espaces). Par exemple, pour les aires de préfabrication, il y a trois sous-ensembles comportementaux ; aires de préfabrication à l'échelle de la pièce (1), à l'échelle de l'étage (2) ou à l'échelle du bâtiment (3). Pour les espaces de travail, six sous-ensembles comportementaux sont identifiés, voir figure 1.15. Par exemple, certaines activités vont être réalisées par un enchaînement linéaire des travaux, d'autres pourront s'exécuter avec un enchaînement horizontal ou vertical.

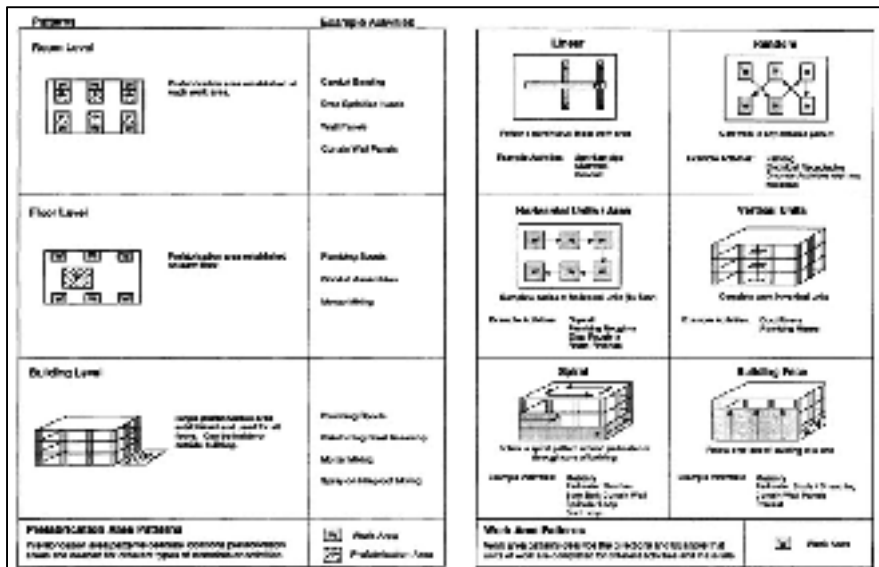


Figure 1.15 Sous-ensembles comportementaux pour les aires de préfabrication (à gauche) et les espaces de travail (à droite)
 Tirée de Riley et Sanvido (1995, p. 467)

1.2.3.2 Évolution physique des espaces au cours du temps

L'évolution physique des espaces varie selon le type d'activité. Plusieurs recherches se sont attachées à créer des modèles permettant d'étudier ces différentes possibilités d'évolution.

Suite à l'étude de plusieurs projets de construction, Riley et Sanvido (1995) ont observé que le comportement des différents espaces présentait des similitudes pour les différents projets. Ils ont alors dressé un modèle comportemental, voir figure 1.16, pour décrire l'évolution physique des espaces au cours du temps. Par exemple la division d'un espace en installant des cloisons va transformer un espace en plusieurs nouveaux espaces plus petit. Ce qui impactera les espaces de circulation. Les éléments de ce modèle comportemental sont présentés dans la figure 1.16.

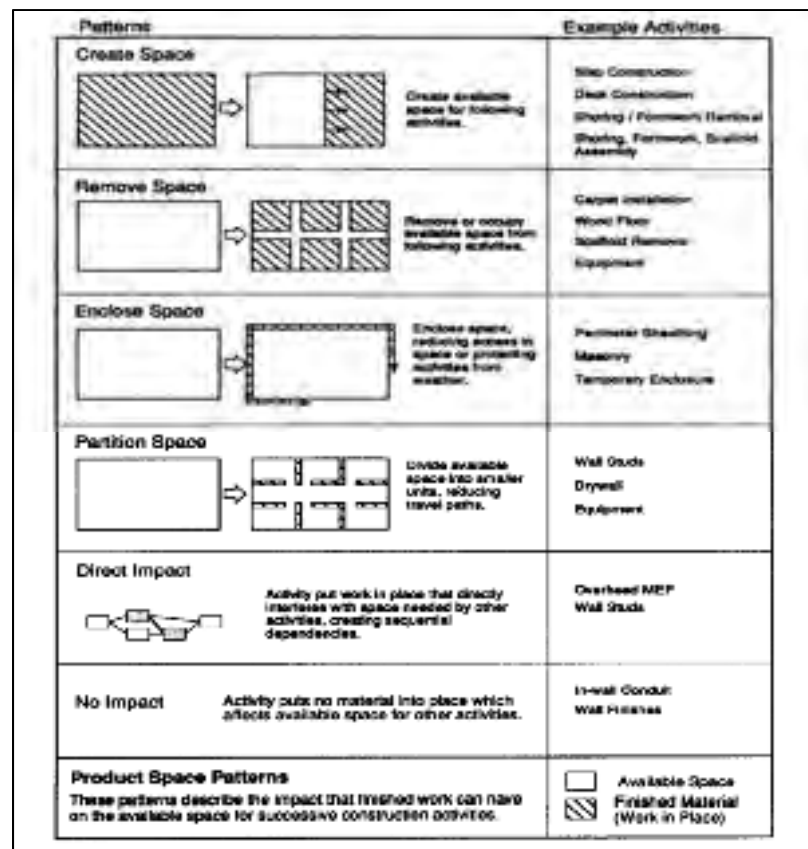


Figure 1.16 Évolution des espaces
Tirée de Riley et Sanvido (1995, p. 468)

Su et Cai (2014) ont développé une méthode basée sur l'étude du cycle de vie des espaces mobilisés par les activités de construction, voir figure 1.17. Leurs travaux se basent sur le constat que pour chaque produit fini, le besoin en termes d'espace va varier en fonction des différentes étapes de sa réalisation. Par exemple pour un mur, un certain espace est nécessaire pour l'installation du coffrage par les ouvriers et le coulage. Par la suite, pendant le temps de séchage, l'espace mobilisé est réduit, puis augmente à nouveau pour le démontage du coffrage avant de devenir uniquement l'espace produit c'est-à-dire le mur.

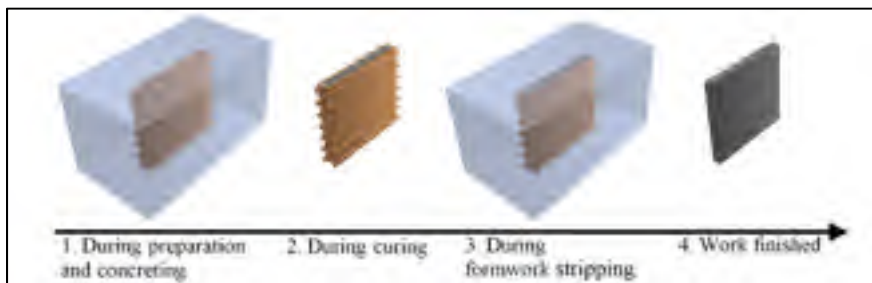


Figure 1.17 Cycle de vie des espaces mobilisés par la réalisation d'un mur
Tirée de Su et Cai (2014, p. 3)

La méthode de Su et Cai (2014) nécessite donc d'identifier les activités nécessaires à la réalisation de chacun des produits de l'ouvrage ainsi que les espaces nécessaires à leurs réalisations.

Zoueïn et Tommelein (2001) ont aussi pris en considération que le besoin en espace pour une activité évolue au fur et à mesure de sa progression. Ils ont alors décrit quatre profils pour décrire l'évolution de l'espace mobilisé par une activité au cours du temps :

- **profile A** : Diminution de l'espace requis en fonction de la progression de l'activité. Par exemple, la diminution des stocks de matériaux dès lors qu'ils sont utilisés pour réaliser les activités ;
- **profile B** : Mobilisation constante d'un espace en raison de la fluctuation. Par exemple pour un espace de stockage de matériaux dont l'utilisation est continue au cours de la progression (briques, ciment...). De multiples livraisons au cours de la progression du

- chantier vont faire varier l'espace de stockage entre un minimum et un maximum de manière relativement constante ;
- **profile C** : Mobilisation constante d'un espace en fonction de la progression des travaux. Par exemple, la mobilisation d'un espace par les équipements comme les grues ;
 - **profile D** : Mobilisation constante d'un espace indépendamment de la progression des travaux. Par exemple, les bureaux, vestiaires, etc.

1.2.4 Détection des conflits spatio-temporels

Plusieurs approches ont donc été envisagées pour définir les espaces et leur évolution au cours du temps. Chacune de ces méthodes est ensuite complétée par un processus de détection des conflits spatio-temporels afin d'optimiser la réalisation tout en évitant le risque de congestion durant les travaux.

La méthode de planification développée par Winch et North (2006) intitulée « Critical Space Analysis » est destinée à analyser, optimiser et visualiser l'occupation des espaces de travail. Pour cela, ils se basent sur l'utilisation d'un ratio qui divise l'espace requis par l'espace disponible pour la réalisation d'une activité. Ainsi une valeur de ce ratio supérieure à 1 traduit une congestion de l'espace de travail. Les tâches critiques sont alors celles dont ce ratio est le plus proche de 1. À la différence de la méthode CPM, le facteur qui détermine si l'activité est critique n'est donc plus le temps, mais l'espace nécessaire. Pour chaque activité de l'échéancier, le taux d'occupation de l'espace (« appelé Spatial Loading ») est alors calculé. Les tâches critiques sont alors identifiées.

Spatial loading	$s = (r/a) \cdot 100$
Spatial overload	$s > 100$
Spatial slack	$a - r$ (where $s < 100$)
Critical space	$s = 100$

Figure 1.18 Identification des tâches spatialement critiques
Tirée de Winch et North (2006, p. 474)

Les espaces sont alors définis pour l'ensemble des activités puis un logiciel calcule le ratio et indique grâce à un système de couleur si les espaces sont surchargés, sous-utilisés ou optimisés.

Les travaux réalisés par (Frandsen & Tommelein, 2014) évoqués précédemment se basent sur l'utilisation d'une représentation linéaire de la planification pour détecter les conflits. Une fois les différentes zones identifiées grâce à la collaboration des gestionnaires et des sous-traitants, un LOB (Line of balance) est réalisé pour déterminer l'enchaînement des activités dans chacune de ces zones. La représentation LOB, voir figure 1.19, permet de représenter graphiquement l'évolution des activités dans chaque zone au cours du temps.

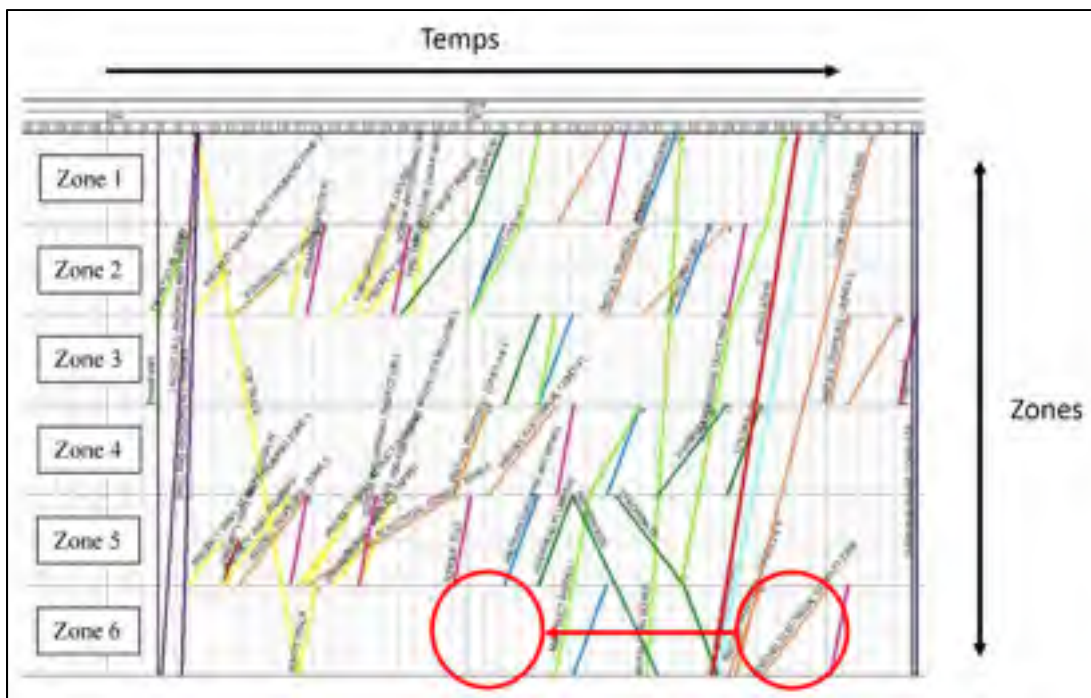


Figure 1.19 Représentation LOB de l'étage
Tirée de Frandsen et Tommelein (2014, p. 1651)

L'utilisation de cette méthode sur la rénovation d'un étage d'hôpital fut un succès, car elle a permis de simplifier la gestion des espaces de travail, elle a même permis d'identifier des opportunités pour gagner du temps sur certains corps d'état. Cependant le processus de planification nécessite un investissement de temps important pour rencontrer chacun des intervenants plusieurs fois.

D'autres approches se basent sur la modélisation 2D ou 3D des espaces, une détection de conflits géométrique est ensuite réalisée pour identifier les intersections entre les différents espaces de travail (Chavada, Kassem, Dawood, & Naji, 2012; Staub-French & Khanzode, 2007; Su & Cai, 2014).

1.2.5 Résolution des conflits

La plupart des travaux se concentrent sur la détection des conflits entre les espaces de travail. Cependant peu d'auteurs proposent des méthodologies de résolutions de ces conflits. Chavada et al. (2012) proposent plusieurs solutions d'ordre générales pour aider les gestionnaires de projet dans la résolution des conflits spatiaux temporels :

- ajuster l'échéancier de construction ;
- redéfinir les espaces de travail ;
- changer la direction de progression des travaux. (Changer le point de départ de certaines activités) ;
- une approche hybride mélangeant les trois approches différentes.

Winch et North (2006) proposent eux aussi dans leur méthode du « Critical Space Analysis » différentes possibilités pour supprimer les congestions d'espace. Ils proposent aux gestionnaires de résoudre les interférences entre les espaces soit manuellement, soit automatiquement par l'utilisation d'un algorithme.

1.2.6 Analyse et discussion

Cette partie présente plusieurs approches envisagées pour apporter de meilleures possibilités de gestion des espaces sur les chantiers de construction. La manière de définir les espaces ainsi que leur évolution durant la construction peut varier selon différents facteurs. Certains travaux proposent une définition des espaces en fonction de leur état d'occupation, de leur type d'utilisation ou encore en fonction des besoins des différents intervenants.

La problématique de la gestion des espaces est par ailleurs complexe à traiter en raison du grand nombre d'éléments à prendre en considération (beaucoup de types d'espaces et de comportements différents). Cette complexité a amené les chercheurs à utiliser très tôt les outils informatiques pour automatiser certains processus. Cependant l'automatisation de tout le processus diminue la marge de manœuvre du gestionnaire et oblige une grande rigueur lors de la saisie des données d'entrées.

Un autre point important concerne la modélisation des espaces de travail. Les premiers travaux étaient basés sur une modélisation 2D des espaces ce qui ne permet pas de prendre en considération la hauteur des éléments. Ce qui obligeait à travailler avec plusieurs plans. Avec l'arrivée et l'évolution des logiciels de CAO 3D, les recherches se sont ensuite orientées vers une modélisation 3D des espaces de travail. Ainsi les modèles créés sont facilement interprétables et permettent d'offrir une vision complète du projet. Cependant certains auteurs défendent le point de vue selon lequel le travail en 2D est toujours utile, car l'industrie de la construction travaille actuellement majoritairement avec des plans 2D. Il faut aussi considérer que le partage des responsabilités entre les professionnels n'est pas encore bien défini dans le cas de l'utilisation des maquettes 3D dans la conception des projets, ce qui augmente la réticence envers une utilisation plus accrue de cette technologie. De plus, pour certains éléments la réalisation d'un modèle 3D nécessite plus d'efforts et plus de temps pour peu d'apports en termes de visualisation et de compréhension (Winch & North, 2006).

La modélisation des espaces de travail et de détection des conflits d'exécution sur des modèles 3D a été peu abordée durant cette section. En effet, l'arrivée du BIM et de nouvelles technologies a apporté de grandes avancées dans ce domaine. Plus de détails seront alors fournis dans la suite de ce rapport.

1.3 Le BIM (Building Information Modeling)

Ces dernières années, l'industrie de la construction s'est vue quelque peu bousculée dans ces habitudes en raison de la complexité technique croissante des projets ou encore des nouvelles

réglementations du secteur. Ces enjeux poussent les professionnels de la construction à revoir leurs pratiques pour s'adapter aux nouvelles exigences du secteur.

Le retard de l'industrie de la construction dans l'adoption des TI :

Crotty (2013) dénonce un manque de performance lié au retard de l'industrie de la construction dans l'adoption des technologies de l'information par rapport aux autres secteurs. Selon lui ceci s'explique par le fait que le secteur de la construction n'a pas fait face à une compétition entre les entreprises aussi intenses que dans les autres secteurs tels la banque, l'automobile ou la vente au détail. En effet dans les autres industries, le passage à l'ère digitale a permis d'améliorer les communications, d'automatiser certains processus ou encore d'offrir une meilleure gestion des produits. Taylor et Levitt (2004), expliquent quant à eux que l'industrie de la construction est lente à passer à l'ère digitale en raison du caractère unique des projets de construction. Chaque édifice n'est construit qu'une seule fois tandis que dans l'industrie manufacturière, les processus sont développés pour l'obtention des plusieurs produits identiques.

La fragmentation de l'industrie de la construction :

De nombreux acteurs interviennent au cours d'un projet de construction. L'un des ingrédients clés pour la réussite d'un projet réside dans une bonne collaboration entre les différents intervenants (Liston, Fischer, & Winograd, 2003). Cependant certains éléments empêchent une bonne collaboration entre les différentes parties prenantes. En effet, l'industrie de la construction subit une double fragmentation. Il y a, d'une part, une fragmentation horizontale entre les différentes phases d'un projet ; planification conception, construction... D'autre part, il y a une fragmentation verticale entre les différentes spécialités des acteurs des projets ; ingénieurs, architectes, entrepreneurs... voir figure 1.20. (Rush, 1986).

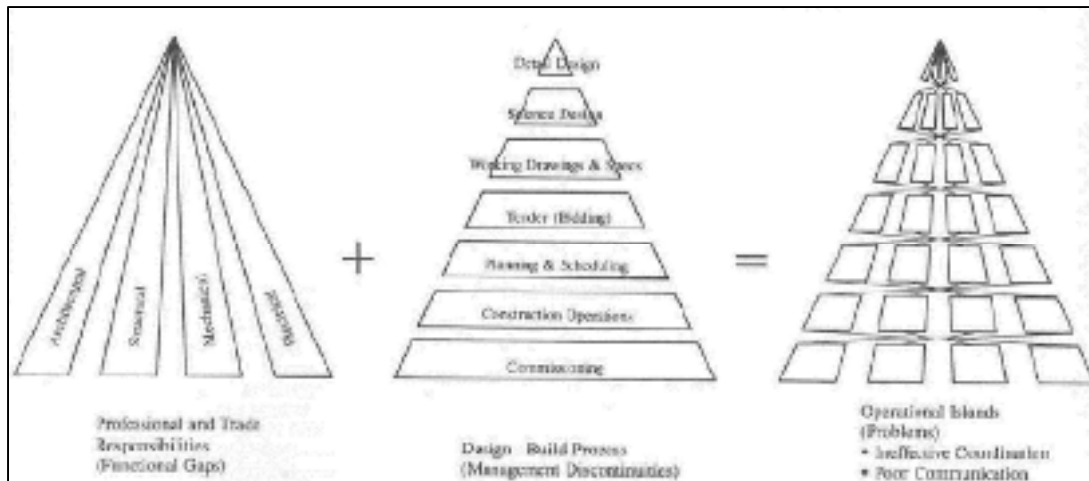


Figure 1.20 Représentation de la fragmentation verticale et horizontale de l'industrie de la construction
Tirée de Rush (1986, p. 266)

Vers des pratiques intégrées :

Les modes d'approvisionnement les plus courants dans l'industrie de la construction en Amérique du Nord sont le « Design-bid-build » et « Design-build ». Eastman, Eastman, Teicholz, Sacks, et Liston (2011) discutent de ces deux modes d'approvisionnement et de leur avis ; le Design-Bid-Build est une forme d'approvisionnement fragmentée, car les concepteurs et les constructeurs ont des contrats séparés. Ce mode de livraison favorise donc le travail en silo et les intervenants ont tendance à poursuivre leurs intérêts personnels plutôt que les intérêts du projet dans sa globalité. Le Design-Build a été développé pour consolider le partage de responsabilité entre la conception et la construction. Ce mode d'approvisionnement semble alors favoriser la collaboration entre les parties prenantes du projet. D'autres modes de livraisons sont apparus pour favoriser l'intégration du processus de livraison. Parmi les plus populaires, on retrouve le mode de livraison « Integrated Project Delivery » qui est basé sur l'intégration de l'ensemble des parties prenantes d'un projet de construction le plus tôt possible et le partage des responsabilités entre tous les intervenants (Matthews & Howell, 2005). Les décideurs doivent donc opter pour des modes d'approvisionnement qui favorisent la collaboration, l'innovation et l'intégration des nouvelles technologies.

1.3.1 La modélisation des informations du bâtiment

1.3.1.1 Présentation

Le terme BIM peut signifier plusieurs choses ; « Building Information Modeling », « Building information Model » ou encore « Building Information Management ». Ces trois significations sont complémentaires pour la définition du paradigme que représente le BIM. D'une part, le BIM se base sur l'utilisation de maquettes numériques représentant le produit. La modélisation de l'ouvrage se fait alors grâce à de nouveaux outils de modélisation qui permettent de rattacher de l'information aux éléments du modèle. Le BIM repose, d'autre part, sur un ensemble de processus qui redéfinissent la manière dont le travail est organisé et les informations échangé entre les différents intervenants et entre les différentes phases des projets de construction (Forgues & Becerik-Gerber, 2013). Dans le cadre d'un projet réalisé avec le BIM, les professionnels sont capables de créer un modèle 3D avec toutes sortes d'informations concernant les spécificités du bâtiment modélisé. La maquette obtenue sert ensuite d'élément central pour supporter les processus de conception, de construction et d'exploitation de l'ouvrage. Chaque intervenant devrait alors pouvoir exploiter la maquette numérique via des outils appropriés à sa spécialité (Pauwels, De Meyer, & Van Campenhout, 2010).

1.3.1.2 Modélisation paramétrique

Les outils de CAO traditionnels définissent les objets d'un modèle d'un point de vue uniquement géométrique. Les objets sont créés à partir de ligne surfaces ou volumes. Les outils de modélisation BIM permettent en plus de générer une base de données rattachée à la géométrie des éléments. Il est donc possible grâce aux BIM de créer des bibliothèques d'objets intelligents capables de stocker et d'utiliser des informations relatives au projet. Par exemple une porte, placée dans un modèle BIM, ne sera plus qu'un simple assemblage de lignes et de surfaces, mais devient un objet intelligent ayant pour hôte un mur ou une cloison et contenant des informations relatives aux matériaux, aux coûts, aux fournisseurs...

Les outils de conception BIM permettent de faire de la modélisation paramétrique. C'est-à-dire que le modèle réalisé ne représente pas des objets avec une géométrie des propriétés fixées. Il représente plutôt des objets en fonction de paramètres et de règles qui vont déterminer la géométrie et les propriétés non géométriques (Eastman et al., 2011).

Les possibilités offertes par la modélisation paramétrique vont bien au-delà de la simple cartographie des relations entre les objets et les assemblages d'une maquette numérique. Le modèle BIM renseignera de plus sur les composants structuraux, la valeur de l'isolation, les matériaux, les coûts... (Hardin & McCool, 2015)

1.3.1.3 Interopérabilité

De nombreux outils informatiques existent pour supporter le travail des différentes spécialités des acteurs des projets de construction. Cependant, il existe une très grande variété de formats utilisés par les différents professionnels. Ceci entraîne bien souvent un effort supplémentaire lorsque les fichiers passent d'un système à un autre.

L'interopérabilité offre la possibilité d'échanger les informations entre différents outils informatiques. Ceci permet d'éliminer le besoin de ressaisie d'information et de faciliter la circulation des flux d'information et rend donc possible l'automatisation de certaines tâches (Eastman et al., 2011). Il y a eu ces dernières années une forte croissance de l'utilisation d'outils BIM dans l'industrie AEC (Architecture, Ingénierie, Construction). Les données fournies par ces outils viennent sous une variété de formats. La plupart de ces formats sont des « formats propriétaires » en raison de la nature commerciale des applications qui les fournissent (Dhillon, Jethwa, & Rai, 2014).

C'est donc dans l'optique de rendre les systèmes interopérables que le format ouvert IFC (Industry Foundation Classes) a été créé par l'IAI (International Alliance for Interoperability) en 1997. L'IAI a depuis changé de nom pour BuildingSMART. Le format IFC est dérivé du STEP (Standard for the Exchange of Product model data) utilisant le format texte (Dhillon et

al., 2014). L'IFC présente les informations de construction grâce à un ensemble de classes prédéfinies. L'IFC est capable de transporter les informations relatives à la géométrie des éléments ainsi que des informations plus réalistes comme les couleurs, les matériaux, les textures ou encore les prix...(Zhang, Yu, Li, & Hu, 2014).

1.3.1.4 L'utilisation du BIM à différentes étapes du projet

Grâce à l'interopérabilité des systèmes, les différents intervenants peuvent exploiter les données de projets BIM à différentes étapes du projet de construction. Le BIM peut être exploité pour les architectes et ingénieurs durant la phase conception grâce à des outils de conceptions et de coordination 3D. Ensuite certaines solutions informatiques proposent des solutions pour l'étude d'autres dimensions telles que le temps, les coûts, le développement durable et la gestion des installations. On parle alors respectivement du BIM 4D, 5D, 6D et 7D. Le BIM peut par ailleurs être utile lors de la conception, de la construction et de la gestion des installations une fois la construction terminée. Ceci est principalement dû à la facilité de la présentation du design (Eastman et al., 2011). Cependant, les solutions informatiques pour exploiter pleinement le BIM à toutes les étapes du projet ne sont pas encore à maturité (Eastman et al., 2011; Froese, 2010). Les solutions envisagées par plusieurs chercheurs sont le développement des « vues métiers » permettant de présenter des collections d'informations utiles pour les différents intervenants (Boton, 2013; Froese, 2010). Grâce à ces « Vues métiers », les différents intervenants pourront alors simplement accéder aux informations dont ils ont besoin et fournir des informations complémentaires et utiles pour les autres intervenants.

Concernant les solutions techniques pour arriver à de tels résultats, Froese (2010) déclare que les outils traditionnellement utilisés (avant l'arrivée du BIM et de l'interopérabilité) ne sont pas adaptés, car leur structure de développement ne permet pas de communiquer facilement avec les autres plateformes du même type. Cependant, ces outils sont amenés à évoluer. D'autre part une nouvelle génération d'outils est apparue pour agir comme un collecteur de l'ensemble des informations fournies par les outils fonctionnant indépendamment. Ces outils

de collecte reposent sur l'utilisation du format IFC qui facilite l'échange d'informations entre les plateformes BIM.

1.3.1.5 La détection de conflit entre les maquettes numériques

L'analyse des travaux de Akinci, Fischen, Levitt, et Carlson (2002); Staub-French et Khanzode (2007); Wu et Chiu (2010) indiquent que les conflits en construction peuvent se diviser en deux principales catégories ; les conflits spatiotemporels et les conflits statiques et dynamiques. Les conflits spatiotemporels sont des conflits qui interviendront seulement à un moment précis et concernent les différents espaces d'un chantier de construction (présentés dans la **section 1.2 – La gestion des espaces**). Les conflits statiques et dynamiques concernent les conflits entre les éléments des maquettes numériques du projet.

Les outils BIM de coordination 3D permettent de réaliser des détections de conflits statiques et dynamiques (Wu & Chiu, 2010). Les conflits statiques représentent les interférences entre deux objets statiques du modèle comme un mur et une conduite de ventilation. Les conflits dynamiques concernent des interférences à un moment donné de la construction par exemple entre un mur et une grue ou entre une grue et un échafaudage. Ces types de conflits comprennent les conflits durs (collisions entre deux objets) et les conflits de jeu (distance trop courte entre les objets).

La détection de conflit est l'une des applications du BIM la plus utilisée actuellement étant donné l'enjeu financier et les retards dans les travaux liés aux conflits non détectés et résolus avant la construction. Cependant, les rapports de conflits contiennent généralement un très grand nombre de « faux » conflits et pour l'instant les solutions logicielles obligent l'utilisateur à vérifier manuellement chacun des conflits. Il est donc important de prévoir des stratégies de détection et de résolution d'interférences.

Il est aussi à noter que les outils actuels de détection de conflits 3D se basent sur les éléments géométriques. Si l'on souhaite étudier la détection de conflits entre les espaces du projet, il est donc nécessaire de les modéliser en 3D (Su & Cai, 2014).

1.3.1.6 Analyse et discussion

Le BIM et les outils associés fournissent un précieux support pour structurer la communication des informations des projets de construction entre les différents intervenants. Cependant, beaucoup de travail reste à faire pour développer le cadre légal et les solutions technologiques pour profiter pleinement de cette philosophie. Un important travail reste alors à faire sur le développement de « vues métiers » et sur les formats d'échanges adaptés pour permettre aux différents acteurs d'obtenir toujours plus facilement et de communiquer les informations utiles pour la réalisation de leurs tâches.

Pour éviter d'éventuelles confusions dans la suite du document, voici quelques termes fréquemment employés et le sens de leur emploi.

- **modèle ou maquette numérique BIM** : Il s'agit du modèle numérique du projet auquel sont rattachées les informations du projet. Ce modèle agit comme élément central pour la communication des informations ;
- **outils ou logiciels BIM** : Il s'agit d'outils informatiques qui permettent de créer les modèles numériques BIM ou de structurer l'échange d'information. Ces outils sont capables de générer et de recevoir des données IFC ou interopérables ;
- **processus BIM** : Il s'agit des processus mis en place pour structurer la modélisation et la communication des informations du projet. Ces processus utilisent alors la maquette numérique BIM et les outils BIM comme vecteur de communication entre les différents intervenants ;
- **BIM** : le terme utilisé seul est alors la combinaison des trois autres termes présentés ci-dessus.

1.3.2 Le BIM 4D

1.3.2.1 L'utilisation du BIM pour la planification

Le BIM est reconnu comme une technologie de l'information ayant le potentiel de changer significativement les industries de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction. Bien que de grandes avancées aient été faites, le BIM n'a pas encore atteint son plein potentiel pour la planification des projets de construction (H. X. Liu, Al-Hussein, & Lu, 2015). Plusieurs approches ont alors été étudiées afin d'utiliser les possibilités offertes par le BIM pour améliorer le processus de planification. Certaines se basent sur la génération automatique d'échéancier à l'aide d'algorithmes exploitant les composants d'une maquette BIM (de Vries & Harink, 2007). D'autres approches basées sur la simulation ont été développées. Elles utilisent la simulation à événement discret pour étudier les opérations de construction et l'allocation de ressources entre les activités. Wang, Weng, Wang, et Chen (2014) ont développé une méthode de planification basée sur la simulation. Le processus se base sur l'exploitation des bilans de quantités fournis par une maquette numérique BIM pour évaluer la durée des tâches. Une simulation des opérations de construction est ensuite réalisée ce qui permet de déterminer les durées probables des tâches. L'échéancier est ensuite mis à jour. Une piste largement étudiée est l'utilisation des maquettes numériques BIM pour la simulation 4D de la construction. Cette approche permet de visualiser les contraintes spatiales du projet.

1.3.2.2 La simulation 4D

La 4D consiste en l'association de la dimension du temps à un modèle 3D de l'ouvrage. Le principe de la simulation 4D est de lier les tâches d'un échéancier de construction avec les éléments du modèle 3D via un outil informatique spécialisé offrant une interface 4D (McKinney, Kim, Fischer, & Howard, 1996). Ainsi il est possible de simuler l'état d'avancement du projet à travers le temps. Un modèle 4D se présente généralement sous la forme d'une animation dans laquelle le modèle 3D va prendre forme étape par étape. La figure 1.21 illustre le principe de la simulation 4D.

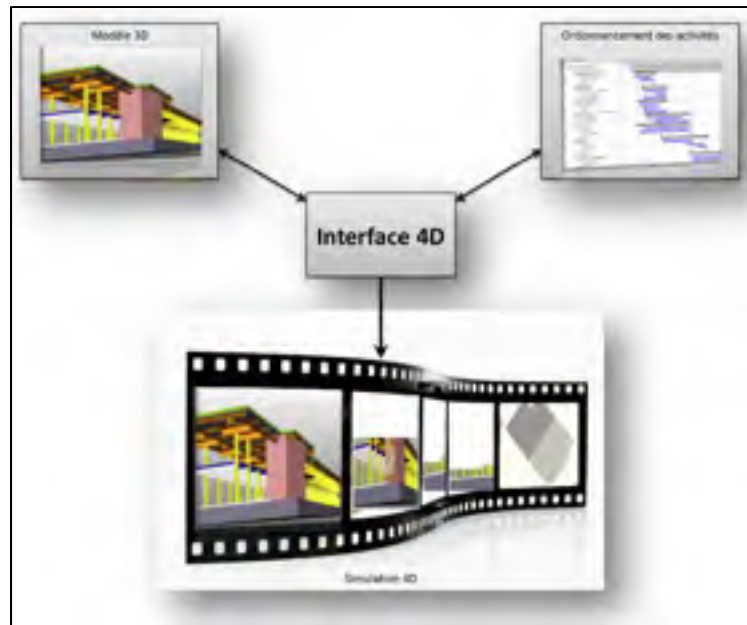


Figure 1.21 Principe de la simulation 4D
Tirée de Boton (2013, p. 72)

1.3.2.3 Évolution du processus de simulation 4D

Bien que des efforts de recherche pour la modélisation 4D aient commencé dès 1973, le premier outil commercial a été disponible en 1984. Cet outil se nomme PM-Vision a été développé par la société CSA (Construction Système Software). Plusieurs plateformes ont par la suite été développées. Tous ces outils n'étaient pas réellement de nouveaux outils, mais plutôt une combinaison de plusieurs outils existants. La modélisation du modèle 3D était par exemple réalisée avec le logiciel Autocad de la société Autodesk et l'animation avec l'Indigo Elan de la société Silicon Graphics (Sheppard, 2004). La simulation 4D nécessitait alors d'une part la préparation d'un modèle CAO 3D à partir des plans 2D et d'autre part la préparation de l'échéancier en se basant sur les quantités issues des plans 2D. Les deux processus se déroulant séparément et étaient exécutés par des intervenants différents (Tulke & Hanff, 2007). La figure 1.22 illustre ce processus de façon plus détaillée.

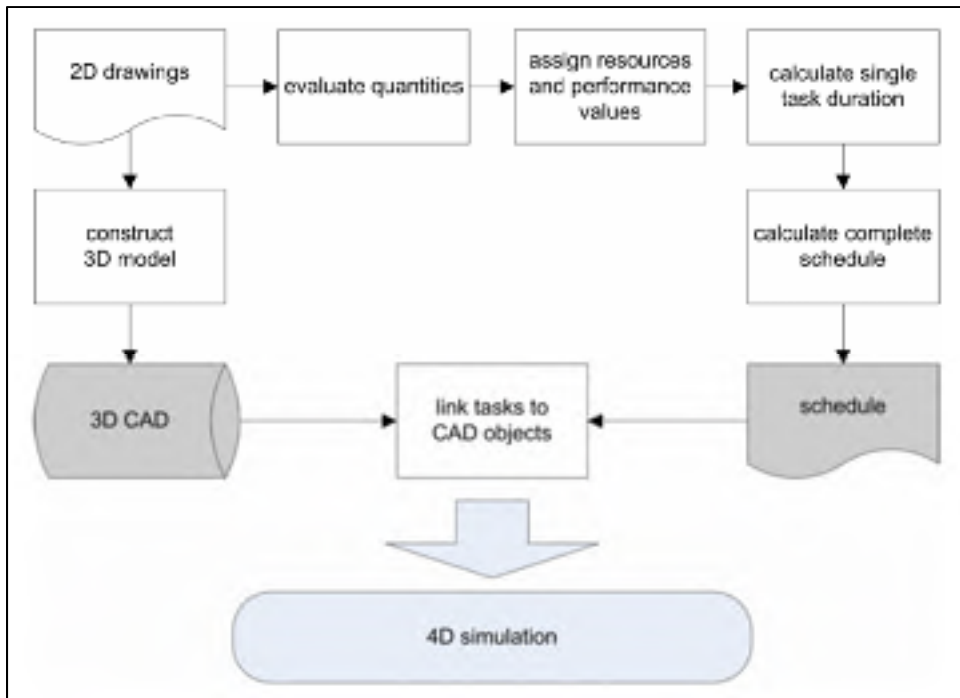


Figure 1.22 Processus de création modèle 4D avant l'arrivée du BIM
Adaptée de Tulke et Hanff (2007)

L'arrivée des outils BIM (outils permettant de rattacher des informations aux objets) a donné un nouvel essor à la simulation 4D. En effet l'évaluation de la durée des activités d'un échancier dépend des quantités et d'autres paramètres tels que les méthodes de construction, le personnel, les matériaux ou l'équipement. Or, un modèle BIM, en plus de contenir la géométrie des éléments, offre la possibilité de rattacher ces paramètres aux éléments du modèle. Une fois la maquette numérique réalisée, elle peut alors assister le planificateur grâce aux informations quantitatives et qualitatives qu'elle contient. Le processus de réalisation du modèle 4D est donc modifié ; dans un premier temps le modèle 3D BIM sera réalisé, il servira ensuite de base pour la planification et une fois celle-ci terminée, le modèle 4D sera créé. La figure 1.23 illustre la modification du processus de montage du modèle 4D par rapport aux processus précédant l'arrivée du BIM, illustré dans la figure 1.22.

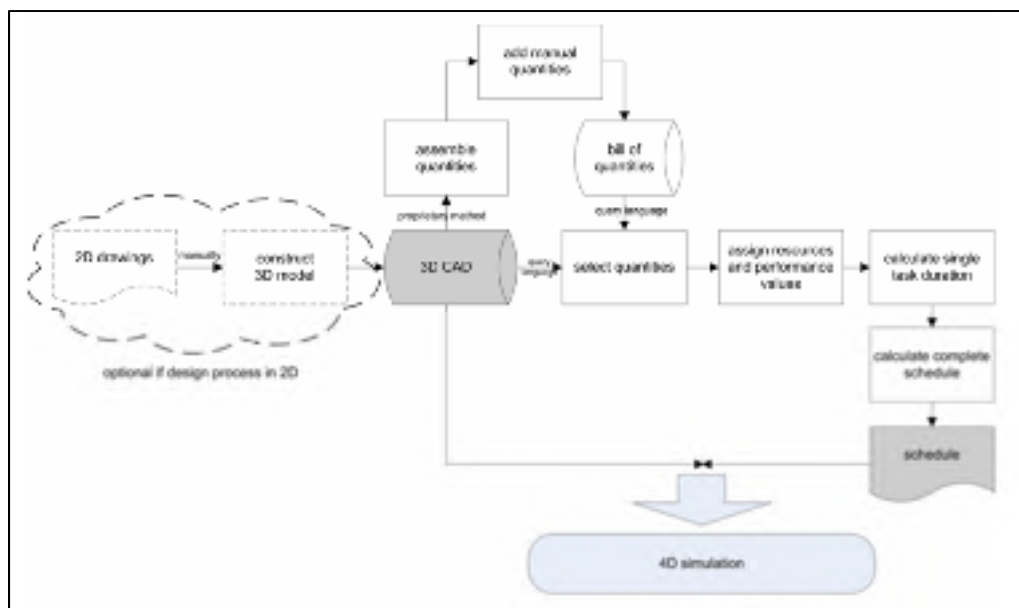


Figure 1.23 Processus de création d'un modèle 4D dans un contexte BIM
Adaptée de Tulke et Hanff (2007)

D'autre part, selon McKinney et al. (1996), les premiers outils de simulation 4D de la première génération n'étaient pas forcément pensés pour supporter la collaboration.

Avec l'essor du BIM, la nouvelle génération d'outil de 4D est marquée par son caractère collaboratif et interactif rendu possible notamment grâce au format d'échange IFC. Il s'agit d'ailleurs d'un des arguments de ventes phares des créateurs de ces logiciels (Boton, 2013). Les possibilités offertes par le BIM pour l'échange d'informations ont apporté 5 avantages pour les systèmes de construction virtuelle comme la simulation 4D (Zhang et al., 2014) :

- les systèmes de construction virtuelle peuvent adopter des modèles 3D conçus par des architectes et ingénieurs dans des logiciels de conception. Ainsi il est possible d'obtenir précisément les informations géométriques et spatiales. Les efforts de modélisation de la construction virtuelle sont alors largement diminués ;
- il est possible de partager les informations de calendriers et de coûts issus des logiciels de planification et d'estimation en passant par des fichiers IFC ;
- l'amélioration des rendus dans les outils de construction virtuelle grâce au partage d'informations réaliste via l'IFC ;

- l'amélioration de l'interopérabilité des outils de construction virtuelle ;
- une fois le projet terminé, le modèle peut être intégré dans l'information de réalisation de projet. Ce qui augmente encore l'intérêt du BIM en phase post-construction.

1.3.2.4 Avantages de la simulation 4D

L'appréhension des contraintes spatiales :

La simulation 4D permet de visualiser le modèle 3D à chaque étape de l'avancement prévu des travaux, il s'agit donc d'un outil qui permet de prendre en considération les contraintes spatiales du projet de construction. Dans un échancier de construction, les activités sont généralement identifiées par la combinaison d'une action à réaliser avec un élément (par exemple : couler une dalle). Cependant, l'échancier n'offre pas d'informations sur le contexte spatial ou sur la complexité de la tâche à réaliser. Or dans un modèle 4D, les éléments des projets sont obligatoirement associés à leurs représentations spatiales ce qui permet de solutionner ces limitations (Koo & Fischer, 2000). D'autre part, l'utilisation de la visualisation 4D permet d'optimiser l'utilisation des espaces sur le chantier et d'augmenter la sécurité. En effet, la 4D permet de mieux comprendre l'évolution des espaces de travail, des accès au site, des circulations et des espaces de stockage à travers le temps (Coyne, 2008).

L'optimisation de la gestion des ressources sur chantier :

L'utilisation de modèle 4D permet d'optimiser la gestion de la main d'œuvre, des matériaux et des équipements d'un chantier grâce à l'analyse des conflits entre les équipes de travail et des autres éléments de production (Coyne, 2008). Chau, Anson, et Zhang (2005) ont créé un outil nommé « 4D graphics for construction planning and site utilisation ». Cet outil a été conçu dans le but d'étendre l'utilisation de la simulation 4D à la gestion des ressources et de l'agencement du chantier. La plateforme proposée associe l'échancier du projet avec un plan d'installation de chantier modélisé en 3D. Cet outil couvre alors la planification de la construction, l'analyse des besoins en ressources pour chaque activité, l'évaluation des coûts

ainsi que l'agencement du site. L'outil a ensuite été éprouvé en situation réelle. Les résultats de cette expérimentation ont montré que la simulation 4D peut être utilisée de façon stratégique pour la localisation des équipements, l'étude des temps d'utilisation des grues, la visualisation d'espaces de stockages, la planification de l'utilisation des ressources et l'estimation des quantités (Chau, Anson, & De Saram, 2005).

L'utilisation de la 4D à différentes étapes du projet de construction :

En phase de conception, la création d'un modèle 4D permet d'interroger l'intention de conception, d'analyser la séquence de construction et donc de faire des choix utiles pour augmenter la productivité (McKinney et al., 1996). D'autre part la simulation 4D peut s'avérer très utile pour étudier rapidement différents scénarios. Elle offre donc un support pour les décisions des concepteurs (Coyne, 2008). Une simulation 4D peut aussi permettre au client de visualiser les séquences de construction prévues. Là où les diagrammes Gantt sont plus destinés aux professionnels (McKinney et al., 1996).

Staub-French et Khanzode (2007), ont étudié les possibilités offertes par la simulation 4D lors de la phase d'exécution des travaux. Les avantages de la simulation 4D perçus lors de cette expérimentation furent :

- une meilleure coordination entre les sous-traitants ;
- une meilleure communication des intentions de planification aux équipes ;
- une meilleure communication des flux de travail à travers le temps ;
- une aide pour identifier les problèmes de constructibilité et de séquençage des travaux ;
- la visualisation de l'état des travaux à n'importe quelle étape du projet.

La 4D permet par ailleurs de faire une rétrospection une fois le chantier terminé. En effet il est possible d'étudier les différences entre les échanciers planifiés et les échanciers réels des projets. Ainsi les retards et les gains de temps peuvent être analysés pour accroître l'expérience des planificateurs (Coyne, 2008).

1.3.2.5 Contraintes et déroulement du processus de simulation 4D

Obligation d'avoir une définition claire et précise des objectifs :

La simulation 4D présente donc des avantages pour différents usages et à différentes étapes du projet de construction. Il est donc essentiel de bien déterminer les objectifs que l'on souhaite atteindre avec la 4D, car le niveau de détail de la modélisation 3D ainsi que de la planification vont en dépendre (Staub-French & Khanzode, 2007). En effet le niveau de détail ne sera pas le même selon si l'on souhaite utiliser le modèle 4D pour expliquer le phasage des travaux au client ou si l'on souhaite l'utiliser pour la coordination des travaux du chantier.

Rigidité de la visualisation 4D :

Les outils de modélisation 4D offrent une seule vue contenant le modèle 3D se construisant d'un côté et l'échéancier sous forme de digramme Gantt de l'autre. Une étude Lennert (2012) a été réalisée pour associer une simulation 4D avec une planification linéaire LOB (Line of balance). Cependant, les résultats obtenus n'étaient pas à la hauteur des espérances en raison des problèmes de conversion entre les diagrammes de Gantt et le Line of Balance. L'un des intérêts de la visualisation 4D réside dans le support qu'elle fournit pour la collaboration grâce à son apport visuel. Cependant tous les acteurs des projets de construction ne sont pas forcément à l'aise avec la représentation des plannings Gantt et n'ont pas les mêmes besoins en termes d'informations. Selon Boton (2013), les outils de simulation 4D ne fournissent donc pas un support suffisamment adéquat pour la collaboration. Un effort de recherche est donc nécessaire pour offrir des vues 4D adaptées pour faciliter la compréhension et les échanges entre les différentes parties prenantes des projets.

1.3.2.6 Exemples d'application de la simulation 4D

Processus de simulation 4D pour la coordination des travaux :

Pour réaliser la simulation 4D, il faut disposer d'un modèle 3D et d'un échéancier du projet. Le calendrier de construction doit alors être réalisé en prévision de la modélisation 4D. Staub-French et Khanzode (2007) ont identifié six étapes essentielles à la création d'un modèle 4D détaillé pour la coordination :

- la création de la structure de découpage du projet ;
- l'établissement de la séquence d'installation des systèmes ;
- la réorganisation du modèle 3D ;
- l'affinement de l'échéancier ;
- la création des liens entre les objets 3D et les activités de l'échéancier ;
- l'affinement du modèle 4D.

Lors de l'expérimentation de cette méthode, les recommandations suivantes ont été transmises par les auteurs :

- il faut essayer de réaliser le modèle 3D pour faciliter la simulation 4D afin de limiter les efforts nécessaires pour réorganiser le modèle ;
- il faut mettre à jour les informations dans le modèle 4D très régulièrement, car la simulation 4D n'est utile pour les équipes que quand le travail est en cours donc durant une période de temps très limitée.

D'autre part, la création des liens entre les activités de l'échéancier et les éléments du modèle 3D est un processus qui demande beaucoup de rigueur (Tulke & Hanff, 2007). En effet il est tout à fait possible de relier l'activité « Coulage de dalle » avec les objets représentant les fenêtres dans le modèle 3D.

Processus de simulation 4D développé pour la gestion des sites de construction :

L'outil évoqué précédemment nommé « 4D graphics for construction planning and site utilisation » développé par Chau, Anson, et Zhang (2005) est destiné à la gestion des sites de construction à l'aide de la visualisation 4D.

Le processus de simulation 4D (figure 1.25) pour aider à la gestion des sites de construction est le suivant :

- création des espaces de travail ;
- création du modèle 3D ;
- création du découpage du projet WBS (Work Breadown Structure) ;
- contrôle de l'échéancier avec la visualisation 4D ;
- définition de ressources associées ;
- planification de l'utilisation des ressources.

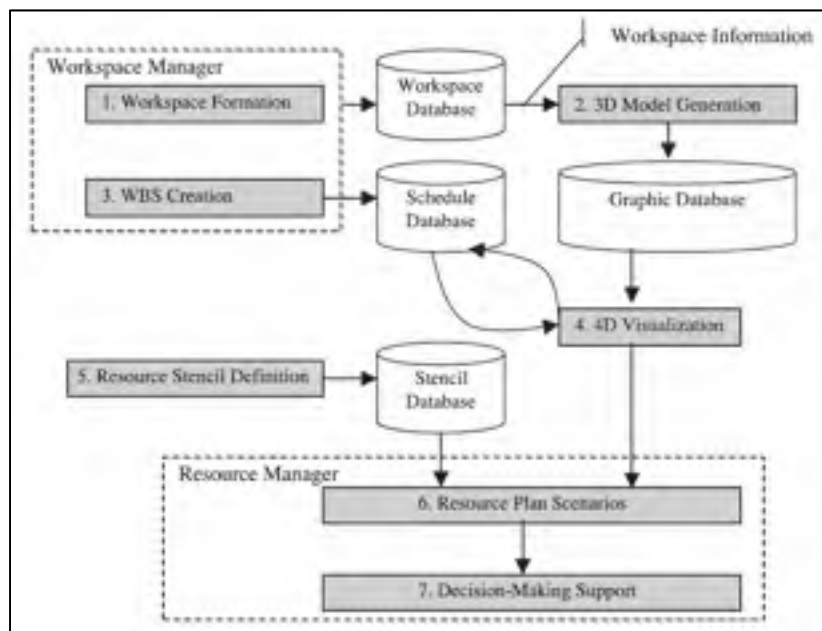


Figure 1.24 Processus de gestion du site avec la simulation 4D
Tirée de Chau, Anson, et Zhang (2005)

Pour supporter ce processus Chau, Anson, et Zhang (2005) ont développé plusieurs applications notamment pour assister la définition des ressources, pour éditer le WBS ainsi que pour la création de l'échéancier.

1.3.2.7 Analyse et discussion

La simulation 4D présente de nombreux avantages en termes de coordination, de communication des séquences de travaux et de l'identification des problèmes de constructibilités. Cependant, la création de modèles 4D reste un exercice rigoureux qui demande des allers-retours entre la maquette numérique et l'échéancier en vue de refléter les perspectives de construction.

1.4 Le Lean Construction et le Last Planner System

Le Lean construction, qui regroupe un ensemble de méthodes de gestion de projet de construction, est inspiré de son homologue dans l'industrie manufacturière : le Lean Manufacturing.

1.4.1 Le Lean Manufacturing

Le Lean Manufacturing tire ses origines du Japon où il a été développé à partir des années 1950 chez Toyota Motor Corporation par Taiichi Onho (Gao & Low, 2014b). La philosophie au cœur de ce concept de gestion de la production consiste à se concentrer sur les gaspillages existant au sein de la chaîne de production dans le but de les éliminer. L'application de cette philosophie a permis à l'entreprise Toyota de réaliser des gains importants en comparaison à l'industrie automobile occidentale. En effet, le Lean permettait alors de produire une plus large variété de produits avec une plus grande qualité tout en diminuant les délais de production, les stocks, les espaces nécessaires ainsi que les investissements (Gao & Low, 2014b).

Ce système repose tant sur un ensemble de techniques de gestion de la production que sur les principes philosophiques qui l'accompagnent. En effet, à la différence des philosophies de gestion occidentales, l'humain est au cœur du système. Par exemple, les ouvriers ne sont plus seulement destinés à appliquer les ordres sans réfléchir, mais sont encouragés à communiquer les défaillances et à proposer des solutions pour améliorer le système de production. Ainsi ils deviennent acteurs de l'amélioration continue de la qualité (Gao & Low, 2014b).

1.4.2 Le Lean Construction

Le succès rencontré par les principes du Lean et les bénéfices perçus lors de son utilisation dans l'industrie manufacturière ont motivé les acteurs de la construction à adopter ces principes (Gao & Low, 2014b). Selon Koskela, Howell, Ballard, et Tommelein (2002), le Lean construction est une manière d'étudier le système de production en minimisant les gaspillages de matériaux, de temps et d'effort dans le but de générer le maximum de valeur ajoutée. Cependant, la mise en pratique des méthodes du Lean dans le secteur de la construction s'avère être un exercice complexe étant donné les grandes différences qui existent entre l'industrie manufacturière et celle de la construction (Gao & Low, 2014b).

1.4.3 Le Last Planner System

Parmi les différentes techniques du Lean construction, celle qui est actuellement considérée comme la plus connue et la plus puissante pour le contrôle de la planification est la méthode du Last Planner System (LPS). Le LPS a été développé par Ballard et Howell en 1992 dans le but d'améliorer la performance des projets de construction en augmentant la fiabilité des plannings. Le Last Planner System peut être compris comme un mécanisme qui transforme ce qui devrait être fait en ce qu'il est possible de faire (Henrich, Tilley, & Koskela, 2005). Ainsi, afin de s'assurer que tous les prérequis nécessaires à la réalisation des travaux sont en place, c'est le dernier planificateur (le plus bas dans la hiérarchie) qui est le mieux placé pour communiquer le travail à exécuté (Gao & Low, 2014a).

Le LPS emploie alors quatre niveaux d'échéancier :

- **l'échéancier directeur (Master Schedule)** qui décrit les principales étapes et jalons ;
- **l'échéancier détaillé (Phase Scheduling)** qui définit les tâches à réaliser par les différents intervenants de chaque phase ;
- **l'échéancier « Prêt à réaliser » (Look-ahead Schedule)** qui décompose les tâches en opération afin de le rendre réalisable ;
- **le plan de travail hebdomadaire (Weekly Work Plan)** où les tâches à réaliser pour la semaine sont sélectionnées parmi celles possibles à réaliser.

Parallèlement à cela, Ballard (2000) définit quatre catégories de tâches à savoir les tâches qui devraient être réalisées (SHOULD), les tâches qui peuvent être réalisées (CAN), les tâches qui vont être réalisées (WILL) et les tâches qui ont été réalisées (DID) (figure 1.25).

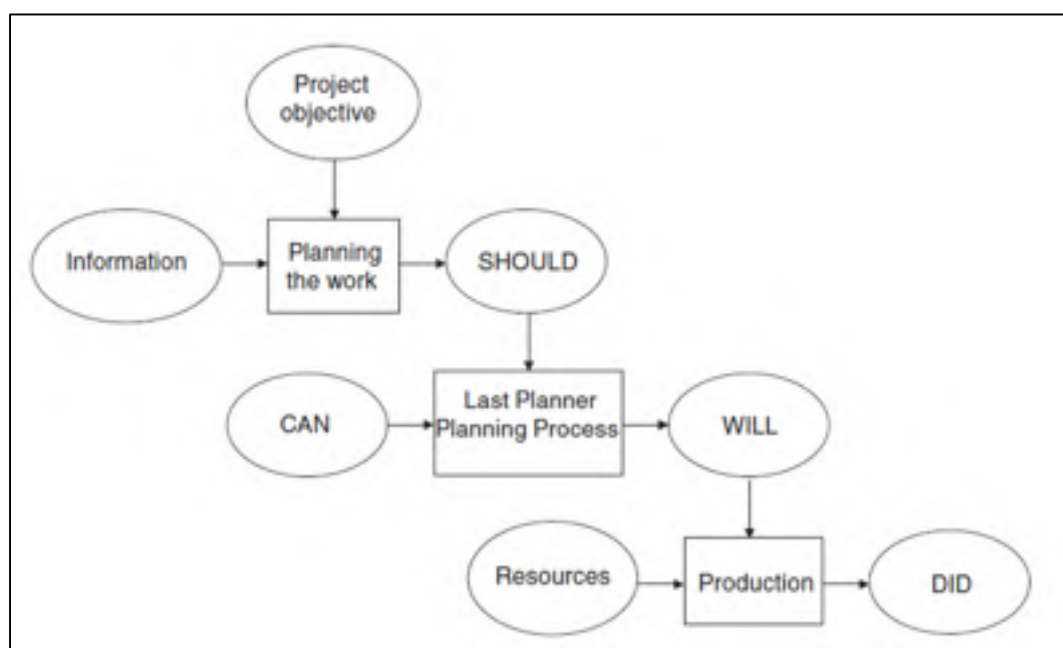


Figure 1.25 Last Planner System
Adaptée de Ballard (2000)

Les échéanciers directeurs et détaillés sont généralement bien réalisés pour les projets de construction. Ce sont les deux dernières décompositions (échéancier « prêt à réaliser » et le

plan de travail hebdomadaire) qui constituent la réelle innovation de ce système de planification.

L'échéancier « prêt à réaliser » est réalisé pour une période de 6 à 8 semaines (Gao & Low, 2014a). Son élaboration poursuit plusieurs objectifs :

- identifier le travail prévu pour les 6 à 8 semaines et rassembler les informations nécessaires à la réalisation des opérations (équipes responsables, matériaux, équipement...);
- établir les relations entre les activités et les ressources ;
- identifier les tâches interdépendantes et déterminer la meilleure séquence de réalisation.

Le plan de travail hebdomadaire sert quant à lui à définir les travaux à réaliser pour la semaine suivante. Ainsi il doit contenir une définition détaillée des tâches afin d'identifier les ressources nécessaires et l'enchaînement des tâches entre les différents corps de métier. Lors de son élaboration, il est donc nécessaire de vérifier que tous les prérequis sont présents. Ainsi il est plus facile de faire face aux incertitudes.

1.4.4 Analyse et discussion

Le Lean construction et le LPS reposent sur l'esprit de pyramide inversée où les intervenants les plus proches des travaux à réaliser sont le mieux à même d'identifier les contraintes et de proposer des axes de résolution. Cette philosophie repose alors sur le besoin d'une importante collaboration pour la création des échéanciers et d'outils adaptés pour l'appréhension des contraintes de réalisation. Bertelsen et al. (2006) déclarent que la méthode du chemin critique est utile pour une planification à long terme (échéancier directeur et détaillé), mais ne permet pas de fournir une solution adaptée pour les moyens et courts termes (respectivement pour l'échéancier prêt à réaliser et le plan de travail hebdomadaire).

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

L'objectif de ce chapitre est de présenter la méthodologie de recherche adoptée pour développer une stratégie d'exploitation du BIM afin d'alimenter la planification Chronographique et produire des simulations 4D. Ce chapitre présente alors les motivations du projet suite à l'étude de la littérature et une synthèse de la démarche adoptée dans le développement de cette stratégie.

2.1 Motivations

La revue de littérature réalisée a permis de mettre en évidence que :

- l'utilisation du BIM permet de centraliser et structurer la communication des informations de projet autour d'une maquette numérique 3D ;
- la collaboration entre le gestionnaire et les équipes de production est nécessaire pour planifier correctement l'exécution des travaux ;
- la simulation 4D fournit un support pour la collaboration, car elle permet de visualiser clairement les séquences d'activités planifiées. Ce qui facilite le contrôle de l'échéancier lors de sa présentation aux équipes de production.

Cependant, l'élaboration d'une simulation 4D reste un exercice difficile, car elle nécessite d'importants efforts pour adapter le modèle 3D et l'échéancier réalisé afin refléter les perspectives de construction. Ceci provient d'une part, des logiciels de conception des maquettes numériques, qui ne sont pas pensés pour résoudre des problématiques de construction, mais plutôt de conception et d'autre part, des méthodes de planification traditionnellement utilisées, qui rendent difficile la considération de certaines contraintes de réalisation telles que les espaces ou encore l'utilisation des ressources.

En effet, les maquettes numériques des logiciels de conception BIM organisent généralement le modèle par système. Organisation intéressante pour l'étude du modèle par les concepteurs. Cependant lors de la réalisation des travaux, les différents systèmes doivent être installés dans différents espaces de travail. La simulation 4D étant destinée à refléter la réalisation des travaux, le modèle doit donc être réorganisé pour refléter l'installation des systèmes dans les différentes zones de travail du chantier.

Les outils de simulation 4D proposent généralement de représenter la planification avec des diagrammes Gantt parfois réalisés avec la logique de la précédence. La représentation Gantt présente cependant des lacunes pour visualiser les contraintes spatiales du chantier. De plus les ressources ne sont que des attributs des activités et la gestion des emplacements sur les chantiers est généralement négligée. Ainsi, la planification est orientée par les activités et non les ressources ce qui ne concorde pas avec la manière de gérer les chantiers de construction des bâtiments. Ces derniers sont planifiés et gérés par l'attribution des équipes aux différentes zones de travail. Par ailleurs, les structures de découpage organisent généralement l'échéancier en fonction des lots. Créer une structure de découpage en fonction de la localisation des activités augmente alors radicalement le nombre d'activités et la lecture et la compréhension l'échéancier avec une représentation Gantt devient dès lors plus compliquée.

Le concept de la planification Chronographique, une approche de space planning, apporte des solutions pour planifier l'exécution des travaux en prenant en considération différentes contraintes d'exécution (espaces de travail, ressources...). Ceci grâce à la possibilité d'alterner entre plusieurs représentations de la planification, chacune permettant d'aider à planifier les travaux en visualisant clairement certaines informations (espaces de travail, ressources...). L'objectif du projet est donc de définir une stratégie d'exploitation des maquettes numériques BIM pour alimenter le concept de planification Chronographique. Ainsi, la planification créée reflètera les perspectives de construction et sera adaptée au montage de modèles 4D facilitant alors le contrôle et la communication des séquences d'activités planifiés.

2.2 Vue d'ensemble de la méthodologie

La démarche de recherche suivie est la suivante :

- analyse des travaux de recherches antérieurs ;
- familiarisation avec la méthode Chronographique ;
 - identification des informations nécessaires à une bonne coordination des travaux ;
 - identification des mécanismes de conception des échéanciers de construction avec cette méthode ;
- analyse expérimentale ;
 - analyse des possibilités d'adaptation d'un modèle BIM en utilisant le logiciel Revit en vue de pouvoir faire une simulation 4D en utilisant les concepts de la modélisation Chronographique. Autrement dit, l'adapter pour qu'il reflète des perspectives de réalisation des ouvrages ;
 - recherche et analyse des possibilités d'échange de l'information entre Revit et l'application de planification Chronographique ;
 - analyse des fonctionnalités du logiciel Navisworks pour réaliser des modèles 4D reflétant les perspectives de construction ;
 - identification des principales étapes d'une stratégie de communication entre ces différents outils ;
- développement d'une stratégie de communication pour l'utilisation conjointe du BIM, de la planification Chronographique et de la simulation 4D afin de planifier l'exécution de travaux de construction ;
 - présentation des étapes de la stratégie de communication ;
 - analyse des besoins pour réaliser ces étapes ;
 - présentation des solutions développées à chacune des étapes ;
- étude de cas ;
 - application de la stratégie sur une étude de cas ;
 - analyse critique de la stratégie.

La figure 2.1 ci-après présente les grandes étapes de recherches :

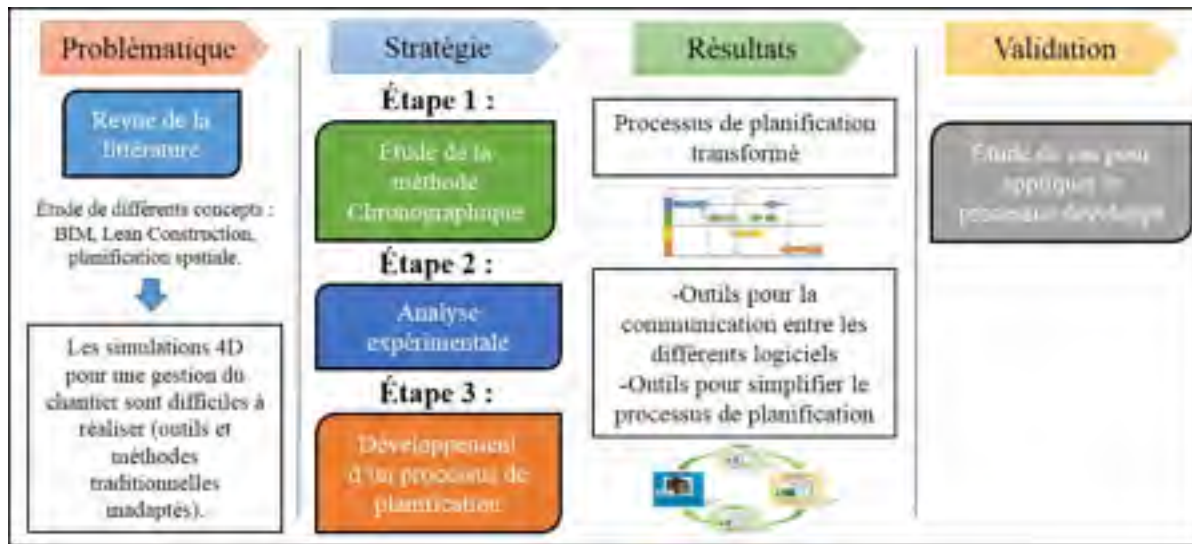


Figure 2.1 Étapes de la recherche

2.2.1 Analyse des travaux antérieurs

Les différents aspects couverts dans la recherche bibliographique visaient l'identification de différentes contraintes des méthodes traditionnelles pour la planification de l'exécution des travaux et les solutions envisagées pour y répondre. Ces recherches ont permis d'identifier les avantages et les limitations des concepts BIM, Lean Construction et de la simulation 4D.

2.2.2 Analyse de la méthode Chronographique

Cette partie présente les éléments du concept de la planification Chronographique. Elle présente la logique de création des échanciers de construction avec cette méthode et illustre les avantages de son utilisation pour l'appréhension des contraintes liées à la réalisation des ouvrages. Cette partie permet alors d'identifier quelles sont les informations manipulées par le concept pour pouvoir étudier par la suite comment exploiter les maquettes numériques BIM pour les obtenir.

2.2.3 Analyse expérimentale

Les logiciels de modélisation BIM et de simulation 4D offrent de grandes possibilités en termes de personnalisation des modèles et d'échange d'information avec d'autres plateformes. L'analyse expérimentale vise donc l'étude de ces deux aspects pour créer un lien avec le concept de planification Chronographique.

2.2.3.1 Objectifs de l'analyse expérimentale :

Les objectifs de l'analyse expérimentale sont :

- étudier les possibilités de personnalisation des maquettes numériques en vue d'une exploitation des informations rattachées par celle-ci pour alimenter le concept de planification Chronographique ;
- identifier les solutions de communication des informations entre les modèles BIM et la modélisation Chronographique de la planification ;
- identifier les mécanismes de modélisation 4D pour refléter les perspectives de construction ;
- identifier les principales étapes d'une stratégie de communication entre les différents outils pour réaliser une planification de l'exécution des travaux.

2.2.3.2 Déroulement de la recherche :

Création d'un modèle BIM :

La modélisation d'une maquette BIM sur le logiciel Revit permet de générer automatiquement un grand nombre d'informations sur les éléments le constituant. Cependant la plupart des fonctionnalités développées sont destinées à obtenir des informations utiles à la conception. L'ensemble des informations que manipule le concept de planification Chronographique ne sont donc pas automatiquement présentes dans le modèle suite à sa création. Les objectifs de cette partie sont donc d'une part d'identifier quelles informations générées automatiquement

pouvaient être exploitées pour la planification Chronographique et quelles sont les possibilités pour ajouter ou obtenir les informations manquantes.

Revue de différents outils pour gérer l'échange d'information avec Excel :

L'un des avantages escomptés avec l'utilisation de Revit réside dans l'interopérabilité du logiciel avec différentes plateformes. L'application de modélisation Chronographique de la planification étant développée en VBA, un autre objectif de cette partie est d'identifier les possibilités d'échange d'information entre Revit et Excel. Cette revue explore ; les fonctionnalités de base de Revit, l'utilisation d'add-in dédiés à l'échange d'information et les possibilités pour traiter cette problématique par la programmation.

Le montage d'un modèle 4D reflétant les perspectives de construction :

La réalisation d'un modèle 4D se fait par la création de liens entre les éléments d'un modèle 3D avec les tâches d'un échancier. La planification Chronographique permet d'obtenir un échancier reflétant le caractère spatial d'un projet de construction. L'objectif de cette partie est donc d'identifier les étapes nécessaires à l'association d'un échancier réalisé avec la méthode Chronographique et le modèle 3D précédemment réalisée.

L'analyse de ces différents aspects a conduit à l'identification des principales étapes pour traiter la planification Chronographique des travaux, à partir d'une maquette BIM et pour réaliser des simulations 4D des séquences de travaux prévus.

2.2.4 Développement de la stratégie de communication

L'objectif de cette partie est donc de construire une stratégie permettant de traiter la planification de travaux de construction avec l'utilisation conjointe d'une maquette BIM, de la méthode Chronographique et de monter un modèle 4D reflétant les perspectives de

construction. Cette partie présente alors les technologies utilisées, les rôles des différents acteurs du projet et les outils et processus développés.

2.2.4.1 Objectifs :

Les objectifs de cette partie sont :

- identifier pour chaque étape les besoins et les bonnes pratiques à adopter en vue des possibilités offertes ;
- mettre en place et développer des outils pour supporter le concept ; notamment pour la préparation de la maquette BIM et l'échange d'informations avec l'application permettant d'appliquer le concept de la planification Chronographique ;
- présenter le flux de travail retenu, planifier l'exécution des travaux et réaliser les simulations 4D.

2.2.4.2 Déroulement de la recherche

Afin de développer la stratégie de communication, l'étude a été divisée en quatre parties reflétant l'utilisation des différents outils retenus lors de l'analyse expérimentale. Pour chacune des parties, une analyse plus poussée des contraintes a été réalisée dans le but de présenter des solutions adaptées à leur appréhension.

1 - Préparation de la maquette numérique :

Cette partie vise la mise en place d'une stratégie pour adapter le modèle BIM en vue de son exploitation pour la méthode Chronographique. Elle présente les informations à ajouter, et les outils développés pour simplifier cette tâche. De plus elle présente les processus de réalisation de cette étape selon si une maquette numérique est déjà disponible ou si l'utilisateur doit réaliser lui-même une nouvelle maquette dans son intégralité.

2 - Échange d'information entre Revit et Excel :

En raison de la nature des différentes informations à échanger et des contraintes des outils actuellement disponibles, la décision a été prise de développer un outil personnalisé pour gérer l'export/import des informations entre Revit et Excel. Cette fonctionnalité se réalise alors par l'intermédiaire d'un fichier Excel servant de base de données du projet. Ce fichier sera ensuite exploitable par l'application de planification Chronographique. Cette partie présente alors la solution développée et les différentes contraintes rencontrées et solutions adoptées lors de sa création. Elle précise aussi comment s'en servir et à quelles étapes du processus.

3 - Exploitation des informations par la méthode Chronographique :

L'objectif de cette partie est de présenter les solutions développées pour exploiter les informations issues du modèle BIM (Base de données) pour planifier le projet avec la méthode Chronographique. Cette partie repose sur l'utilisation d'une version de l'application développée pour appliquer le concept de la méthode Chronographique.

4 - Préparation du modèle 4D :

Cette partie présente la solution retenue pour réaliser le modèle 4D sur la base du modèle BIM adapté et de l'échéancier issue de la planification Chronographique. Plus précisément elle décrit les fonctionnalités de l'outil Navisworks utilisées pour simplifier le montage du modèle 4D.

2.2.5 Étude de cas

2.2.5.1 Objectifs de l'étude de cas

Les objectifs de l'étude de cas sont les suivants :

- appliquer la stratégie de communication développée ;

- effectuer un retour critique sur l'application de cette stratégie.

2.2.5.2 Déroulement de l'étude de cas

L'étude de cas présente l'application de la stratégie de communication sur un projet fictif de construction d'un immeuble de logements. Elle est donc réalisée avec la modélisation d'une maquette BIM, la création d'un échancier avec la méthode Chronographique et le montage d'un modèle 4D en appliquant les étapes de la stratégie de communication développée. Chacune des étapes de la stratégie sera alors analysée.

CHAPITRE 3

LA MÉTHODE CHRONOGRAPHIQUE

Ce chapitre a pour but de présenter le concept de la méthode de modélisation Chronographique de la planification, les informations qui sont manipulées et les avantages à utiliser cette approche pour planifier les travaux de construction.

3.1 Objectifs de l'approche de planification Chronographique

La planification Chronographique a pour objectifs de représenter graphiquement différentes problématiques inhérentes à la réalisation des travaux de construction par les biais de différents angles de vues. Ceci afin d'offrir au planificateur la vision la plus claire et la plus complète possible du projet. Le concept repose alors sur la création d'outils simples et accessibles permettant à l'utilisateur d'appréhender la coordination des activités, les flux de matériaux et de personnel au sein du site de construction ainsi que l'organisation dynamique des zones de travail via des représentations graphiques multiples du projet.

3.2 Définition des éléments du concept

Le concept repose sur la présentation d'informations et d'indications sur le projet au planificateur par l'intermédiaire de différentes représentations graphiques. L'outil développé pour appliquer le concept repose donc sur la définition de plusieurs informations d'entrées. Ces informations vont par la suite être reliées et exploitées dans les différentes vues pour exposer les problématiques de réalisations des ouvrages. Cette partie présente donc : quelles sont les données d'entrée, les aspects logiques qui relient ces données entre elles et les règles d'organisation graphiques sur lesquelles le concept se base.

3.2.1 Données d'entrées

Les différentes données d'entrées sont les informations permettant de tenir compte de différents types de contraintes de réalisation des ouvrages. Le concept définit alors six différents types de données d'entrée. Il s'agit des **activités**, des **matériaux**, des **zones de travail, de circulation et de stockage**, des **ressources**, des **sous-traitants et des fournisseurs** et enfin des **équipements** nécessaires à la réalisation des travaux.

3.2.1.1 Les activités

Ce type de données doit permettre à l'utilisateur de définir une activité de l'échéancier. Il s'agit alors du nom de l'activité et de son code d'identification. Le nom permet de fournir une représentation textuelle claire et le code d'identification de l'activité va permettre d'identifier et de trouver rapidement l'activité au sein de la structure de découpage du projet.

3.2.1.2 Les matériaux

Les matériaux sont à la base même de la réalisation des ouvrages. Le concept a pour but d'aider l'utilisateur à réguler les flux de matériaux sur son chantier. En effet, il est d'une part difficile de stocker efficacement les matériaux sur le chantier et d'autre part il est difficile d'assurer la présence des matériaux en quantité suffisante au moment nécessaire. Ces différents facteurs sont alors souvent à l'origine de retards et de conflits sur le chantier. Le concept propose alors en plus de définir le nom, le code d'identification et le coût des matériaux, de définir différentes informations :

- les caractéristiques physiques : dimensions, poids... ;
- les caractéristiques statiques reflétant les contraintes sur l'espace de stockage : extérieur, intérieur, protégé... ;
- les caractéristiques dynamiques reflétant les contraintes sur le matériel de manutention.

3.2.1.3 Les zones

Le concept de planification Chronographique vise la coordination spatiale des intervenants au sein du chantier de construction. En ce sens, il permet à l'utilisateur de définir un ensemble de zones représentant les espaces de travail, de circulation et de stockage... Bon nombre de retards dans les chantiers de construction proviennent de congestion au niveau de ces différents espaces. Pour éviter ces retards, il convient donc d'étudier l'évolution des différents espaces du chantier au cours du temps. Les différentes données relatives aux zones que manipule le concept sont donc :

Le niveau hiérarchique des zones

Le niveau hiérarchique des zones permet de créer la structure de découpage LBS (Location Breakdown structure) du projet. Le LBS adopté hiérarchise les zones d'un chantier suivant différents niveaux :

- **niveau 1** : Niveau Projet. Permet de différencier les différents projets d'une entreprise ;
- **niveau 2** : Niveau Bâtiment. Différencie chaque bâtiment (ou section de bâtiment) d'un même projet ;
- **niveau 3** : Niveau Étage. Différencie les différents étages d'un même bâtiment ;
- **niveau 4** : Niveau Étape. Permet de différencier les différentes étapes de construction d'un étage. Elles sont au nombre de 5 : Création d'espace, Installation des systèmes, Division d'espaces, Finitions et Fermeture d'espaces ;
- **niveau 5 à N** : Niveau zones. Ce niveau permet de différencier différentes zones d'une même étape afin d'offrir un niveau de précision plus élevé.

C'est à partir du niveau 4 (Étape) que la méthodologie du LBS prend tout son sens. L'utilisateur va avoir la possibilité de définir différentes zones pour chaque étape. Par exemple, le calque « Création d'espaces » aura des zones différentes que le calque « Finition ».

Concernant la visualisation graphique de la planification, l'utilisateur aura donc la possibilité de visionner les activités au travers du LBS créé. Afin de simplifier son utilisation, la hiérarchie des calques correspondant aux différents niveaux du LBS sera représentée sous forme d'un arbre logique contenant les zones créées. La figure suivante illustre le LBS et la différence entre les zones des différentes phases.



Figure 3.1 Illustration du LBS, zones de la phase Création d'espaces (en haut) et de la phase Finition (en bas)

Les limites et dimensions des zones

Les limites sont les contours des zones. Elles vont permettre de définir les contraintes spatiales. C'est ensuite grâce à ces limites que la méthode va permettre de déterminer les conflits d'ordre physique entre deux zones. L'utilisateur peut définir une zone comme étant fermée ou ouverte et définir les points d'accès dans ce dernier cas. Ceci permettra de définir les contraintes de circulation de matériaux et de personnel.

L'état des zones

L'état des zones peut être libre ou occupé. À leurs créations, les zones sont à l'état libre. Ainsi l'utilisateur peut créer des zones sans se préoccuper de leur état ni de leurs occupations futures. Une zone va ensuite passer de l'état libre à l'état occupé soit grâce à l'interaction activité-zone soit par affectation de cette zone comme espace de stockage par le gestionnaire. Dans l'état occupé, plusieurs contraintes peuvent être définies par l'utilisateur :

- **contraintes temporaires.** Elles dépendent de la nature de l'occupation de la zone (activité ou stockage). Elles disparaissent une fois l'occupation de la zone terminée ;
- **contraintes permanentes.** Ce sont les conséquences permanentes de la réalisation d'une activité. Ces contraintes restent après la fin de l'activité.

3.2.1.4 Les ressources

Les ressources humaines tiennent une place importante pour la réalisation des travaux. L'utilisateur va pouvoir, grâce au concept, caractériser les ressources de manière plus ou moins précise en fonction de ses besoins. Les différentes informations relatives aux ressources sont les suivantes :

- le nom de la ressource afin d'identifier de qui on parle. Que ce soit le rôle (ouvrier, plombier...) ou le nom exact de la personne concernée ;
- la désignation de la ressource afin de pouvoir établir des nomenclatures simples des ressources intervenant sur le projet.

Afin de pouvoir gérer les capacités disponibles, il est aussi intéressant de définir le nombre d'heures travaillées par jours et le nombre de jours travaillés par semaines.

3.2.1.5 Les sous-traitants et les fournisseurs

Les sous-traitants occupent bien souvent une place importante dans la réalisation des travaux. Le déroulement des travaux est souvent lié à l'approvisionnement du chantier par les fournisseurs. Ainsi le concept de planification Chronographique propose à l'utilisateur de définir quels sous-traitants et fournisseurs sont impliqués dans les travaux. Des informations comme les coordonnées et les spécialités peuvent être ajoutées par l'utilisateur. Ceci dans l'optique de créer un répertoire des parties prenantes du projet.

3.2.1.6 Les équipements

De la même manière la mobilisation des équipements est un facteur à prendre compte lors de l'exécution des travaux. En effet il arrive souvent que plusieurs activités nécessitent l'utilisation des mêmes équipements au même moment, produisant ainsi des retards d'exécution. Le concept permet alors à l'utilisateur de définir quelques informations utiles à l'affectation des équipements aux différentes activités. Les équipements sont divisés en trois catégories : les opérateurs, les transporteurs et les équipements de manutention. Les différentes données permettant de définir ces éléments sont : un nom, une désignation et leur temps de présence sur le chantier.

3.3 Définition des liens logiques entre les éléments

La partie précédente présente un ensemble d'informations que l'utilisateur peut manipuler avec le concept de planification Chronographique. Ces informations sont bien souvent complémentaires pour la gestion des projets de construction. Par exemple pour la réalisation d'une activité, des ressources, des matériaux ou des équipements vont être utilisés. Cette section détaille donc les liens logiques qu'il existe entre les différentes catégories d'informations décrites précédemment et leurs conséquences sur la productivité, la coordination et l'échéancier.

3.3.1 Liens au niveau de la productivité

Le concept offre la possibilité de renseigner les informations de productivité d'une activité grâce à différents types de liens : liens activités-matériaux, liens activités-ressources et liens activités-équipements.

Liens activités-matériaux :

L'utilisateur a la possibilité de créer un lien entre une activité et les matériaux nécessaires à sa réalisation. Ainsi, en termes de productivité, ce lien peut permettre de préciser une consommation de matériaux à travers le temps. L'utilisateur a pour cela deux possibilités : soit, définir une quantité de matériaux utilisée par l'activité soit d'attribuer une consommation de matériaux par unité de temps.

Liens activités-ressources :

Le lien activité-ressource permet d'attribuer les ressources nécessaires à une activité. L'utilisateur peut alors préciser quel type de ressources il attribue à l'activité et en quelle quantité.

Liens activités-équipements :

La réalisation de certaines activités nécessite que certains équipements leur soient dédiés totalement ou partiellement. L'utilisateur a donc la possibilité d'attribuer l'utilisation d'équipements pour la réalisation d'une activité et pour plus de précisions, de définir un pourcentage d'utilisation de ces équipements. Cela permettra éventuellement de détecter les périodes de surutilisation ou sous-utilisations des équipements.

3.3.2 Lien au niveau de la coordination

3.3.2.1 Coordination au niveau des zones

La création du lien activité-zone à plusieurs conséquences :

- avec la création de ce lien, la zone passe de l'état libre à l'état occupé sur une période donnée. Malgré ce changement d'état, il est toujours possible pour l'utilisateur de préciser si le stockage ou la circulation à l'intérieur de cette zone reste possible ;
- il est possible d'associer plusieurs activités avec des productivités différentes simultanément à une même zone. Dans la limite du nombre d'activités simultanée définie préalablement au sein de la zone concernée ;
- le gestionnaire a de plus, la possibilité de caractériser le comportement des activités au sein de la zone ou entre différentes zones.

3.3.2.2 Coordination au niveau de la sous-traitance

Afin de permettre au gestionnaire d'identifier rapidement et simplement les acteurs impliqués dans la réalisation d'une activité, il lui est possible de créer des liens activités-sous-traitants et sous-traitants-ressources. Ainsi cela permet de créer un registre des parties prenantes complet et efficace. Ce registre permettra d'identifier plus rapidement les personnes auxquelles s'adresser en cas de besoins, permettant ainsi d'être plus réactif dans le cas d'imprévus ou pour la résolution de problèmes.

3.3.2.3 Coordination au niveau des approvisionnements

L'utilisateur a la possibilité de définir si la gestion des approvisionnements en matériaux consommés par une activité doit être réalisée par lui-même ou par le sous-traitant responsable de l'activité. Deux stratégies de gestion différentes en résultent alors pour le gestionnaire du projet. Soit il n'intervient qu'en cas de soutien ou de vérification (gestion par le sous-traitant),

soit il doit établir lui-même le lien avec le fournisseur concerné. Deux types de lien en résultent alors :

- gestion de l'approvisionnement par le gestionnaire : lien matériaux-fournisseur ;
- gestion de l'approvisionnement par le sous-traitant : lien matériaux-sous-traitant.

3.3.3 Lien au niveau de l'échéancier :

L'étude de la littérature démontre que les liens entre activités traditionnellement utilisés (Début-début, Fin-Fin, Début-Fin et Fin début) ne permettaient pas de refléter la réalité des dépendances entre les activités dans certaines situations. Comme détaillé dans la **section 1.1.8 La méthode Chronographique**, la logique de modélisation Chronographique offre une technique d'ordonnement de réseaux graphique à l'échelle du temps plus précise grâce à différents éléments :

- la possibilité de créer des divisions internes dans les activités en fonction de quantités ou de relation internes ou externes à l'activité ;
- la création de liens point-à-point permettant de créer des liens avec les divisions internes des activités. Grâce à des fonctions temporelles connectant les activités sur un ou plusieurs points ;
- l'utilisation de fonctions temporelles dynamiques permettant en plus des décalages écarts entre les activités (et les divisions internes) ;
- l'utilisation de fonctions dynamiques basées sur la production qui permettent de remplacer plusieurs interdépendances internes par une fonction mathématique.

Plus de détails sur ces différents éléments sont présents dans la section 1.1.8.

3.4 Approches de modélisation Chronographique de la planification

Les parties précédentes présentent les différentes informations que manipulait la méthode de planification Chronographique ainsi que les liens entre ces différentes informations pour

assister le travail du planificateur. Cette partie présente maintenant la manière dont les informations et les liens logiques peuvent être visualisés par l'utilisateur.

3.4.1 Représentations graphiques de la planification

La planification Chronographique vise la modélisation des différents éléments (activités, zones, ressources...) présentés dans les parties précédentes. Cette modélisation se fait par l'intermédiaire de différentes représentations graphiques ou tabulaires (A. Francis, 2015). L'utilisateur a la possibilité d'alterner ces différentes vues en changeant les paramètres graphiques. Les différentes représentations graphiques manipulables par l'utilisateur sont alors :

- les séries de tableaux : Les tableaux permettent généralement de caractériser une entité (par exemple les activités) sur un axe et des informations relatives à ces entités sur l'autre (Nom, durée, prédécesseur...). Ils permettent donc de synthétiser des données du projet de manière claire et structurée. Cependant, ils ne permettent pas de présenter la séquence des activités de manière claire, leur utilisation en tant qu'outil décisionnel est donc diminuée ;
- les séries de tableaux croisés dynamiques : Leur utilisation permet de présenter les interrelations entre les différentes données des entités physiques d'un projet ;
- les diagrammes de logique pure : Il s'agit des réseaux d'ordonnancement représentant graphiquement les séquences d'activités sans échelles de temps. Il s'agit par exemple des réseaux à activité sur flèches (ADM) ou à activités sur nœuds (PDM) ;
- les diagrammes temporels : Ce sont les diagrammes permettant de représenter graphiquement la séquence des activités avec une échelle de temps tels que les diagrammes Gantt ou les diagrammes de planification linéaire : line of balance (LOB) ;
- les approches de modélisation Chronographique : Ces vues créées pour supporter le concept sont basées sur une analyse des informations pertinentes et des paramètres graphiques (couleurs, formes, textures) à présenter à l'utilisateur pour prendre en compte les contraintes des opérations de construction ;
- les séries CAD : Qui permettent d'associer des modèles CAD 2D ou 3D avec un échancier de construction ;

- les séries de diagrammes : Les diagrammes fournissent une représentation graphique de certaines données du projet. Il s'agit par exemple de diagrammes à barres, lignes ou colonnes.

3.4.2 Illustrations des avantages de la méthode Chronographique

Le concept de planification Chronographique prend tout son sens lorsque l'on souhaite étudier la coordination des intervenants à travers les différents espaces d'un chantier de construction. En effet, la création d'un échancier de type Gant prenant en compte les différents étages et zones de travail d'un bâtiment obligerait le planificateur à créer un grand nombre d'activités. L'étude de cet échancier nécessiterait donc un grand effort pour établir les liens logiques entre les activités et l'utilisation de divers documents additionnels tels que des plans ou des tableaux seraient nécessaires à son élaboration. De plus, cette représentation ne permet pas d'identifier clairement quelles ressources sont engagées pour la réalisation des ouvrages.

Grâce aux différents liens entre les éléments (activités, zones, ressources...) présentés dans les paragraphes précédents, l'utilisateur va avoir la possibilité de basculer s'il le désire sur des vues complémentaires qui lui permettront d'aborder différentes problématiques.

Voici quelques exemples pour illustrer les avantages offerts par le concept de modélisation Chronographique de la planification :

Représentation temporelle par étage et par lots :

Figure 3.2 Représentation temporelle par étage et par lot

La représentation illustrée dans la figure 3.2 représente les étages et les lots sur l'axe vertical et le temps sur l'axe horizontal. Le nom de l'activité est inscrit dans les barres représentant leur durée. La couleur de ces barres est quant à elle destinée à renseigner sur la zone où se déroule l'activité. L'utilisation d'une telle vue permet alors de visualiser la succession des travaux pour différents lots à travers les différents étages.

Représentation de l'occupation d'un étage pour une période donnée :



Figure 3.3 Représentation de l'occupation d'un étage pour une période donnée

L'utilisateur a la possibilité de sélectionner une période et de visualiser sur un plan d'étage l'occupation des différents espaces (Zones, secteurs...) par les activités prévues. Cette vue fournit alors de précieuses indications pour coordonner l'intervention des intervenants au sein des différents espaces d'un projet. L'utilisation de ces vues peut par ailleurs servir à étudier les espaces dédiés au stockage ou à la circulation de matériaux ou de personnel à différentes étapes du projet. Cette représentation est illustrée dans la figure 3.3.

Représentation temporelle par étages, zones et équipes de production :



Figure 3.4 Combinaison d'un plan d'étage et d'un échancier Gantt modifié adaptée de Prats (2016)

Cette vue (figure 3.4) permet d'illustrer l'intervention de 4 sous-traitants totalisant 6 équipes à travers les 8 zones de 8 étages identiques sur une période de 12 semaines. L'information des zones de travail est visible grâce à la couleur des barres des activités. La légende de ces couleurs est visible sur un plan d'étage avec les différentes zones. Par ailleurs les barres du planning contiennent des informations textuelles qui renseignent sur l'étage et l'équipe en charge de réaliser l'activité. Enfin l'axe vertical regroupe les activités par sous-traitants et l'axe horizontal fournit une échelle temporelle.

3.5 Le protocole graphique de la méthode Chronographique

Le cadre contextuel du protocole Chronographique (Figure 3.5) définit le protocole graphique des entités physiques (de production), de leurs propriétés et des liens logiques qui lient ces entités aux processus d'exécutions.

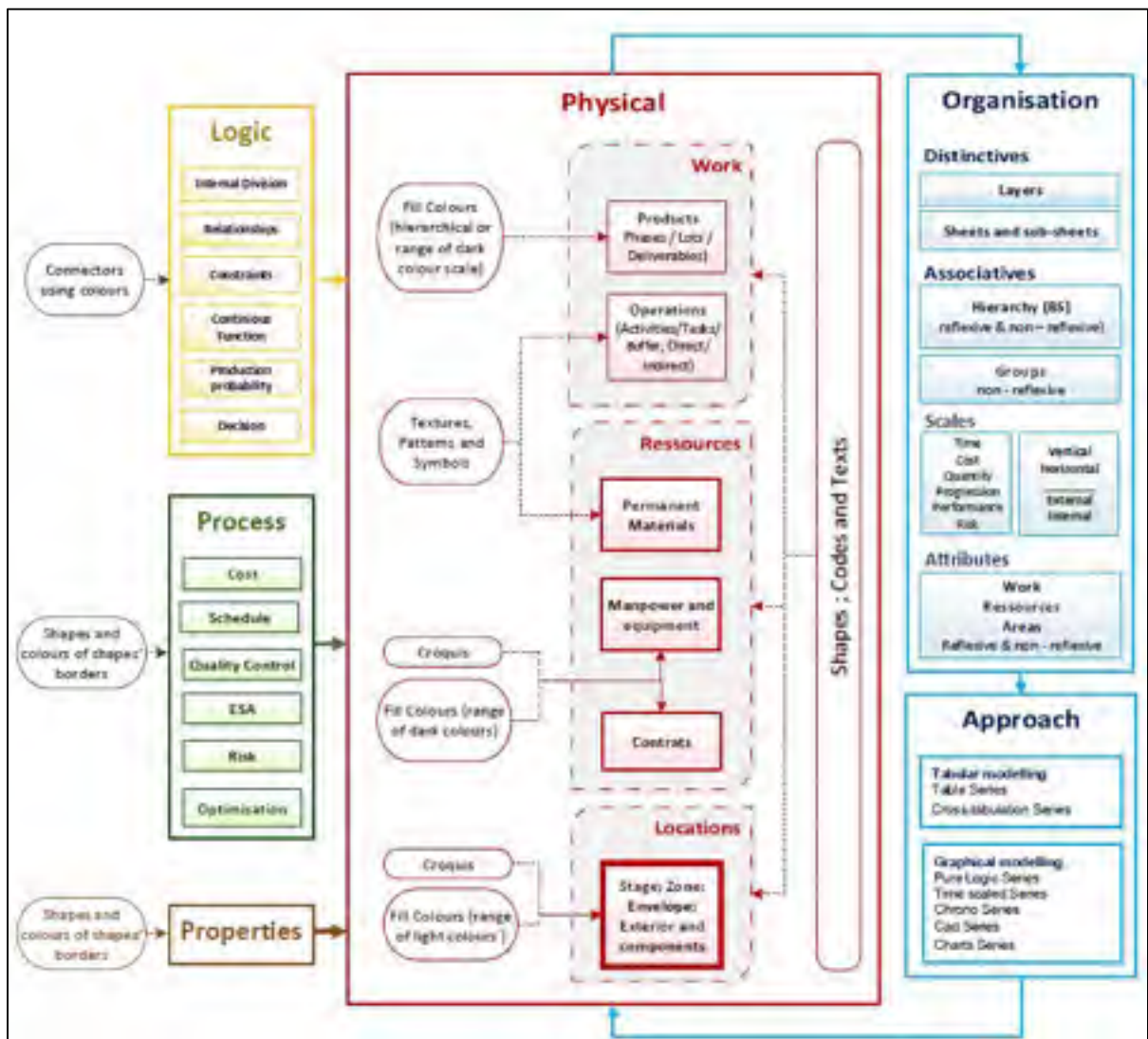


Figure 3.5 Cadre conceptuel du protocole graphique de la méthode Chronographique tirée de Francis (2016a, p. 4)

Les entités physiques sont au cœur du concept de la méthode Chronographique. Elles représentent les éléments nécessaires pour réaliser les opérations de construction. Le protocole

graphique (figure 3.5 et 3.6) définit trois groupes d'entités physiques ; travail, ressources et emplacements, et utilise différentes formes, couleurs, textures, codes et textes pour les représenter graphiquement en même temps.

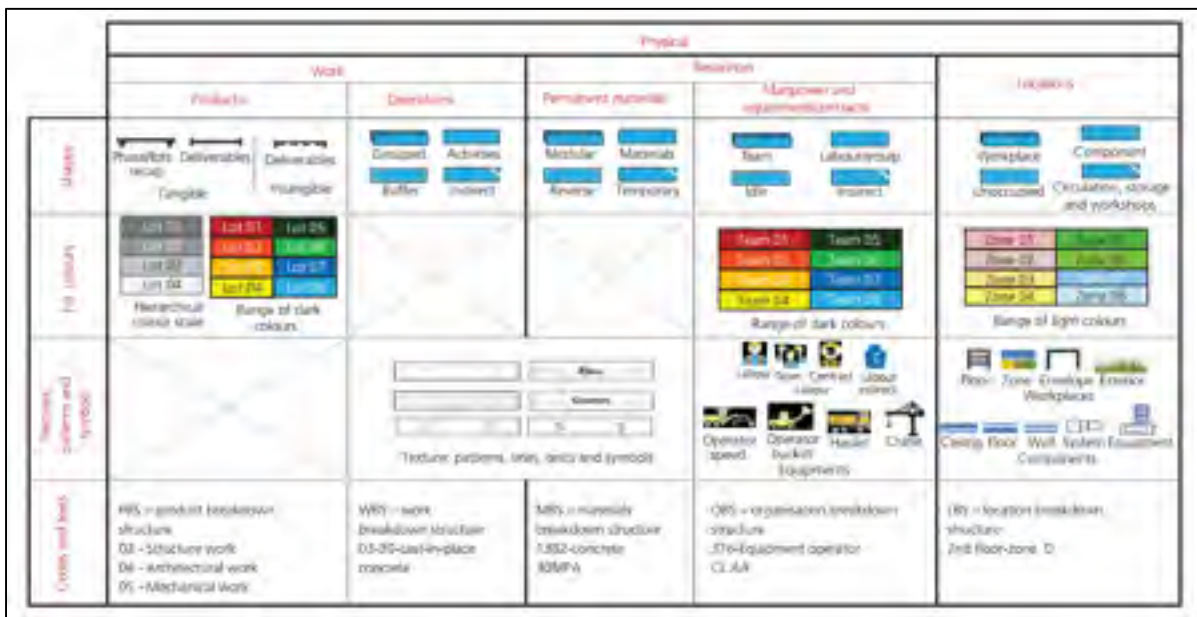


Figure 3.6 Protocole graphique des entités physiques tirée de Francis (2016a, p. 5)

3.6 La méthode Chronographique : un concept en évolution

La section précédente illustre les avantages liés à l'utilisation de différentes vues proposées par le concept de planification Chronographique. Beaucoup d'autres vues sont par ailleurs disponibles, l'un des objectifs des recherches actuelles et futures est même de proposer à l'utilisateur de pouvoir créer des vues personnalisées. Ceci, en sélectionnant les informations qu'il souhaite afficher et les modes de représentations qu'il souhaite utiliser (digrammes temporels, séries de tableaux, plans...).

Différentes recherches actuelles, passées et futures, tentent d'exploiter ce concept pour aborder différentes problématiques. Parmi ces recherches on retrouve par exemple :

- l'exploitation du concept pour la gestion des stocks et de l'approvisionnement (Le Meur, 2016) ;
- l'exploitation du concept pour une gestion dynamique des emplacements de travail et coordonner les tâches et les espaces (Prats, 2016) ;
- l'exploitation du concept pour déterminer le taux d'occupation optimum des différents espaces d'un projet de construction (Francis & Morin-Pepin, 2017) ;
- l'adaptation de la méthode Chronographique a la gestion des coûts.

3.7 Discussions

La méthode Chronographique permet donc de répondre à beaucoup de problématiques pour la gestion des travaux de construction. C'est pourquoi tous les aspects qu'elle couvre ne seront pas étudiés dans ce projet. La présente recherche se concentre sur la coordination des intervenants dans les différents espaces du chantier de construction. Les limitations en termes d'informations manipulées pour la stratégie de communication seront alors présentées dans la section 5.1.2.

Le Last Planer Système (LPS) présenté dans l'étude de la littérature utilise quatre niveaux d'échéancier ; échéancier directeur, échéancier détaillé, échéancier prêt à réaliser et plan de travail hebdomadaire. Pour les deux premiers niveaux, les techniques traditionnellement utilisées sont adaptées, mais pas pour les derniers en raison de leur limite en termes d'appréhension des contraintes d'exécution (Bertelsen et al., 2006). La méthode Chronographique peut alors fournir un support pour réaliser les échéanciers « prêts à réaliser » et les plans de travail hebdomadaire.

Par ailleurs, l'ensemble des représentations graphiques offertes par la méthode Chronographique sont des vues métiers adaptées pour traiter la planification de l'exécution des travaux. La présente stratégie de communication permettra alors d'exploiter les informations des modèles BIM pour alimenter ces « vues métiers ». Et leur utilisation pour réaliser la planification permettra aussi d'enrichir les bases de données rattachées aux modèles BIM.

CHAPITRE 4

ANALYSE EXPÉRIMENTALE

Ce chapitre présente les analyses et expérimentations menées pour utiliser conjointement les maquettes numériques BIM, la méthode Chronographique et la simulation 4D. Ce chapitre présente alors une analyse des outils BIM de modélisation 3D et 4D retenus ainsi que les différentes possibilités de communication avec le progiciel développé pour appliquer le concept de planification Chronographique. Les outils BIM actuels organisent l'information du point de vue de la conception, la méthode Chronographique aborde quant à elle la planification du projet du point de vue de sa réalisation. Les modèles numériques doivent donc être adaptés pour être exploitables par la méthode Chronographique. Ce chapitre a donc pour vocation d'analyser les possibilités pour rendre les maquettes numériques BIM compatibles avec la planification Chronographique.

4.1 Objectifs de l'analyse expérimentale

L'analyse expérimentale a été réalisée avec le montage d'un modèle numérique BIM. Par modèle numérique BIM, on entend un modèle 3D du projet dont les objets sont porteurs d'informations et correspondent à des éléments de construction. Ce qui permet de créer des relations automatiques et intelligentes entre ces éléments.

Les objectifs de cette analyse expérimentale sont :

- comprendre la manière dont est structurée l'information dans les maquettes numériques BIM et étudier les possibilités pour ajouter des informations exploitables par le concept de planification Chronographique ;
- déterminer l'outil (add-in, outil intégré, macro personnalisée...) le plus adapté pour l'échange d'information entre les maquettes numériques 3D BIM et le concept de planification Chronographique ;

- identifier les possibilités pour que l'utilisation conjointe des maquettes numériques 3D BIM, de la simulation 4D et de la planification Chronographique se complètent.

4.2 Réalisation du modèle expérimental

Le modèle expérimental a été réalisé sur la base d'une maquette numérique inspirée d'un immeuble de logement construit à Gentilly (France). Cet immeuble s'inscrit dans un projet de construction de quatre bâtiments de logement sociaux totalisant 121 logements et deux niveaux de stationnements souterrains. Les travaux se sont déroulés de juin 2013 à septembre 2015. L'immeuble modélisé comporte deux cages d'escalier et s'étend sur huit niveaux contenant chacun trois logements.

4.3 Outils utilisés pour la modélisation et la simulation 4D

Le projet a été modélisé à l'aide de logiciel offrant un environnement BIM, à savoir :

- Revit 2015 : Pour l'élaboration du modèle numérique 3D ;
- Navisworks Manage 2015 : Pour l'élaboration du modèle numérique 4D.

Ces deux logiciels ont été retenus, car ils sont tous les deux produits par la société Autodesk et sont actuellement les deux outils les plus utilisés dans le secteur de la construction. De plus ces outils sont développés dans une optique BIM. Ils sont donc interopérables et offrent plusieurs possibilités pour l'échange d'informations avec d'autres plateformes.

Ces deux outils ont été utilisés pour le développement d'une stratégie de communication avec un progiciel conçu sur une plateforme VBA sur Excel pour modéliser la planification Chronographique.

4.3.1 La modélisation 3D

L'objectif du projet est d'étudier les possibilités d'exploitation d'une maquette numérique 3D BIM dans la planification, le suivi et le contrôle de la phase de réalisation des ouvrages. Comme cité précédemment, la modélisation avec Revit est plus adaptée que les outils de CAO de générations antérieures. Le fait que la conception est produite depuis des éléments de construction et non des lignes, comme le cas du CAD, facilite l'intégration avec les échéanciers de construction. Malgré cela, l'utilisation d'une maquette 3D reste un processus couteux en temps et argent. Pour cela plusieurs considérations ont alors été prises pour la modélisation :

- l'aspect architectural du bâtiment a été simplifié ;
- les niveaux 2 à 7 étant des étages répétitifs et leur configuration étant la même, l'effort de modélisation a été limité aux niveaux 1 et 2. Une fois l'étage 2 modélisé et les informations ajoutées, cet étage a été dupliqué sur les niveaux 3 à 7 ;
- une modélisation détaillée des systèmes mécaniques étant relativement complexe et sans valeur ajoutée pour la planification des travaux, les réseaux de canalisation et de ventilation ont été seulement modélisés d'une manière schématique ;
- la modélisation a été réalisée à partir des bibliothèques d'éléments de base du logiciel. Comme cité, il n'est pas nécessaire de modéliser les éléments de détail présents dans le projet, cette activité est considérée comme relativement complexe et sans valeur ajoutée pour la planification des travaux. Plusieurs études sur l'utilisation des modèles BIM pour la planification préconisent de définir un niveau de détail de modélisation adapté à l'échéancier, les modèles doivent donc être réorganisés pour correspondre aux activités d'un échéancier (Eastman et al., 2011; Staub-French & Khanzode, 2007).

Le modèle a été réalisé dans l'optique d'étudier les séquences des tâches en phase de construction. Les éléments modélisés sont donc destinés à refléter les principales disciplines intervenantes lors de la construction. La maquette numérique modélisée contient alors les éléments suivants :

- **structure** : ossature en béton armé (murs et planchers) ;
- **travaux d'isolation** ;

- **mécanique du bâtiment** : Bouches d'extraction et d'alimentation d'air ;
- **systèmes intérieurs** : Cloisons et faux-plafonds ;
- **électricité** : Équipement électrique, luminaires ;
- **plomberie** : Canalisations et équipements ;
- **ouvertures intérieures/extérieures** : Portes et fenêtres ;
- **métaux ouvrés** : Garde-corps ;
- **finitions** : Peinture, revêtement de sols, revêtements extérieurs.

4.3.2 Structure des informations de la maquette numérique

Revit est un logiciel de modélisation paramétrique des projets de construction. En plus de permettre la conception d'un modèle numérique 3D, cet outil permet de rattacher de l'information aux éléments du modèle et de créer un ensemble de règles qui définissent les interrelations entre ces éléments. Grâce à cela, Revit permet d'une part de simplifier la création des modèles 3D et d'autre part de rattacher un ensemble d'informations pouvant être exploité à différentes étapes du projet et par différents intervenants. Revit offre aussi la possibilité d'échanger les informations d'un projet avec d'autres plateformes soit par des liens entre les différentes plateformes, soit par l'intermédiaire du format standard IFC.

L'un des objectifs du projet de recherche concerne l'exploitation des informations numériques pour alimenter le concept de planification Chronographique. Les sections suivantes décrivent la structure de l'information sur Revit et les possibilités de personnalisation de l'information rattachée aux éléments.

4.3.2.1 Hiérarchie des familles Revit

Un modèle Revit est un assemblage d'éléments ayant des propriétés différentes (Nom, dimensions, matériaux...). Afin de simplifier la définition de ces propriétés, les éléments sont placés dans le modèle à partir de **familles**. Ces **familles** agissent comme gabarit en permettant de définir des propriétés communes à un groupe d'éléments. Par exemple, pour un modèle

donné « Ex : Portes » qui sera placé en plusieurs exemplaires dans le projet, certaines propriétés seront identiques pour chaque élément du modèle « Ex : pour toutes les portes » telles que les matériaux ou les dimensions. Ces informations ne seront saisies une seule fois lors de la création de la **famille**. D'autres informations spécifiques à chaque élément pourront ensuite être ajoutées. Par exemple, l'emplacement d'installations.

La structure hiérarchique des **familles** Revit est la suivante (figure 4.1), chaque élément placé dans le modèle est appelé « **occurrences** ». Revit permet de définir des propriétés communes aux différents groupes d'éléments. Pour plus de précision, il existe trois groupes de propriétés :

- les **catégories** : c'est le groupe de propriétés le plus élevé dans la hiérarchie. Les catégories sont par exemple les murs, les portes, les équipements électriques... ;
- les **familles** : c'est un sous-groupe de propriétés plus spécifiques. Par exemple pour la catégorie « Portes » elles permettent de différencier les « portes simples » des « portes doubles » ;
- les **types de familles** : C'est le sous-groupe de propriétés le plus spécifiques. C'est à ce niveau par exemple que les dimensions sont définies pour les « portes simples ».

Toutes les propriétés communes pour une même sorte d'objets sont donc définies dans ces trois groupes de propriétés. Les **occurrences** sont ensuite ajoutées au modèle, en sélectionnant dans les bibliothèques le **type de famille** à partir duquel on souhaite créer l'objet.

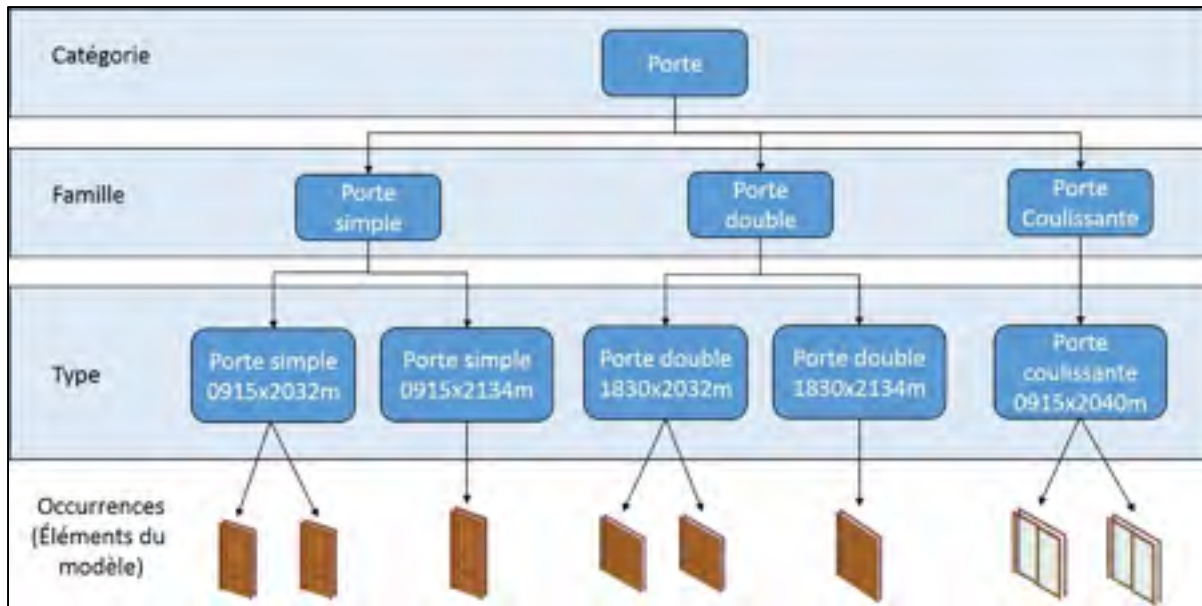


Figure 4.1 Hiérarchie des familles Revit

4.3.2.2 Les différents types de familles

Tous les éléments d'un modèle Revit sont construits à partir des **familles** Revit. Certaines différences notables concernant la manière de créer des éléments à partir d'une **famille** ont amené les concepteurs du logiciel à les séparer en trois sortes de **familles** distinctes : les **familles systèmes**, les **familles chargeables** et les **familles in situ**.

- les **familles systèmes** permettent de créer des éléments de bases à assembler sur un site de construction. Il s'agit par exemple des murs, des sols, des escaliers, des gaines ou des canalisations. Un ensemble de propriétés et de règles automatiques sont prédéfinies et permettent à ces **familles** d'interagir avec les autres éléments du modèle (quadrillages, lignes de niveaux...). Les utilisateurs ne sont alors pas autorisés à modifier les paramètres de ces **familles**. Il est cependant possible de dupliquer ces **familles** et de modifier certains des paramètres à des fins de personnalisation. Ces **familles** sont prédéfinies et enregistrées dans les gabarits de projets et il est toutefois possible de les transférer d'un projet à un autre ;
- les **familles chargeables** servent à la création d'éléments faisant l'objet d'achats, de livraison et d'installation ou d'éléments personnalisés. Ces **familles** ne sont pas présentes

- au début de la conception avec Revit, il faut donc les charger dans chaque nouveau projet Revit. Ces **familles** sont par exemple, les portes, les fenêtres, les chaudières ou appareils sanitaires, etc. Revit offre de plus la possibilité à l'utilisateur de créer lui-même ses propres **familles** en travaillant ou non à partir des **familles** déjà existantes ;
- Revit offre la possibilité de créer des éléments in situ pour des éléments spécifiques ou ne répondant pas à des standards. Pour chaque élément in situ créé, Revit crée automatiquement une **famille** pour cet élément. Cet outil est très utile pour la création de composants uniques et spécifiques au projet en cours.

Conséquences : Les éléments des modèles Revit sont issus de **familles systèmes** ou **chargeables**. Ces deux sortes de **familles** ont cependant des comportements très différents. Les deux peuvent être personnalisées, mais la manière d'ajouter des informations va varier de manière significative.

4.3.2.3 Les différents types de paramètres

Les informations relatives aux éléments constituant le modèle Revit sont renseignées dans des paramètres. C'est donc par la création de nouveaux paramètres que l'ajout des informations utiles pour la planification sera possible. Il existe différents types de paramètres sur Revit, certains vont définir des règles concernant la géométrie des éléments ou encore la manière dont ils interagissent avec d'autres éléments du modèle. D'autres fourniront certaines spécificités sur les éléments comme les matériaux qui le constituent ou leurs propriétés thermiques. Beaucoup de paramètres sont prédéfinis et renseignés automatiquement dans les gabarits Revit de base. Cependant Revit offre la possibilité à l'utilisateur de créer de nouveaux paramètres pour enrichir le modèle. C'est sur cette fonctionnalité que s'appuie particulièrement la stratégie de communication développée au cours du projet.

Il n'est possible de définir des paramètres qu'à deux niveaux (**occurrence** et **type de famille**) de la hiérarchie des **familles** présentée au paragraphe 4.2.3.1 – **Hiérarchie des familles Revit**.

Les définitions des paramètres ne sont pas les mêmes selon la sorte de **famille** (**famille système** ou **famille chargeable**). Cette section présente donc les différents types de paramètres qu'il est possible de créer et de manipuler sur Revit.

Il existe deux sortes de définitions paramètres :

- les paramètres **projet** : Il s'agit de paramètres propres au projet en cours, c'est-à-dire qu'ils ne sont définis que pour les éléments ou les **familles** du projet en cours. Si l'on souhaite utiliser ces définitions de paramètres sur d'autres projets, il faudra les recréer à chaque fois. Ces paramètres peuvent être appliqués à une seule ou l'ensemble des catégories d'éléments du projet. Ces paramètres peuvent se définir pour les éléments des deux sortes de **familles** (**familles systèmes** et **familles chargeables**) à condition qu'elles soient chargées dans le projet. Ces paramètres sont alors utiles pour renseigner des informations spécifiques à un projet en cours. Par exemple pour renseigner les zones et secteurs dans lesquels se situent les éléments ;
- les paramètres **famille** : Ces définitions de paramètres ne s'appliquent qu'aux **familles chargeables**. Une fois ces paramètres créés, renseignés et enregistrés, ils seront automatiquement importés dans chaque projet lors du chargement de la **famille**. On peut par exemple créer un paramètre de **famille** « coût » qui permettra de renseigner le coût de l'élément. Ce paramètre sera alors chargé en même temps que la **famille** et si une valeur lui est attribuée elle sera aussi chargée. Pour créer ce type paramètre, il faut passer via l'éditeur de **famille** Revit.

Pour la création de chacun de ces types de paramètres, l'utilisateur doit définir le nom du paramètre, la discipline du paramètre (Architecture, Structure, Commune...), le type du paramètre (longueur, nombre, texte...) et le groupe du paramètre (Cotes, graphisme, données d'identification...). Toutes ces informations vont permettre de situer les paramètres dans la structure des données du projet. L'utilisateur doit par ailleurs choisir si le paramètre est une propriété propre à l'**occurrence** ou identique pour tous les éléments de la **famille**. Le tableau 4.1 récapitule l'utilité des différents paramètres pour notre projet.

La création de nouveaux paramètres nécessite alors un nombre d'étapes relativement important. Afin de simplifier cette tâche, les concepteurs ont ajouté les paramètres **partagés**. Ces paramètres permettent de simplifier la définition des deux autres types de paramètres en prédéfinissant certaines informations (nom, discipline, **occurrences** ou **type**). Ces informations sont enregistrées dans un fichier texte, lequel pourra être utilisé pour simplifier les définitions de paramètres dans différents projets.

4.4 Création de paramètres et ajout d'informations au modèle

Le **chapitre 3 – La méthode Chronographique** présente les différentes informations que le concept de planification Chronographique manipule. Certaines des informations sont renseignées automatiquement lors de la création du modèle, d'autres doivent être ajoutées dans des paramètres existants, et pour certaines informations de nouveaux paramètres doivent être créés afin de pouvoir les renseigner. L'objet de cette section est donc de préciser quelles sont les informations manipulées et comment elles ont été ajoutées sur la maquette numérique.

4.4.1 Informations manipulées lors de l'étude expérimentale

Le nombre d'informations que manipule le concept de planification Chronographique étant relativement important, beaucoup d'informations doivent être ajoutées sur la maquette numérique du projet. L'étude expérimentale a donc été restreinte à un nombre d'informations suffisant pour exploiter uniquement les aspects principaux du concept. Par ailleurs, le principe de création de paramètres étant relativement semblable pour l'ensemble des informations manipulées par le concept, d'autres données pourront alors être facilement rajoutées au modèle par la suite. L'étude expérimentale s'est donc limitée à l'exploitation des informations de l'emplacement des ouvrages à réaliser ainsi que les informations concernant la spécialité de l'intervenant responsable de les réaliser.

4.4.2 Création de nouveaux paramètres

La section **4.3.2.3 Les différents types de paramètres** décrit les différentes possibilités pour créer de nouveaux paramètres. Les différents paramètres créés vont donc dépendre de plusieurs critères :

- pour les informations variant pour chaque élément (comme la localisation) il faut créer des paramètres d'**occurrence** ;
- pour les informations identiques pour tous les éléments d'une même **famille** comme la spécialité (électricité, plomberie...) en charge de la réalisation il faut créer un paramètre de **type** ;
- si l'on souhaite réutiliser cette information pour d'autres projets, il faut alors créer un paramètre de **familles** pour les **familles chargeables** ou un paramètre projet de type pour les **familles systèmes** ;
- si l'information n'est utile qu'au projet en cours, il faut alors créer un paramètre de projet.

Il existe donc quatre combinaisons possibles (Famille/type, Famille/occurrence, Projet/type, Projet/occurrence). Par ailleurs il n'est pas possible de créer des paramètres **de familles** pour des **familles** système, il faudra utiliser pour ces **familles-là** des paramètres projet. Les différentes combinaisons pour la définition de paramètres et leurs utilités sont présentées dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 Utilité des différentes combinaisons des définitions de paramètres

	Occurrence	Type
Projet	Informations non réutilisables et variant pour chaque objet du modèle	Informations réutilisables et identiques pour tous les objets d'une famille système
Famille	Informations non réutilisables et variant pour chaque objet d'une famille chargeable . (Une valeur par défaut peut être définie)	Information réutilisable et identique pour tous les objets d'une famille chargeable

Le tableau 4.2 précise les paramètres manipulés, s'il a fallu les créer ou s'ils sont déjà définis, si l'information peut être réutilisable ou non et le type de paramètre (projet, **famille**...).

Tableau 4.2 Informations manipulées dans le modèle expérimental

Type d'information	Nom du paramètre	Création	Réutilisable	Type de paramètre
Nom de l'élément	Famille	Non		
	Type de famille	Non		
Emplacement	Niveau (étage)	Non		
	Zone	Oui	Non	Projet/Occurrence
	Secteur	Oui	Non	Projet/Occurrence
Spécialité	Lot	Oui	Oui	Famille/Type (famille chargeable) Projet/Type (famille système)

Pour les différents types d'éléments, un nom suffisamment précis est présent soit dans le paramètre **Famille** soit dans le paramètre **Type de famille**. Il n'y a donc pas besoin de créer

un paramètre pour indiquer le nom de l'élément. Le nom du niveau (étage) dans lequel est situé un élément est directement renseigné sur Revit grâce aux règles automatiques prédéfinies. Par contre Revit ne permet pas de renseigner automatiquement dans quels zones ou secteurs du projet se situe un élément. Il faut donc créer de nouveaux paramètres pour renseigner ces informations. Ces informations vont varier à chaque nouveau projet. Il n'est donc pas nécessaire de sauvegarder ces informations ainsi, un paramètre Projet/Occurrence a été créé pour renseigner les zones et les secteurs. Concernant la spécialité, un paramètre a aussi dû être créé. Cependant, il est utile de conserver l'information entrée pour de futurs projets. Le paramètre a donc été créé avec une combinaison Famille/Type pour les **familles chargeables** et Projet/Type pour les **familles systèmes**.

4.4.3 Renseignement des informations manquantes pour la méthode Chronographique.

Une fois la définition de nouveaux paramètres pour renseigner les informations utiles à la planification Chronographique, il faut ensuite saisir ces informations. Certaines informations se renseignent automatiquement lors de la création du modèle grâce aux règles rattachées aux paramètres des éléments. C'est le cas par exemple du niveau (étage) dans lequel se situe l'élément. Cependant il n'existe actuellement pas de règles qui permettent de renseigner automatiquement les zones où les secteurs sur Revit. Pour le renseignement de ces informations, l'utilisateur doit donc effectuer une saisie manuelle de la valeur du paramètre. La procédure pour effectuer les saisies de valeurs ne sont pas les mêmes selon s'il s'agit d'un paramètre d'**occurrence** ou d'un paramètre de type. Voici quelques précisions selon le type de paramètre manipulé :

- les paramètres d'**occurrences** peuvent être saisis directement dans la palette de propriétés ancrée dans la fenêtre de travail du modèle ;
- les paramètres de **types** peuvent quant à eux se renseigner de plusieurs façons ;
 - ouvrir une boîte de dialogue supplémentaire dans l'interface de création du modèle où les propriétés du type sont renseignées ;

- ouvrir l'éditeur de **famille** et la boîte de dialogue permettant de définir les propriétés du type et compléter le paramètre désiré. (Utile si l'on souhaite renseigner le paramètre directement après sa définition).

Afin de compléter les informations, il faut donc procéder de différentes manières dépendamment des éléments précisés précédemment. Le tableau 4.3 récapitule pour chacune des informations manipulées si elles sont renseignées manuellement ou automatiquement et comment elles sont renseignées.

Tableau 4.3 Renseignement des informations du modèle

Type d'information	Nom du paramètre	Renseignement	Procédure
Nom	Famille	Automatique	-
	Type	Automatique	-
Emplacement	Étage	Automatique	-
	Zone	Manuel	Sélection de groupes d'éléments et renseignement de la zone
	Secteur	Manuel	Sélection de groupes d'éléments et renseignement du secteur
Discipline	Lot	Manuel	Pour chacune des familles, sélection d'une occurrence et renseignement via la fenêtre de propriétés du type

Le processus de renseignement du modèle peut donc s'avérer très couteux en temps relativement au nombre d'éléments présent dans le modèle (surtout pour le renseignement des zones et des secteurs). Cependant, ce temps peut être réduit de différentes façons ; grâce aux

options de filtrages ou dans le cadre d'un projet à étages répétitif en effectuant le renseignement sur un étage et en le dupliquant. Ce temps va par ailleurs varier selon le niveau de maîtrise du logiciel par l'utilisateur.

Grâce aux fonctionnalités présentées dans cette section, il est donc possible d'ajouter des informations pour que la maquette numérique représente des perspectives de construction. Les informations rajoutées pourront être exploitées pour l'élaboration d'échéancier avec la méthode Chronographique. Ainsi l'objectif secondaire n°1 est atteint.

4.5 La simulation 4D

La revue de la littérature démontre les avantages d'une utilisation d'une simulation 4D lors de la phase de réalisation du projet (section **1.3.3.4 avantages de la simulation 4D**). Elle est décrite comme un outil permettant d'améliorer la coordination entre les intervenants et d'avoir une meilleure communication des flux de travail à travers le temps et des intentions de planifications. Ces différents avantages sont aussi ceux recherchés lors du développement du concept de planification Chronographique. Cette section explique le fonctionnement des simulations 4D et analyse les processus nécessaires à l'élaboration d'un modèle 4D.

4.5.1 Fonctionnement de l'outil de simulation 4D

D'une manière générale les outils de simulation 4D nécessitent un modèle 3D et un échéancier d'exécution. Cette étude utilise le logiciel Navisworks pour réaliser la simulation 4D. Ce logiciel propose plusieurs fonctionnalités : métré, détection de conflits, et la fonctionnalité de simulation 4D réalisée par le module « Timeliner ». Plus précisément, une fonction qui permet d'une part de créer ou d'importer un échéancier et d'autre part, de faire les liens entre les activités de cet échéancier avec les éléments du modèle 3D.

Le fonctionnement de Navisworks vis-à-vis de l'échéancier et du modèle 3D est expliqué dans les sections suivantes.

4.5.2 Spécifications sur les échéanciers dans Navisworks

Bien que l'outil Timeliner permette de créer un échéancier, les fonctionnalités de l'outil sont trop limitées pour traiter l'ensemble de la planification d'un projet de construction. Les professionnels continuent donc de travailler avec d'autres outils spécialisés tels que Microsoft Project ou Primavera pour créer les échéanciers. Navisworks est donc un excellent outil pour contrôler la planification réalisée grâce à la simulation 4D, mais sans être une solution pour la planification de projet complexe. Pour remédier à cette situation, Navisworks permet d'importer les échéanciers sous différents formats issus de logiciels de planification couramment utilisés (Primavera P6, Microsoft Project, format CSV). Le module Timeliner est constitué de différents onglets qui permettent de : visualiser l'échéancier, importer un échéancier, configurer et effectuer la simulation 4D. L'onglet de visualisation de l'échéancier permet un lien entre les activités et les éléments du modèle 3D. Il est constitué de deux parties présentées dans la figure 4.2 :

- une partie tabulaire permettant d'afficher les informations de planification et d'estimation dans différentes colonnes (nom de la tâche, Date de début/fin d'activité, Coûts de main-d'œuvre, paramètres personnalisés...). Toutes ces informations peuvent soit être importées si elles ont été renseignées dans l'outil de planification soit renseignées directement dans Navisworks ;
- une partie graphique représentant l'échéancier sous forme de diagramme à barre.

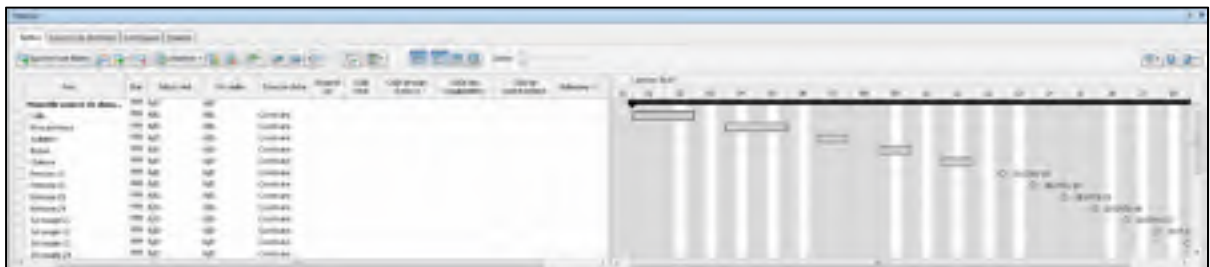


Figure 4.2 Fenêtre de l'outil « Timeliner » de Navisworks

4.5.3 Spécifications sur les modèles 3D

Navisworks offre la possibilité d'importer plusieurs maquettes numériques d'un même projet (Architecture, Structure...) et de les assembler. Pour réaliser la simulation 4D, il faut associer les éléments des différents modèles aux tâches de l'échéancier. Il faut donc que l'utilisateur sélectionne les éléments du modèle correspondant aux activités.

Deux possibilités s'offrent à l'utilisateur : i) soit en sélectionnant les éléments en cliquant directement dans le modèle 3D ; ii) soit en utilisant l'arborescence de sélection. Cette arborescence se divise en plusieurs niveaux de sélection. Par exemple pour un modèle 3D issu de Revit, les « Niveaux de sélection » de l'arborescence sont ;

- **le Modèle** : sélectionne tous les éléments du modèle importé ;
- **le Niveau** : sélectionne tous les éléments d'un même étage ;
- **la Catégorie** : sélectionne tous les éléments d'une catégorie d'objet (murs, portes...) dans l'étage sélectionné ;
- **la Famille** : idem pour une **famille** donnée ;
- **le Type** : idem pour un **type de famille** donné ;
- **l'élément** : permet de sélectionner un seul élément dans l'un des types de **famille**.

Cette arborescence correspond par ailleurs à la hiérarchie des **familles** Revit présentée au paragraphe **4.2.3.1 - Hiérarchie des familles Revit**.

Cependant il est important de noter que l'arborescence de sélection varie selon le format importé. Par exemple pour un modèle au format IFC, les éléments sont individuellement sélectionnables après l'étage. La figure 4.3 présente ces différences entre l'arbre de sélection d'un modèle issu de Revit (à gauche) et du même modèle enregistré au format IFC à droite.

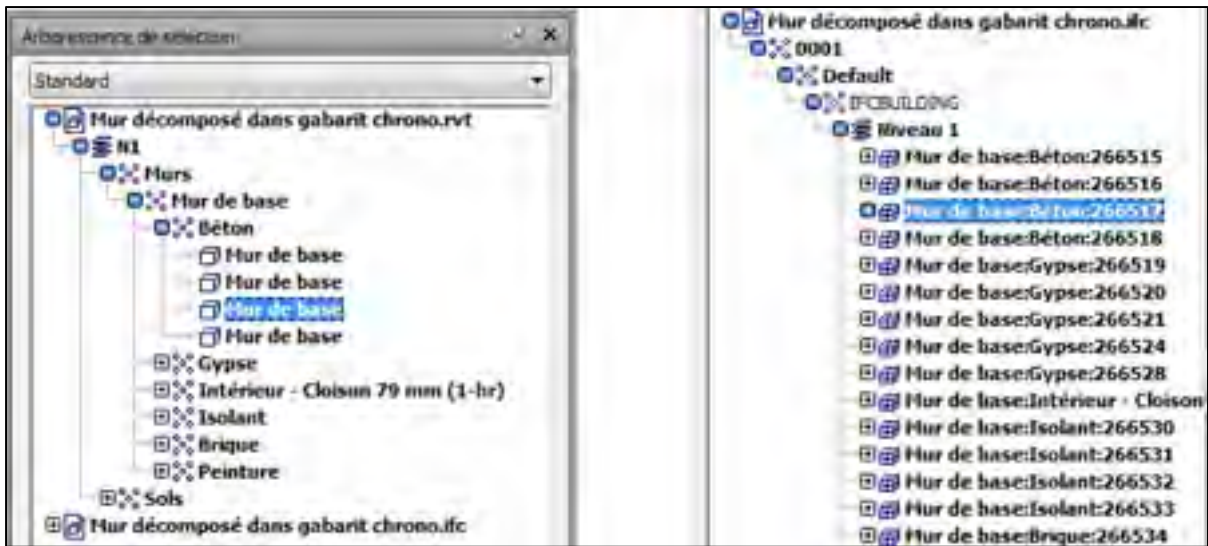


Figure 4.3 Différence des arborescences de sélection entre un même modèle enregistré au format Revit et au format IFC

Navisworks permet aussi d'accéder aux différentes informations des éléments présentes dans les différentes maquettes numériques. La lecture se fait via une fenêtre « propriétés » qui contient des onglets correspondants aux différents groupes d'informations ; certains correspondent aux informations du modèle importé et d'autres sont relatifs aux informations du modèle 4D réalisé avec Navisworks.

Une troisième possibilité permet de lier automatiquement les éléments à l'aide de règles. Pour cela, l'une des colonnes de l'échéancier doit contenir, pour chaque activité, une valeur correspondante à l'un des paramètres des éléments du modèle. Par exemple si le nom de l'activité correspond au nom d'un type d'élément du modèle 3D, il est possible de rattacher automatiquement toutes les **occurrences** de ce type d'élément à cette activité (Activité porte : tous les éléments nommés porte seront rattachés).

4.5.4 Processus de modélisation 4D

4.5.4.1 Élaboration de l'échéancier

L'élaboration de l'échéancier a été réalisée dans le but d'étudier les possibilités de simulation de la construction en mettant l'accent sur le caractère spatial des travaux à réaliser, c'est à dire l'enchaînement des activités zone par zone (comme le fait le concept de planification Chronographique). Cet échéancier se base sur un découpage des activités zone par zone puis secteur par secteur.

4.5.4.2 Liens entre les activités et les éléments du modèle

La réalisation du lien entre l'échéancier et le modèle 3D est l'étape la plus longue dans un processus de montage d'un modèle 4D. Cela provient du fait que dans les maquettes numériques l'information est classée en fonction des perspectives de conception et non de construction. En effet comme cité précédemment, l'arborescence de sélection était organisée de façon à sélectionner les éléments par catégories à l'intérieur d'un étage (dans le cas d'un fichier importé de Revit). Or l'élaboration du modèle 4D vise à représenter les perspectives de construction, les éléments doivent alors être organisés à la fois par spécialité, par étage et par zone (ou secteur) de construction. La procédure classique consiste alors à créer manuellement des « jeux de sélection d'éléments » correspondant à ces zones (ou secteurs) de travail. Par exemple on place dans le jeu de sélection « porte, niveau 1, zone 1, secteur 1 » toutes les portes se situant dans le secteur 1 de la zone 1 du premier étage. Ce qui implique de sélectionner manuellement chacun de ces éléments dans le modèle 3D.

Une fois les jeux de sélection créés il faut ensuite lier chacun d'entre eux aux activités correspondantes et la simulation 4D est prête. L'animation permet alors de visualiser l'avancement des différentes activités secteur par secteur puis zone par zone et finalement étage par étage. Cette manière de procéder est donc très chronophage et toute modification est difficile à gérer. La recherche propose alors une méthode pour simplifier cela en utilisant la création de règles automatiques et en attribuant un code d'identification à chaque objet du

modèle correspondant à une activité unique. Cette méthode sera explicitée plus en détail dans la section **5.5 – Simulation 4D**.

4.5.4.3 Spécifications sur le montage des modèles 4D

Afin de pouvoir fonctionner correctement, plusieurs paramètres doivent impérativement être renseignés pour chacune des activités de l'échéancier dans le Timeliner :

- nom de l'activité ;
- date de début/Date de fin ;
- type de tâche, permet de paramétrer la visualisation de l'accomplissement de l'activité ;
- les éléments du modèle attachés à l'activité.

Le type de tâche permet de définir l'apparence des objets liés à une activité à différentes étapes de la simulation. Les types de tâches prédéfinis sont :

- **construire** : À l'étape initiale, l'élément est masqué, durant sa réalisation, l'élément est coloré en vert et il a l'apparence du modèle Revit une fois réalisée ;
- **démolir** : À l'étape initiale, l'élément à l'apparence du modèle, durant l'activité, il est coloré en rouge et est masqué une fois la tâche terminée ;
- **temporaire** : L'élément est coloré en jaune pendant la durée de l'activité et est masqué pendant le reste de la simulation.

Navisworks offre par ailleurs la possibilité de créer des types de tâches personnalisées (nom, couleur et apparence aux différentes étapes).

4.6 Échange d'information - Outils d'export/import des nomenclatures

L'objectif du projet étant d'exploiter les données des maquettes numériques pour la planification Chronographique, il faut donc identifier le moyen le plus adapté de transférer les différentes informations présentées précédemment vers l'outil permettant d'appliquer le concept de planification Chronographique. Cet outil étant développé en VBA Excel, il est donc

indispensable d'étudier les possibilités de communication avec le logiciel Excel. Cette section discute des différentes possibilités de communication entre les plateformes Revit et Excel.

Comme pour toute méthode de planification, l'évaluation de la durée des activités se base entre autres sur les quantités d'ouvrages à réaliser. Par ailleurs, le concept de planification Chronographique se base sur l'appréhension de la contrainte spatiale du projet ainsi que sur les intervenants responsables de la réalisation des ouvrages. L'objectif de cette partie est donc de rechercher à étudier les différentes possibilités pour transférer les quantités d'ouvrages à réaliser par étages, zones, secteurs tout en indiquant la spécialité en charge de les réaliser.

Les logiciels Revit et Navisworks présentent tous deux des outils permettant de personnaliser des nomenclatures.

4.6.1 Outil de nomenclatures Revit

L'outil de quantification de Revit présente l'avantage d'être simple d'utilisation et rapide à configurer. Des quantitatifs et nomenclatures sont automatiquement présents dans l'arborescence du projet lors de la création du modèle. L'utilisateur a la possibilité de rajouter et de personnaliser les informations des nomenclatures s'il le désire. Il est alors possible de sélectionner les paramètres que l'on souhaite afficher dans chacune des nomenclatures et des options de Tri et de Filtre offrent une grande liberté pour la mise en forme de la nomenclature. L'utilisateur a de plus, la possibilité d'exporter les nomenclatures du projet dans des fichiers Excel. Cet outil exige un effort relativement important pour ajouter et organiser les informations dans les nomenclatures. Et les paramètres de **type** pour les **familles chargeables** ne sont pas affichables directement. Beaucoup d'opérations sont nécessaires pour les faire apparaître dans les nomenclatures. Par ailleurs la fonctionnalité permettant d'exporter les nomenclatures vers Excel ne gère que l'export. C'est-à-dire qu'il ne permet pas de faire remonter des informations à partir du fichier Excel.

4.6.2 Outil de quantitatifs Navisworks

L'outil de quantification de Navisworks est plus complexe à utiliser, mais plus précis. Il permet de réaliser un métré complet du bâtiment. Cependant, il faut classer manuellement les éléments du modèle dans une classification Unifomat. Son utilisation demande donc un temps relativement important, mais il permet de limiter les oublis grâce à la possibilité de visualiser les éléments qui sont pris en compte, ou pas, dans le métré. Navisworks met à la disposition de l'utilisateur un catalogue d'éléments et un catalogue de ressources afin d'enrichir les informations présentes dans le métré réalisé. Cet outil offre de plus la possibilité d'exporter ou d'importer les données sur Excel.

4.6.3 Les add-in Revit

Revit dispose d'un nombre considérable d'add-ins disponibles sur la plateforme Autodesk Exchange. Ces applications poursuivent des buts divers et variés pour simplifier l'utilisation de Revit dans différentes tâches et spécialités. Ces add-ins une fois téléchargés, permettent d'obtenir de nouvelles commandes directement dans le logiciel Revit. Certains de ces add-ins permettent de traiter l'export/import de nomenclatures vers Excel. Différents add-ins ont alors été testés pour l'export/import des informations entre la maquette créée et le fichier Excel contenant le progiciel de la méthode Chronographique.

4.6.3.1 L'add-in « Export/Import Excel » de BIM One

BIM One est un ensemble d'add-ins gratuits populaires chez les utilisateurs de Revit. L'outil « Export/Import Excel » permet d'exporter plusieurs nomenclatures/quantités à la fois dans un fichier Excel. Concernant les informations qui sont exportées, il s'agit d'informations présentes dans les paramètres sélectionnés dans les nomenclatures sur Revit. L'utilisation de BIM One nécessite donc l'ajout des paramètres dans les nomenclatures Revit avant d'exporter les informations. Concernant le fichier Excel généré, une feuille de calcul différente est créée pour chaque catégorie d'éléments sélectionnés. Chaque feuille présente les éléments séparément :

une ligne par élément. Les colonnes correspondent aux différents paramètres. Cependant, cet add-in ne propose pas d'option de Tri et ni de filtrage. Les éléments sont donc regroupés et additionnés en fonction de certains paramètres qui diffèrent selon le type d'objets et qui ne sont pas modifiables. Les nomenclatures obtenues doivent donc être retravaillées afin d'être exploitables. Or, pour retourner les informations vers Revit, il faut que la mise en page du classeur soit identique à celle du classeur extrait, ce qui oblige à retravailler la nomenclature dans une feuille indépendante du fichier Excel et à créer des liens entre cette feuille et l'échéancier. Par ailleurs en raison de l'impossibilité d'ajouter des paramètres de **type** pour les **familles chargeables** dans les nomenclatures il n'est pas possible de les exporter non plus avec cet outil (à moins de passer par des définitions de paramètres partagés).

4.6.3.2 L'add-in ScheduleSync Pro

ScheduleSync Pro est un add-in payant développé pour exporter et importer les nomenclatures vers Excel. De la même manière que le module BIM One, cet add-in permet d'exporter les nomenclatures dans un fichier Excel. Cet outil permet de plus la sélection des paramètres à exporter via l'interface d'export (pas besoin d'éditer les nomenclatures Revit). Il permet aussi de prévisualiser les quantités afin de permettre à l'utilisateur de contrôler les paramètres à exporter.

De la même manière que pour le module BIM One, il faut conserver la même mise en forme du fichier Excel pour l'import. Le fichier Excel généré comporte aussi une ligne par élément et les paramètres en colonnes sans donner la possibilité d'avoir un regroupement automatique. Cependant, à la différence de BIM One, cet add-in ne permet pas d'exporter plusieurs nomenclatures/quantités en même temps ni d'extraire directement des paramètres de **type** (pour les familles **chargeables**).

4.6.3.3 L'add-in « AutoExcel » de Avatar BIM

Cet add-in nécessite aussi d'éditer les nomenclatures sur Revit pour réaliser l'export. L'export se fait avec une feuille indépendante par nomenclature et fait apparaître une colonne

renseignant en plus des paramètres sélectionnés l'ID de l'élément Revit (N° unique attribué pour chacun des objets du modèle). Il n'est donc pas possible d'exporter les paramètres de **type** pour les **familles chargeables**.

Ainsi, les trois add-in étudiés, bien qu'ils soient un moyen simple de réaliser l'export/import d'information entre Revit et Excel, présentent des limitations importantes pour bien répondre aux besoins de cette recherche.

4.6.4 L'interface de programmation de Revit

Revit offre une interface de programmation d'applications (API) qui permet la création de macros. Ces macros permettent à l'utilisateur de gagner du temps en automatisant certaines tâches répétitives. Cet outil permet entre autres de rechercher et d'extraire du contenu Revit vers des fichiers externes, d'afficher ou de modifier des paramètres, de créer des types d'éléments ou encore d'importer des gabarits, paramètres, etc. à partir de fichiers externes. Cet outil offre donc de grandes possibilités pour simplifier le travail de l'utilisateur Revit. De plus, l'outil de développement de Revit permet de créer des macros dans plusieurs langages de programmation C#, VB.NET, Ruby et Python.

La création d'une macro pourrait donc permettre d'exporter et d'importer les paramètres qui ont été ajoutés au modèle vers le logiciel Excel. L'outil offrant également, de grandes libertés pour le Tri et le filtrage des éléments, il est alors possible de créer un programme personnalisé permettant d'exporter l'ensemble des informations intéressantes et dans une mise en forme maîtrisée. D'autre part, l'outil de modélisation graphique de la planification est actuellement développé en VBA, mais l'un des objectifs du laboratoire MGPlan est de développer une application. L'utilisation de l'outil de développement serait donc idéale pour assurer la communication entre cette application et Revit. La création d'une macro personnalisée pourrait donc être une option intéressante dans le cadre des présents travaux, car elle permettrait de répondre entièrement à nos besoins. Néanmoins, l'utilisation de cet outil nécessite une solide connaissance de la programmation dans l'un des langages cités ci-dessus.

4.6.5 Création d'un script Dynamo

Dynamo est un add-in Revit permettant d'ouvrir une interface de programmation visuelle. Cette interface permet d'accéder et de travailler sur le contenu Revit d'une manière semblable à celle de l'interface de programmation Revit. Cependant, plutôt que d'écrire une macro dans un langage de programmation, l'utilisateur, peut construire graphiquement son programme, en créant des nœuds permettant de réaliser des actions sur les éléments Revit. Cet outil open source offre donc une alternative plus accessible que celle proposée par l'API Revit.

Dynamo offre la possibilité d'effectuer plusieurs actions sur les éléments d'un projet Revit. L'add-in permet entre autres, le tri et le filtrage des éléments en fonction des catégories, **familles, types**, mais aussi des niveaux et des autres paramètres. Il permet de plus d'exporter et de récupérer de l'information depuis des fichiers Excel.

L'outil offre par ailleurs de grandes possibilités de personnalisation grâce au téléchargement ou à la création de nœuds personnalisés. Leur création peut se faire soit à partir de nœuds déjà existants ou à partir du langage de programmation Python. On notera que pour personnaliser l'outil, l'utilisateur devrait comprendre certains principes de bases du langage Python et quelques notions de l'interface de programmation de Revit. Cependant, il ne s'agit ici que des contraintes de développement du script. Car une fois créé, celui-ci pourra être réutilisé pour différents projets sans avoir à être modifié ou adapté. Un exemple de script Dynamo est présenté ci-après dans la figure 4.4.

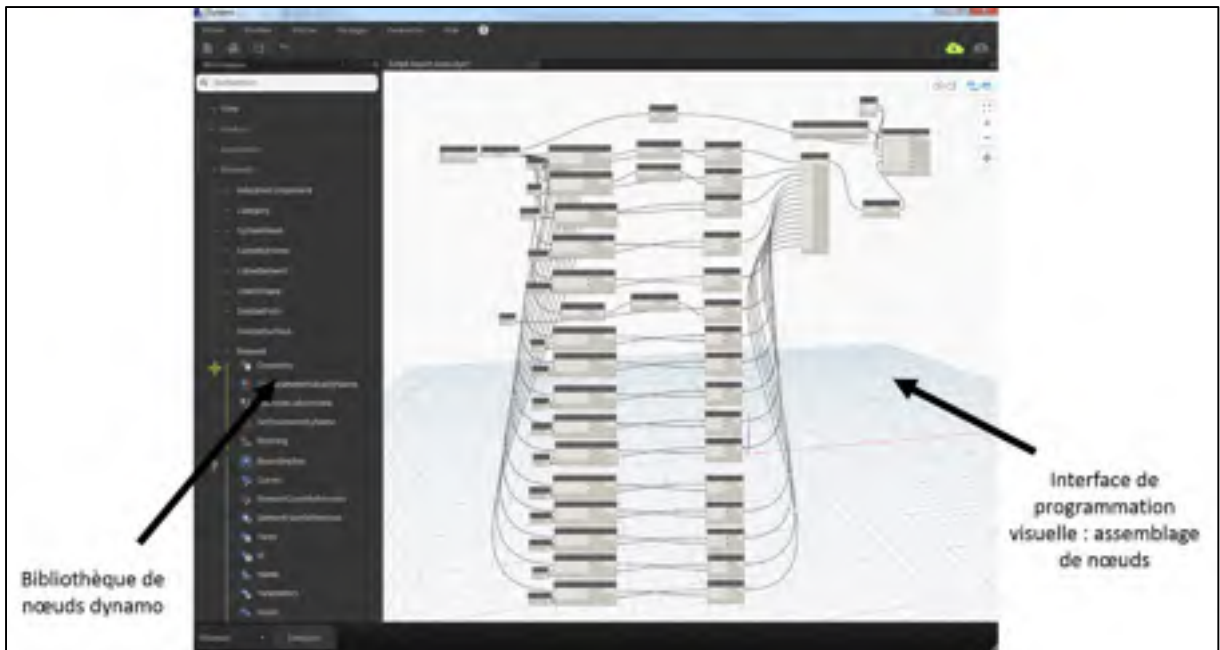


Figure 4.4 Présentation de l'interface de dynamo

Dynamo offre ainsi plusieurs possibilités de communication entre la maquette numérique et la modélisation Chronographique. Les critères de sélection et l'outil retenu seront présentés dans la partie suivante.

4.7 Résultats de l'analyse expérimentale

Les différentes étapes de réalisation de l'analyse expérimentale ont été présentées précédemment. Cette section présente alors le système retenu pour traiter l'échange d'informations et la stratégie de communication entre une maquette numérique, la modélisation Chronographique et la simulation 4D.

4.7.1 Système retenu pour l'échange d'informations

Différents moyens existent pour traiter la communication d'informations entre Revit et Excel présentant chacun différentes forces et faiblesses. Pour le choix du système, une liste de critères et d'éléments à prendre en considération a donc été réalisée :

- la simplicité d'utilisation du système et la simplicité de sa mise en place ;
- la mise en forme des nomenclatures exportées doit être maîtrisable pour simplifier le lien avec la modélisation Chronographique ;
- la possibilité d'exporter ou non les différents types de paramètres (y compris les paramètres personnalisés) ;
- la manière de sélectionner les informations à exporter ;
- l'export de plusieurs nomenclatures en même temps dans un même fichier ;
- la possibilité de retourner l'information depuis Excel vers Revit. Une tâche importante pour la simulation 4D, mais aussi utile pour simplifier la saisie de certains paramètres ;
- la possibilité d'adapter facilement le système pour traiter des informations supplémentaires.

Voici un tableau récapitulant ces différents éléments pour chacune des solutions (7) présentées précédemment :

Tableau 4.4 Critères de sélection du système pour traiter l'échange d'informations

Type de système	Outils intégrés		Autre			Outils personnalisés	
	Revit	Networks	BIM One	Schedule Sync Pro	Avatar BIM	Interface de développement	Script Dynamo
Mise en place	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple	Très complexe	Complète
Utilisation	Simple	Très complexe	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple
Mise en forme personnalisable	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Export de tout type de paramètres	Non	Oui	Non	Non	Non	Oui	Oui
Sélection des informations à exporter	Manuelle	Manuelle	Manuelle	Manuelle	Manuelle	Automatique	Automatique
Import / Export	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Export multiple	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui

Les deux systèmes qui satisfont entièrement à l'ensemble de nos critères pour réaliser l'échange d'informations entre le modèle BIM et Excel sont la programmation dans l'interface de développement Revit ou la réalisation d'un script avec Dynamo. Ces deux systèmes nécessitent cependant de réaliser un effort de programmation pour répondre à nos besoins.

Dans un souci de simplicité et afin de donner une solution accessible aux utilisateurs, la solution retenue est Dynamo. Principalement en raison d'une plus grande simplicité de

développement du script grâce à son interface de programmation visuelle. En effet, les nœuds mis à disposition réduisent considérablement l'effort de programmation et il est possible de visualiser à chaque étape de développement les objets et informations manipulés. De plus l'utilisation de Dynamo ne nécessite pas d'avoir des connaissances poussées en programmation, ce qui rend le script développé facilement modifiable si les besoins évoluent dans le cadre de nouvelles recherches. Ainsi l'objectif secondaire n°2 du projet qui consistait en l'identification d'un outil pour la communication entre les maquettes numériques et le progiciel de planification Chronographique est atteint.

4.8 Contraintes et problèmes relevés

L'analyse expérimentale a permis de mettre en évidence différentes manières de rajouter de l'information sur les maquettes numériques BIM ainsi que différentes possibilités pour échanger l'information avec des outils externes. Cependant, certaines limites ont pu être observées. Cette partie les présente et décrit leurs impacts sur la stratégie de communication développée.

4.8.1 Concernant la modélisation 3D et l'apport d'informations

Les principales difficultés rencontrées lors de la modélisation 3D concernent la création de nouveaux paramètres pour ajouter des informations, la saisie d'information dans les paramètres des éléments du modèle et le fonctionnement de certains types d'objets Revit. Cette section détaille ces contraintes et leurs implications dans le cadre du projet.

Au niveau de la création des paramètres :

Il existe d'une part, différentes sortes de **familles** d'objets (**Familles systèmes** et **familles chargeables**) et d'autres part il existe différents types de paramètres que l'on peut rajouter aux éléments de la maquette (paramètres **projet**, **famille** de **type** ou d'**occurrence**). Ces éléments ont une incidence sur :

- la manière de définir les paramètres. En effet, il faut premièrement identifier si l'on souhaite se resservir ou non de l'information et si l'on souhaite ajouter des informations spécifiques aux **occurrences** ou générales sur les **types de familles**. Il est donc important de structurer la manière de définir de nouveaux paramètres ;
- l'export/import des informations. Selon la sorte de paramètres et la sorte de **famille** des éléments, la programmation pour lire ou écrire dans ces paramètres n'est pas la même (ces méthodes seront décrites dans le **chapitre 5 Développement de la stratégie de communication**). Ce qui amène donc à réaliser plusieurs scripts pour traiter les différents cas de figure.

De plus la définition de paramètres **famille** pour les **familles chargeables** est un processus très long, car il nécessite de répéter les opérations pour chaque **famille** indépendamment.

Au niveau de la saisie d'information dans les paramètres :

Les parties précédentes précisent que le processus de renseignement de paramètres peut s'avérer très couteux en temps. Spécialement pour les paramètres d'**occurrences** (ex : les zones) qui vont varier pour chaque élément et à chaque projet. La possibilité de créer des bibliothèques de **familles** permettra de diminuer le temps de saisie des paramètres de **type de famille**. Les informations seront saisies une seule fois puis enregistrées en même temps que les **familles** dans les bibliothèques.

Concernant les **familles systèmes** (ex : murs, planchers...), il est par contre impossible les sauvegarder dans des bibliothèques comme pour les **familles chargeables**. Des mesures complémentaires doivent être prises pour conserver et réutiliser les informations renseignées dans les paramètres des **familles chargeables**.

Le temps passé à renseigner les informations sur le modèle va donc varier selon les facteurs suivants.

- complexité du modèle ;

- maîtrise du logiciel par l'utilisateur ;
- richesse de la bibliothèque de **familles** pour la planification Chronographique ;
- type de paramètres (Paramètres de **type de famille** ou d'**occurrence**).

D'autre part, le temps nécessaire pour la saisie des paramètres sera différent selon si les informations sont renseignées directement lors de la création du modèle ou si l'on travaille sur un modèle déjà réalisé. Ces différentes contraintes sont donc à prendre en considération pour la mise en place de la stratégie de communication entre les différents logiciels.

Au niveau des familles systèmes multicouches Revit :

Les **familles systèmes multicouches** Revit sont des **familles** permettant de créer des éléments multicouches comme les murs ou les planchers. Par exemple, dans le cadre d'un mur, différentes couches (Couche de la structure porteuse, couche d'isolation, couches de peinture...) sont automatiquement générées en définissant un seul et unique tracé du mur dans le modèle. Cette fonctionnalité, très utile permet de diminuer considérablement le temps de modélisation des différents éléments constituant les murs ou les planchers. Cependant le fonctionnement de ces **familles** limite quelque peu l'exploitation du modèle pour une approche de construction. En effet, les différentes couches de matériaux générées ne sont pas totalement séparables dans le sens où il est impossible de définir des paramètres de **type** pour ces éléments. Ces paramètres sont malheureusement nécessaires si l'on souhaite conserver des informations pour ces différentes couches. Par exemple, pour la planification, l'utilisateur aura besoin de renseigner des lots différents pour une couche de béton, une couche d'isolant ou une couche de peinture d'un même mur. Cependant, la création du paramètre « lot » ne peut se faire qu'au niveau du mur dans son ensemble donc pour les trois couches en même temps.

4.8.2 Contraintes concernant la simulation 4D

Le processus de montage d'un modèle 4D nécessite un effort considérable pour réorganiser les éléments du modèle 3D dans des jeux de sélections. En effet une simulation 4D doit représenter

les perspectives de la construction de l'ouvrage en prenant en compte les aspects spatiaux des éléments à réaliser. Cependant l'arbre de sélection des éléments ne permet pas de trier les éléments par zone ou par secteur.

Navisworks offre toutefois la possibilité de rattacher automatiquement les éléments et les activités en fonction de paramètres présents dans le modèle 3D. Cependant cette fonctionnalité permet seulement de rattacher les éléments aux activités que grâce à la valeur d'un seul et unique paramètre. Cela nécessite donc d'avoir un code d'identification correspondant à une activité unique présent à la fois dans l'échéancier importé et à la fois dans les paramètres des objets du modèle concerné.

4.9 Analyse du processus d'exploitation des maquettes numériques BIM pour la planification Chronographique et la simulation 4D

Les études menées lors de l'analyse expérimentale ont permis d'identifier les principales étapes nécessaires pour exploiter un modèle numérique BIM afin de réaliser un échéancier de construction avec la modélisation Chronographique et pour réaliser des simulations 4D du projet. Ces étapes sont les suivantes :

- ajout d'informations sur la maquette numérique BIM ;
- export des données du modèle BIM vers l'application de planification Chronographique ;
- réalisation de l'échéancier de construction en utilisant les données extraites du modèle BIM ;
- mise à jour du modèle BIM ;
- réalisation du modèle 4D sur la base du modèle BIM et de l'échéancier créé.

Différents avantages liés à l'utilisation d'un tel processus ont par ailleurs été observés. Notamment grâce à la possibilité d'import/export d'informations entre la maquette numérique et l'application de planification Chronographique.

Concernant l'export des informations :

La possibilité d'export des informations permet d'exploiter les données propres au projet pour réaliser la planification. Plus concrètement, lors de l'analyse expérimentale, les informations exploitables ont été des quantités d'éléments par niveaux, zones et secteurs ainsi que les spécialités responsables de réaliser les travaux. Cependant, les processus étudiés pour ajouter ces informations au modèle BIM pourront être utilisés pour l'enrichir encore avec d'autres informations. Par exemple, le matériel nécessaire à la réalisation des travaux, les sous-traitants, fournisseurs ou encore des renseignements sur la composition des équipes de construction, etc. Ces informations pourront alors être exportées et exploitées de la même manière pour aider à la réalisation de l'échéancier de construction.

Concernant l'import d'informations :

La possibilité d'importer des informations à partir de l'application de planification présente différents avantages.

D'une part, l'ajout d'informations à partir du logiciel Revit peut s'avérer être un processus long et exigeant en termes de rigueur. Certaines informations peuvent parfois être plus faciles à renseigner dans des tableaux Excel. C'est d'ailleurs l'une des raisons pour lesquelles un grand nombre d'add-ins sont disponibles pour réaliser l'import-export d'informations entre Revit et Excel. Dans notre cas, cela va permettre de laisser la possibilité aux utilisateurs de compléter certaines informations plus simplement via l'application de planification Chronographique. Ces informations pourront ensuite être renvoyées vers la maquette numérique et être enregistrées dans les bibliothèques de **familles** d'éléments Revit.

De plus, pour monter un modèle 4D automatiquement (liens entre activités et éléments du modèle 3D automatique), il faut un code d'identification unique pour chaque activité de l'échéancier. Ce code doit aussi être présent dans les informations rattachées aux éléments du modèle BIM réalisés lors de cette activité. Ce code va alors être défini lors de la réalisation de

l'échéancier et pourra être transmis aux éléments du modèle numérique grâce à la possibilité d'import d'informations. De plus, comme la planification Chronographique définit une structure de découpage de projet en fonction des zones de travail, il n'y aura pas besoins d'efforts supplémentaires pour réorganiser les éléments des modèles 3D sur Navisworks. Ainsi, le temps nécessaire pour l'élaboration du modèle 4D sera considérablement réduit.

4.10 Discussions

La réalisation de l'étude expérimentale a permis d'identifier différents avantages liés à l'utilisation conjointe des maquettes numériques BIM, de la planification Chronographique et de la simulation 4D. Voici quelques éléments expliquant la complémentarité entre ces différents éléments.

Maquette numérique BIM et planification Chronographique :

La maquette numérique BIM agit comme une base de données contenant les informations du projet. Le concept de modélisation Chronographique permet de traiter la planification avec différents modes de visualisation des échéanciers permettant ainsi de prendre en considération différents facteurs influant sur le déroulement des activités (espaces, ressources, équipement). Le lien entre les maquettes numériques et la planification Chronographique présente donc les avantages suivants :

- les différentes vues de la méthode Chronographique peuvent être alimentées par l'information contenue dans la base de données rattachée à la maquette numérique ;
- cette base de données peut être enrichie ou mise à jour avec les données issues de la planification Chronographique.

Planification Chronographique et simulation 4D

La planification Chronographique permet de générer des échéanciers dédiés à la réalisation des travaux. Les activités sont alors définies dans une perspective de construction. Ainsi la

structure de découpage des activités est réalisée par spécialité, étage, secteur et zone de construction. L'échéancier fourni reflète donc la séquence des travaux d'un point de vue de son évolution à la fois contractuelle et spatiale. Ainsi le planning généré est considéré plus adéquat pour réaliser la simulation 4D, nul besoin de procédés d'adaptations pour étudier l'évolution des différents espaces aux cours du temps. La simulation 4D réalisée peut alors communiquer clairement la séquence des travaux envisagée aux équipes de construction. Ainsi, un dialogue entre les équipes et les gestionnaires peut être ouvert pour déterminer la validité des dates planifiées.

CHAPITRE 5

DÉVELOPEMENT DE LA STRATÉGIE DE COMMUNICATION

L'objectif du projet est l'exploitation des données des maquettes numériques BIM pour alimenter le concept de planification Chronographique permettant ainsi la réalisation d'une planification plus adaptée aux chantiers de construction et d'une simulation d'exécution 4D. Différentes possibilités existent pour l'exploitation des différents outils et concepts. Ce chapitre vise donc la présentation de la stratégie employée pour assurer une communication claire et structurée entre les différents outils et concepts.

5.1 Présentation de la stratégie

L'analyse expérimentale a permis d'identifier cinq principales étapes pour l'exploitation conjointe des modèles BIM, de la planification Chronographique et de la simulation 4D. Ce chapitre présente les technologies utilisées pour supporter ce processus ainsi que l'identification des parties prenantes impliquées à chacune des étapes.

5.1.1 L'aspect technologique

Le processus développé, concernant l'aspect technologique, repose sur l'utilisation de différents outils informatiques :

- **Revit 2015**¹ pour la création de la maquette numérique BIM ;
- l'add-in **Dynamo**² de Revit pour l'échange d'information entre Revit et l'outil de planification Chronographique ;
- **Excel 2013** pour l'outil de planification Chronographique (développé en VBA) et pour la création d'une base de données des éléments du projet ;

¹ Version : Revit 2015, version de mise à jour 3 (15.0.207.0)

² Version : Dynamo 2016, version 1.2.1

- **Navisworks Manage 2015³** pour la modélisation 4D.

5.1.2 Informations manipulées

Le chapitre 3 a présenté le concept de planification Chronographique et les informations manipulées, en phase de construction, pour atteindre les objectifs du présent mémoire. Ce concept de planification manipule un grand nombre d'informations destinées à résoudre différentes problématiques. Ces informations seront stockées dans les paramètres Revit.

La présente recherche se focalise aussi sur la coordination des travaux de tous les intervenants au sein des différents espaces du chantier. Ceci est réalisé par la manipulation des informations des différents types d'objets Revit (**familles chargeables** et **familles systèmes**).

Rôle de ces informations :

- **informations d'identification des éléments Revit ;**
 - **famille et type de famille** : Les nomenclatures sont créées pour chacune des catégories d'éléments Revit, les **familles** et **types de famille** permettent alors de différencier les différents types d'éléments dans ces nomenclatures ;
 - **code d'activité** : Code permettant de faire le lien entre l'activité et l'élément Revit. Afin que ce code représente une activité unique, il est réalisé par concaténation des informations suivantes : MasterFormat, Étage, Phase, Zone, Secteur ;
- **information caractérisant l'élément ;**
 - **matériaux** : Cette information permet à l'utilisateur de savoir quels matériaux prévoir pour l'activité ;
 - **équipement** : Cette information permet à l'utilisateur de savoir quels équipements prévoir pour l'activité ;

³ Version : Navisworks Manage 2015 version 12.2.0

- **informations spatiales (Niveaux 3, 4, 5 et 6 du LBS présentés dans la section 3.2.1.3.);**
 - **étage** : Renseigne sur l'étage de l'élément ;
 - **phase** : Renseigne sur la phase dans laquelle est réalisé l'élément ;
 - **zone** : Renseigne sur la zone où est situé l'élément ;
 - **secteur** : Renseigne dans quel secteur est situé l'élément ;
- **informations sur les intervenants ;**
 - **Masterformat et Unifomat** : Il s'agit de la codification des éléments selon les systèmes de classification Masterformat et Unifomat. La présente stratégie permet l'utilisation de ces deux systèmes de structuration du projet, cependant, le système MasterFormat est plus adapté pour la phase de réalisation des travaux ;
 - **intervenant** : Permet de préciser quel intervenant est responsable de l'activité (Plombier, Peintre...). Un même intervenant peut réaliser des activités avec des codes MasterFormat et Unifomat différents. Cela peut être le nom de l'entreprise ;
 - **équipe** : Permet de préciser quelle équipe réalise les travaux. Dans le cas où il y a plusieurs équipes pour un même intervenant ;
 - **fournisseur** : Permet de préciser quel est le fournisseur des matériaux ou équipements ;
- **informations sur les dimensions ;**
 - **longueur et surface** : Permettent d'obtenir les dimensions des éléments à géométrie variables (murs, planchers...).

Le tableau de l'**annexe 2** présente le nom de paramètre correspondant ainsi que les paramètres créés pour les besoins du projet.

5.1.3 Parties prenantes

La présente stratégie de communication ne propose pas de solution pour assister les utilisateurs dans la modélisation du projet (architecturale, structurel, MEP...). La stratégie vise plutôt une aide à la planification des travaux, elle intervient à une étape du projet où la documentation sur la conception est déjà complète. Néanmoins, si une maquette numérique a été créée durant la phase conception, elle pourra servir de base pour l'application du processus diminuant ainsi la

charge de travail pour monter le modèle. Le processus est principalement destiné au gestionnaire de projet, mais vise à supporter la collaboration entre les différentes parties prenantes en phase construction. Tous les acteurs sont donc invités à intervenir au cours du processus (Équipes de réalisation, Sous-traitants, Fournisseurs, Architectes, Ingénieurs...). Les relations et responsabilités des différents intervenants sont détaillées dans la figure 5.1 ci-après.

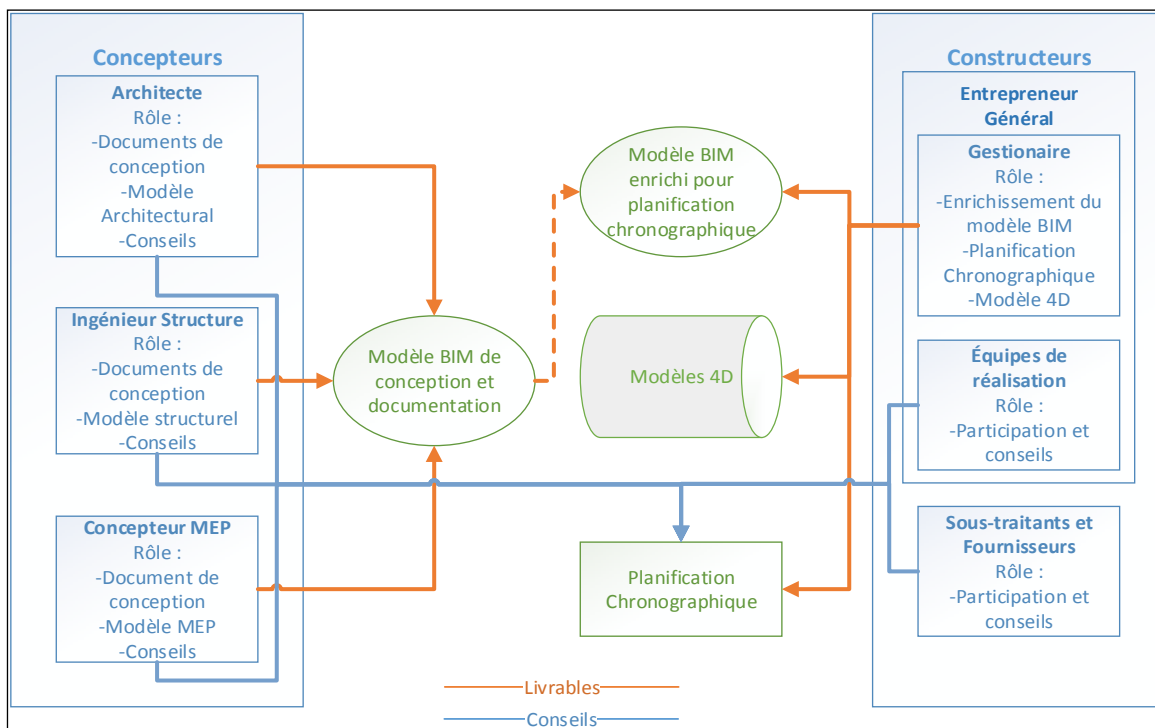


Figure 5.1 Rôles et relations entre les différents intervenants

Le gestionnaire occupe une place centrale dans le processus défini, car il est responsable du raffinement de la maquette numérique BIM, de la planification Chronographique ainsi que de la réalisation du ou des modèles 4D. Le gestionnaire de projet doit donc être formé pour l'utilisation des différents logiciels ou s'entourer d'une personne qualifiée.

Afin de guider les concepteurs dans la création de maquettes numériques BIM, une référence spécifiant les niveaux de développement des éléments des modèles a été créée : le LOD (Level of Development) de l'AIA. Le LOD d'un élément du modèle numérique correspond au degré

de précision de la géométrie et des informations rattachées. Le LOD des éléments doit alors être défini en fonction des usages désirés de la maquette numérique BIM.

Dans le cadre du présent projet, le LOD de la maquette numérique peut avoir une influence sur la difficulté de préparation du modèle pour la planification. Ceci, car le LOD de conception va être généralement différent du niveau de détail de planification. Par exemple pour un objet de type porte, le LOD de conception considère la porte dans son intégralité (cadre + porte + poignée). Cependant il est fréquent que la pose de ces différents éléments se fasse dans des activités distinctes à différentes étapes. Pour que le modèle soit adapté à l'échéancier, il faudrait alors séparer ces différents éléments. Par ailleurs, la quantité de cadres est la même que la quantité de portes et que la quantité de poignées. L'utilisateur peut donc utiliser ces quantités pour planifier les trois activités. Ainsi l'utilisateur sera donc amené à définir sur la base de son jugement le niveau de détail qu'il souhaite avoir. Le niveau de détail de la maquette pour la planification sera alors plus ou moins élevé que le LOD.

Concernant l'ajout d'informations, il est possible que certaines informations soient ajoutées en amont lors de la création des modèles de conception. Il convient donc de bien définir les responsabilités de chaque personne travaillant sur la modélisation du projet ainsi que de mettre en place les structures de communications adéquates. Ces aspects sortent cependant du cadre de ce mémoire et pourraient faire le fruit d'autres recherches.

5.1.4 Présentation générale du processus

Le processus de communication identifié lors de l'analyse expérimentale se divise en cinq (5) étapes et se réalise sur quatre (4) outils différents :

- la première étape concerne la préparation d'une maquette numérique (ou adapter la maquette de conception au niveau de détail souhaité) qui reflète les perspectives de construction et qui contient les informations utiles à la planification Chronographique. Cette étape sera réalisée sur Revit ;

- la seconde étape consiste en l'extraction et l'export des données de la maquette numérique pour alimenter le concept de planification Chronographique. Cette étape sera réalisée sur Dynamo ;
- la troisième étape réalise la planification d'exécution du projet par l'intermédiaire de la méthode Chronographique. Cette étape aboutit à la création d'un échancier de réalisation reflétant la coordination des différents intervenants à travers le temps et les espaces du site de construction. Cette étape sera réalisée sur le progiciel de modélisation Chronographique sur VBA-Excel. Elle sert aussi à enrichir la base de données exportée via Dynamo ;
- la quatrième étape sert à retourner des informations, Via Dynamo, depuis Excel vers Revit ;
- la cinquième étape s'intéresse au montage du modèle 4D en reliant la maquette de construction BIM et l'échancier de réalisation. Ce modèle servira pour la vérification de la cohérence de l'échancier et à des fins de communication des séquences de travaux aux différents acteurs du projet. Cette étape sera réalisée sur Navisworks.

L'utilisation des différents outils à travers ces différentes étapes permettra à l'utilisateur :

- d'ajouter, de consulter et de manipuler des données de projet relatives à la réalisation des ouvrages (maquette numérique, planification Chronographique) ;
- de fournir un outil d'aide à la décision pour la création et le contrôle des échanciers de réalisation (planification Chronographique, simulation 4D) ;
- de fournir différentes possibilités de communications et de discussions des séquences d'activités planifiées entre les différents acteurs impliqués (Planification Chronographique, simulation 4D).

La figure 5.2 présente les différentes étapes du processus et indique les actions à réaliser à chaque étape.

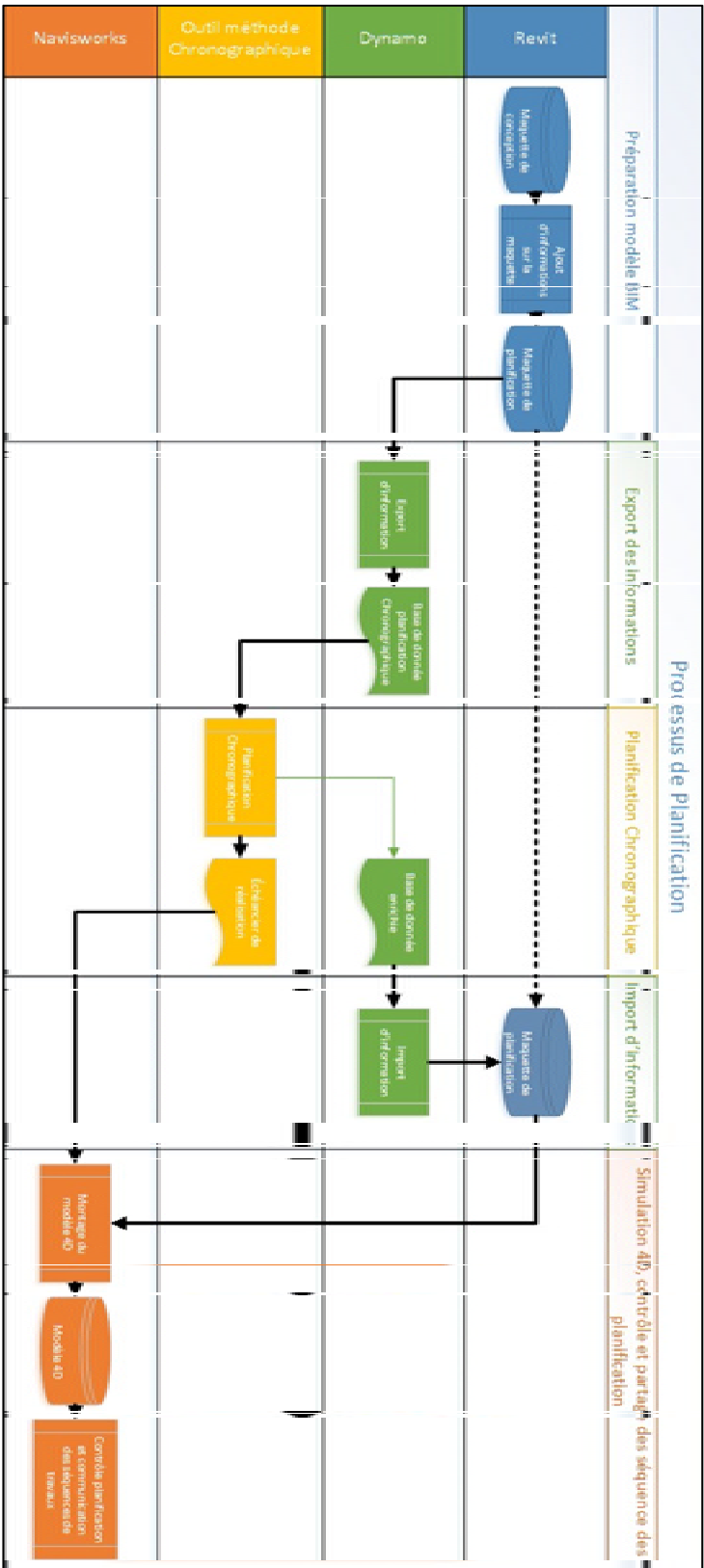


Figure 5.2 Étapes du processus

5.2 Préparation de la maquette numérique

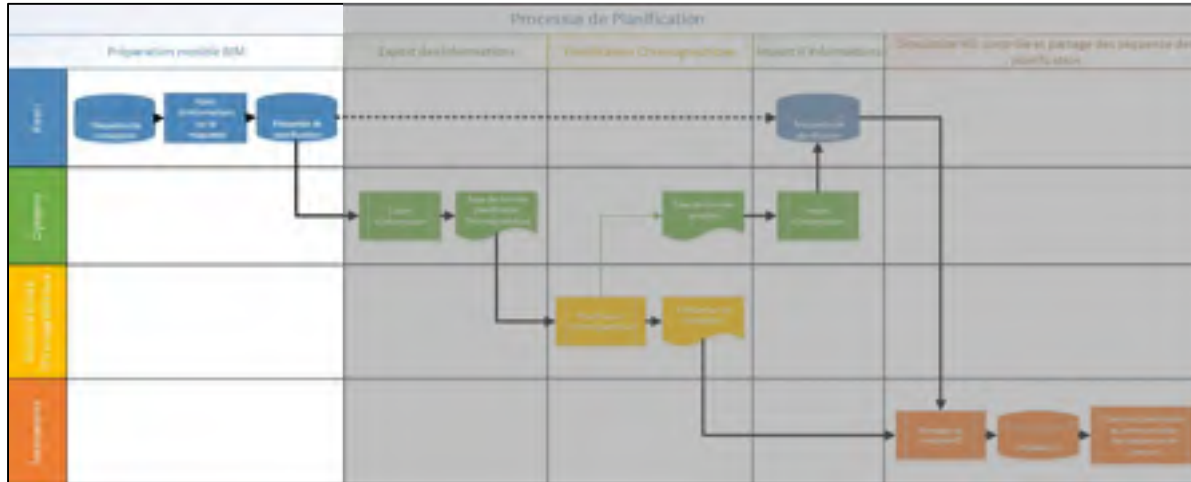


Figure 5.3 Étape 1 « préparation de la maquette numérique »

Cette étape du processus consiste à obtenir une maquette numérique BIM exploitable pour réaliser une modélisation Chronographique de la planification. L'objectif ici est de rajouter des informations spatiales et sur les intervenants nécessaires à la création de l'échéancier avec la méthode Chronographique voir figure 5.3. Cette section présente alors les problématiques rencontrées, les solutions adoptées et les outils développés pour accomplir cette tâche.

5.2.1 Problématiques rencontrées

L'analyse expérimentale a permis de confirmer que les outils de modélisation BIM étaient actuellement destinés à résoudre des problématiques de conception des ouvrages. En effet, la majorité des fonctionnalités et des paramètres prédéfinis ne permettent pas d'exploiter de façon optimale la maquette numérique en phase de réalisation des ouvrages. Cependant, les grandes possibilités de personnalisations ont permis d'ajouter et d'exploiter les informations requises.

Voici les problématiques en question :

- un grand nombre de définitions de paramètres doivent être ajoutées afin de pouvoir renseigner des informations manipulées par la méthode Chronographique sur les éléments du modèle ;
- différentes possibilités existent pour créer les paramètres dépendamment de l'utilisation que l'on souhaite en faire. Certains paramètres permettront de conserver l'information pour les futurs projets et d'autres non ;
- il existe différentes catégories d'objets, qui obligent à prendre différentes dispositions pour la création, le partage et la sauvegarde des paramètres. Notamment concernant les **familles systèmes**, qui ne peuvent pas être enregistrées dans des bases de données externes ;
- la saisie des informations sur Revit peut être une tâche extrêmement chronophage dépendamment du niveau de développement de la maquette de conception, de la richesse des bibliothèques d'objets à disposition ou encore de l'habilité de l'utilisateur à manipuler le logiciel.

Pour apporter des solutions à ces différentes problématiques, le choix a été fait de développer un gabarit Revit dédié à la planification Chronographique et de créer des scripts Dynamo pour simplifier la création et la saisie des paramètres. Ceci permet de faciliter la mise en place d'une bibliothèque d'objets adaptés à la planification Chronographique.

5.2.2 Création d'un gabarit Revit, adapté à la planification Chronographique

La création d'un gabarit Revit pour la stratégie est destinée à fournir une interface adaptée pour enrichir la maquette numérique. Cette section présente le gabarit Revit créé et décrit les avantages de son utilisation pour enrichir le modèle BIM.

5.2.2.1 Présentation des Gabarits Revit

Les gabarits de projet Revit fournissent un point de départ pour la modélisation d'un projet. Ils permettent de personnaliser un grand nombre d'éléments tel que des vues, des paramètres ou

encore de pré-charger différentes **familles**. Ces gabarits permettent en quelques sortes de travailler sur un projet avec une interface adaptée aux besoins d'une spécialité donnée. Revit fourni avec la version 2015 quatre gabarits de projets prédéfinis : Gabarit « Construction⁴ », gabarit « Architecture », gabarit « Structure » et gabarit « Génie climatique ». Ces différents gabarits se différencient par des gabarits de vues différents permettant de visualiser les objets du modèle de différentes façons selon la spécialité qu'ils reflètent, ou encore par des nomenclatures différentes. Pour illustrer ces différences, la figure 5.4 montre les mêmes objets dans deux gabarits différents (Gabarit « construction » et Gabarit « génie climatique »).

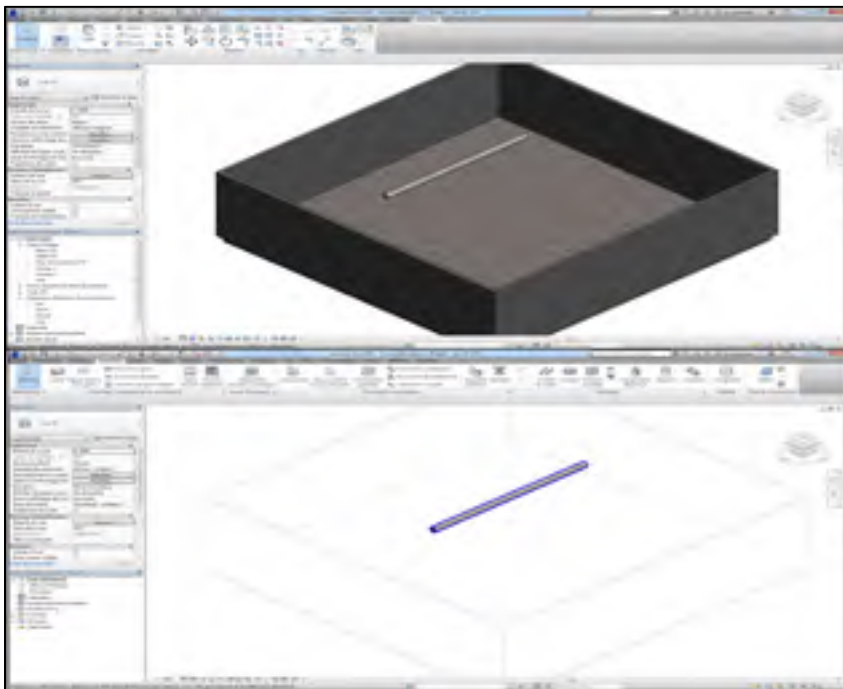


Figure 5.4 Modèle dans deux gabarits différents
(Construction en haut, Génie climatique en bas)

Dans le gabarit « construction », tous les éléments sont représentés graphiquement de la même manière tandis que dans le gabarit « Génie climatique » (destiné à la création de modèles MEP) les murs et planchers sont représentés en image filaire tandis que les canalisations sont en

⁴ Remarque : Bien que les concepteurs de Revit aient choisis de nommer le gabarit « Construction », ce gabarit n'est cependant pas adapté aux besoins du projet. C'est pourquoi un nouveau gabarit a été développé.

surbrillances et colorés. De plus, l'arbre de sélection, des vues du projet, est différent selon le gabarit. Dans le gabarit construction, les vues sont organisées par niveaux (étages) et dans le gabarit Génie climatique, elles sont organisées par spécialités (Génie climatique, Plomberie...) puis par niveaux. Ces organisations de vues peuvent tout à fait être modifiées et enregistrées dans un nouveau gabarit. Des **familles chargeables** spécifiques (raccords, équipements spécialisés...) sont par ailleurs chargées directement dans le gabarit de génie climatique et non dans le gabarit construction.

Revit offre par ailleurs la possibilité de créer des gabarits personnalisés. Il s'agit d'une étape capitale qui permet de prédéfinir un ensemble de vues, d'objets et de paramètres personnalisés et de simplifier le travail de modélisation. Cette fonctionnalité permet par ailleurs de visualiser la maquette numérique et les informations rattachées sous différents points de vue adaptés aux différentes pratiques et spécialités. Il s'agit donc en quelque sorte de « vues métiers ».

5.2.2.2 Gabarit dédié à la planification Chronographique

Dans notre cas, la création d'un Gabarit personnalisé permet de solutionner différentes problématiques rencontrées pour la transformation de la maquette. Ce gabarit conçu sur Revit est appelé « Gabarit de planification Chronographique », car il est personnalisé afin d'organiser le modèle de sorte à communiquer avec la modélisation Chronographique de la planification.

Au niveau de la création des paramètres

Premièrement, il faut ajouter un nombre relativement important de définitions de paramètres aux projets pour pouvoir saisir les informations nécessaires au concept de planification Chronographique. Cela demande un temps considérable et peut favoriser le risque d'erreurs lors de la création des paramètres personnalisés (paramètres projets, de type, d'**occurrences**...). La mise en place du gabarit personnalisé permet d'alléger ce processus car une fois créés, les paramètres et les vues pourront être réutilisés pour différents projets sans

avoir à être modifiés ou adaptés. La majorité des paramètres manipulés pour un projet peuvent être définis dans le gabarit ce qui simplifie énormément la tâche de définition des paramètres. Les seuls paramètres que l'utilisateur aura besoin de créer, sont les paramètres de type pour les **familles chargeables**. Une solution a été mise en place pour gérer ces exceptions. Elle est présentée ci-après, dans la section **5.2.3 Création d'outils pour faciliter la création de paramètres**.

Au niveau des familles système personnalisées

Les **familles systèmes** et leurs paramètres ne peuvent pas être sauvegardés sur des supports externes comme les **familles chargeables**. Pour pouvoir réutiliser des **familles systèmes** il faut soit les enregistrer dans les gabarits de projets, soit les transférer d'un projet à l'autre. Il serait donc tout à fait possible de transférer les **familles** entre différents projets. Cependant, le nombre de sources deviendrait alors important et cela demanderait un effort considérable à l'utilisateur pour retrouver dans les projets précédents les **familles** désirées. L'enregistrement des **familles systèmes** et des propriétés ajoutées dans un gabarit unique permettra alors de réduire les manipulations nécessaires à la transformation de la maquette. Pour simplifier la tâche de définition des paramètres du gabarit, les paramètres ont été créés à partir de définitions de paramètres partagés. Ceci permet de plus, de pouvoir appliquer des filtres d'éléments en fonction des valeurs des paramètres personnalisés.

Au niveau de la saisie des informations

La création de gabarits personnalisés permet de définir des gabarits de vues personnalisés. Ces gabarits de vue permettent de contrôler les éléments visibles et de manipuler les propriétés graphiques de ces éléments (comme l'illustre la figure 5.3 où la canalisation est automatiquement représentée en surbrillance).

La tâche de saisie des paramètres est un processus long et rigoureux, car il doit être réalisé manuellement en naviguant à travers différentes vues du modèle. Les zones et secteurs doivent

être saisis manuellement et sont différents pour chaque phase. En créant des gabarits de vues personnalisés, il est alors possible de générer des vues d'étage ne faisant apparaître que les éléments d'une phase donnée. Il sera donc plus simple pour l'utilisateur de sélectionner les bons éléments dans des plans de phase que dans des vues où tous les éléments sont affichés.

Par ailleurs, le concept de planification Chronographique utilise dans certaines représentations graphiques des plans d'étages. Les plans de phases définis dans le gabarit pourront alors servir pour alimenter l'outil de planification Chronographique.

La création d'un gabarit dédié à la planification Chronographique permet donc de travailler la maquette numérique dans une interface adéquate et simplifie le travail de préparation de la maquette numérique.

5.2.3 Création d'outils pour faciliter la création des paramètres

La majorité des définitions des paramètres à créer pouvaient être prédéfinies dans le gabarit. Seuls les paramètres de types de **familles** doivent être ajoutés manuellement. Étant donné le nombre important de paramètres de type à définir, cette tâche peut s'avérer très longue en fonction du nombre de **familles** d'objets à traiter. Pour rappel, il faut ouvrir l'éditeur de **famille** pour chaque **famille** et effectuer rigoureusement plusieurs opérations pour créer chacune des définitions de paramètres. Les projets contiennent généralement un grand nombre de **familles chargeables** et celles-ci diffèrent souvent d'un projet à l'autre.

L'utilisateur sera donc amené, régulièrement, à effectuer les opérations de définitions des paramètres de type pour les rendre exploitables.

L'add-in dynamo permet d'automatiser un certain nombre de manipulations sur Revit. Un script dynamo a donc été développé pour permettre à l'utilisateur de créer simultanément plusieurs définitions de paramètres. Ceci permet de diminuer drastiquement le temps de création des définitions de paramètres de types et assiste l'utilisateur dans l'enrichissement de ses bibliothèques d'objets. Plus de détails sur le script sont fournis en **annexe 1**.

5.2.4 Les bibliothèques d'éléments

Les bibliothèques d'éléments jouent un rôle très important pour le présent concept. En effet, plus les bibliothèques d'éléments à disposition seront riches et moins l'utilisateur passera de temps durant l'étape de transformation de la maquette numérique. En effet, la tâche la plus chronophage de cette étape du processus consiste à saisir les informations sur la maquette numérique. Pour une partie de ces informations, l'utilisateur aura la possibilité de les sauvegarder soit dans une bibliothèque externe (pour les **familles chargeables**) soit dans le gabarit dédié à la planification Chronographique (pour les **familles systèmes**). Une bibliothèque sommaire d'éléments a par ailleurs été créée pour illustrer le concept.

5.2.5 Le cas particulier des familles multicouches

L'une des contraintes identifiées pour l'exploitation de Revit pour la planification Chronographique résidait dans la nature des **familles Système multicouches** (murs et planchers), voir section 4.3.2. En effet, il n'est pas possible de créer des paramètres enregistrables pour les différentes couches. Afin de pouvoir travailler correctement, il est alors nécessaire de séparer les éléments multicouches en plusieurs éléments monocouches. Ainsi deux possibilités sont envisageables pour obtenir des éléments monocouches :

- modéliser les murs (et planchers) en créant des murs (et planchers) différents pour chacune des couches (porteur, isolation...). Cette possibilité oblige l'utilisateur à remodeler une partie de la maquette de conception ;
- utiliser l'add-in « Smart Walls » développé par Agacad. Cet add-in permet de séparer très facilement tout type d'éléments multicouches en plusieurs éléments monocouches. Cet add-in est payant, mais permet un gain de temps considérable par rapport à la première solution.

Les différentes couches de murs et les paramètres associés seront alors enregistrés indépendamment dans le gabarit permettant ainsi de sauvegarder les informations ajoutées.

5.2.6 Saisie des informations

La tâche de saisie des valeurs des différents paramètres peut s'avérer très longue. En effet chaque élément dispose d'un nombre relativement important de paramètres que l'on souhaite renseigner et exporter. Cependant, grâce aux possibilités d'import-export entre Revit et Excel, une partie de ces paramètres pourra être saisie sur Excel ce qui simplifiera la tâche pour l'utilisateur. Par ailleurs, bon nombre d'informations pourront être chargées directement grâce aux bibliothèques d'éléments.

La planification Chronographique propose un grand nombre de fonctionnalités manipulant les différentes informations. Cependant, l'utilisateur n'est pas obligé d'exploiter l'ensemble de ces possibilités pour réaliser la planification d'un projet. Il ne sera donc parfois pas nécessaire pour certains éléments du modèle numérique BIM, de compléter l'ensemble de ces informations.

L'utilisateur pourra en fonction de ces besoins, choisir de compléter les différentes informations sur Revit ou via l'application Chronographique. Si les informations sont saisies via l'application de planification : elles pourront ensuite être envoyées vers les maquettes numériques afin d'être enregistrées dans les bibliothèques d'éléments et être réutilisées pour d'autres projets.

Seules les informations concernant la localisation des éléments sont à rentrer impérativement lors de la préparation de la maquette numérique. C'est grâce à celles-ci que le lien entre les espaces du chantier et les activités peut être créé. Pour réaliser ces saisies d'informations, il est alors recommandé d'utiliser les différentes vues personnalisées du gabarit de planification Chronographique présentées précédemment.

5.2.7 Processus détaillé de préparation de la maquette numérique

La figure 5.5 présentée ci-après présente le processus détaillé de l'étape 1 : préparation de la maquette numérique.



Figure 5.5 Processus de préparation de la maquette numérique

Le processus de préparation de la maquette numérique prend en compte deux cas de figure, soit une maquette de conception du projet est déjà disponible, soit le gestionnaire doit en créer une.

Cas où une maquette numérique de conception est disponible

Dans le cas où une maquette numérique de conception est déjà disponible, la première étape consiste à adapter la maquette de conception au niveau de détail souhaité. Le « gabarit de planification Chronographique », a été conçu dans ce but (voir section **5.2.2 Création d'un gabarit adapté à la planification Chronographique**). Ainsi, l'utilisateur n'a pas besoin de redéfinir des différents paramètres et d'importer les bibliothèques de **familles systèmes** personnalisées.

La seconde étape consiste à séparer les éléments multicouches. Pour simplifier le travail de saisie des paramètres, l'utilisateur peut ensuite remplacer certaines **familles** du modèle par des **familles** personnalisées disponible dans sa bibliothèque.

L'étape suivante est l'une des plus importantes du processus, car elle consiste à saisir les informations pour les paramètres de localisation des éléments (Zones et Secteurs). C'est à cette étape que la création du LBS se fait. Pour simplifier le travail, les plans de phases permettent

de voir les éléments d'un étage qui vont être réalisés pour une phase donnée. Ainsi il sera plus facile d'identifier les différentes zones et les différents secteurs de chacune de ces phases. Pour la suite du processus, il faut que les informations spatiales soient entrées avant l'export des informations du projet.

L'utilisateur peut selon ses besoins décider de remplir d'autres informations directement sur le modèle avant d'exporter les informations.

Cas où il est nécessaire de créer une maquette numérique

Dans le cas où l'utilisateur est amené à devoir créer un modèle numérique, il est conseillé de travailler directement dans le gabarit de planification Chronographique développé et d'utiliser les différentes bibliothèques d'éléments personnalisés. Une fois le modèle créé, les étapes de saisie de préparation de la maquette sont relativement semblables à celles présentées précédemment.

Néanmoins, pour simplifier le travail de saisie des paramètres, l'utilisateur peut effectuer ces tâches au fur et à mesure de la construction du modèle. Par exemple, dans le cadre d'un projet d'immeuble à étages répétitifs, il pourra renseigner les différents paramètres de localisation des éléments pour un étage et ensuite dupliquer cet étage sur différents niveaux. Ceci diminuera largement le travail de préparation.

5.2.8 Discussions sur la préparation de la simulation 4D

Concernant les informations spatiales :

Cette étape de préparation de la maquette numérique est l'étape essentielle de la stratégie de communication. En effet, c'est lors de cette étape que la maquette est adaptée pour des perspectives de réalisation des ouvrages. Ceci se fait par le biais d'ajouts d'informations

spatiales (Phases, zones, secteurs) qui ne sont pas présentes automatiquement lors de la création du modèle.

La principale limitation de la stratégie adoptée pour accomplir cette tâche réside dans le temps nécessaire à la saisie des informations. Ceci s'explique principalement par le manque de fonctionnalités offertes par le logiciel Revit pour organiser le modèle spatialement. En effet, une fonctionnalité permettant de remplir automatiquement ces informations pourrait être développée (soit par Revit soit par la création d'un add-in) en exploitant les coordonnées géométriques des éléments du modèle. L'effort de recherche n'étant pas destiné à la création d'un tel outil, la décision a été prise de saisir ces informations manuellement. Un outil permettant de créer des vues à partir de zones définies par l'utilisateur est par ailleurs déjà disponible. Cependant, aucune information sur la zone de définition créée n'est visible dans les paramètres des éléments de cette zone. De plus, peu de possibilités sont offertes en termes de modification de la forme de cette zone (forme de prisme rectangulaire). Une telle fonctionnalité pourrait, si elle existe, simplifier grandement le travail.

Concernant les autres informations non spatiales :

L'ajout des autres informations à partir du logiciel Revit pourrait s'avérer très long. Mais l'une des forces de la stratégie réside dans la possibilité de saisir ces informations à différentes étapes du processus.

Les informations vont pouvoir être ajoutées :

- lors de l'importation des éléments depuis les bibliothèques personnalisées ;
- lors de la préparation du modèle ;
- lors de la planification du projet avec l'outil de modélisation Chronographique.

5.3 Export/Import des informations du projet

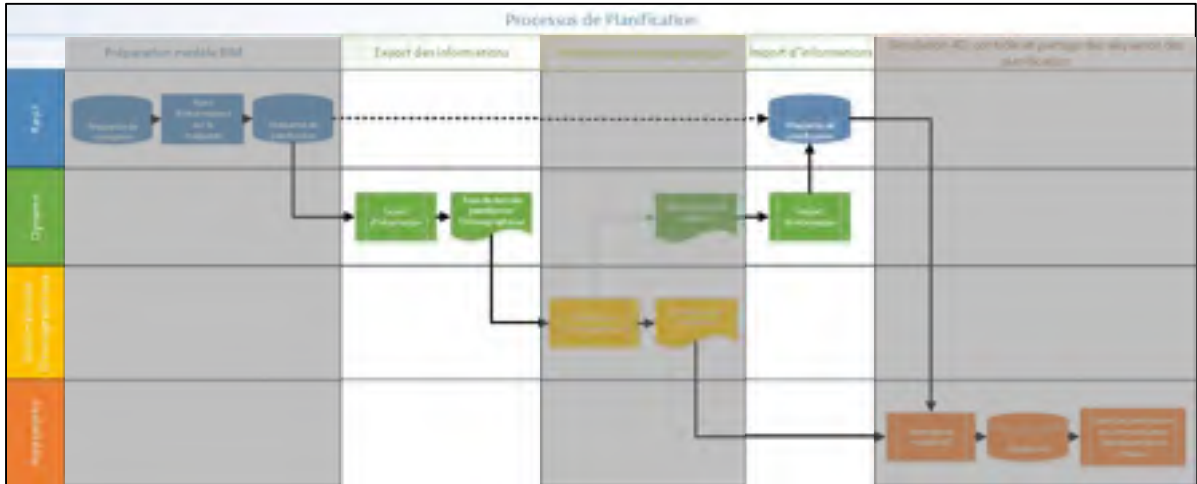


Figure 5.6 Étape 2 « export des informations » et étape 4 « import des informations »

Les étapes 2 et 4 (voir figure 5.6) concernent la communication des informations du projet avec l'application de planification Chronographique. L'étape 2 concerne l'export des informations de Revit vers l'application Chronographique développée en VBA Excel et l'étape 4 concerne l'import d'informations à partir de l'application de planification vers Revit. La solution retenue pour réaliser l'import/export des informations du projet vers Excel est l'utilisation de l'add-in Dynamo présenté dans la section **4.6.5 Création d'un script Dynamo**. Cette partie présente les scripts réalisés pour l'export et l'import d'informations ainsi que la structure de la base de données créée.

5.3.1 Présentation de la logique pour réaliser l'export import d'information avec Dynamo

Dynamo permet de réaliser différentes opérations sur les éléments d'un modèle Revit grâce à une interface de programmation visuelle. Par programmation visuelle, il faut comprendre que l'utilisateur réalise un programme (appelé script) en reliant différents « Nœuds » par des flèches. Les nœuds sont en fait des scripts écrits en langage de programmation Python. Dynamo propose un grand nombre de nœuds standards permettant d'effectuer un grand

nombre d'opérations diverses et varier. Cette section présente les nœuds utiles pour gérer l'export/import des informations du projet avec le logiciel Excel.

L'objectif de cette partie est d'obtenir des nomenclatures des différents éléments du projet comportant les informations utiles pour la planification Chronographique. L'idée est donc d'extraire pour chaque objet du modèle, les valeurs de différents paramètres (**Famille**, Étage, zone, secteur, fournisseur...). Pour exporter les valeurs des paramètres, on utilise plusieurs nœuds : un nœud pour sélectionner les objets du modèle ; des nœuds pour récupérer les valeurs des paramètres (les valeurs de sorties de chaque nœud sont des listes de valeurs) ; des nœuds pour combiner ces listes et créer des tableaux ; et finalement, des nœuds pour sélectionner un fichier Excel et y écrire les différentes valeurs des paramètres. La figure 5.7 présentée ci-après illustre le principe des scripts d'export avec Dynamo pour la catégorie d'objet « Portes » et pour les paramètres Niveau (Étage) et Zone.



Figure 5.7 Principe de l'export d'informations avec dynamo

Pour importer des informations à partir d'un fichier Excel, il faut utiliser des nœuds pour lire l'information dans Excel, sélectionner les éléments dont on souhaite changer le paramètre et utiliser un nœud qui va écrire dans le paramètre que l'on souhaite renseigner. La figure 5.8 illustre le principe d'import d'information avec Dynamo.

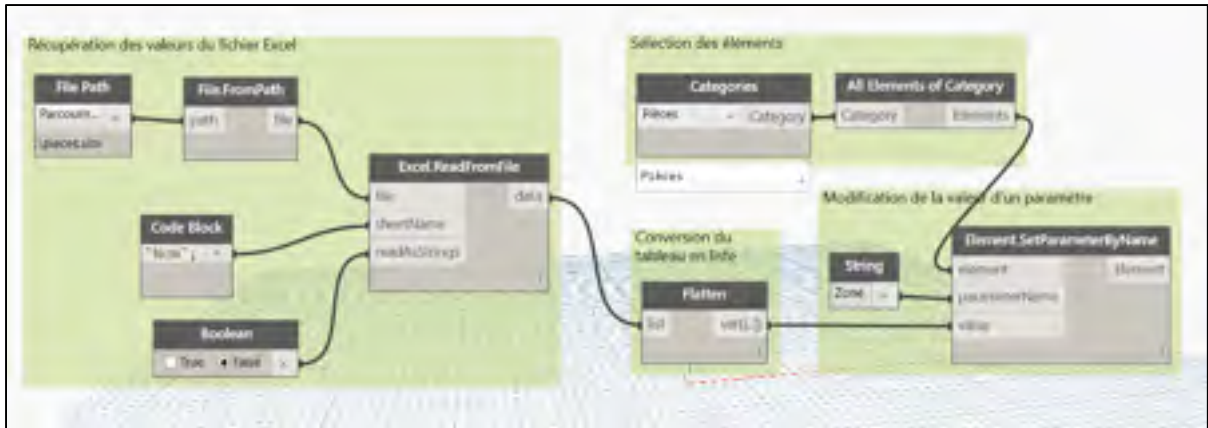


Figure 5.8 Principe de l'import d'informations avec Dynamo

Ces deux principes de scripts fonctionnent très bien pour gérer l'export et l'import de paramètres projet d'**occurrences**. Néanmoins, les nœuds standards de Dynamo ont quelques limites présentées dans la section suivante.

5.3.2 Contraintes à prendre en compte pour réaliser les scripts

La partie précédente expose le principe général de création des scripts d'import/export d'informations entre Revit et Excel. Cependant, certains facteurs sont à prendre en compte pour que les scripts soient opérationnels pour tous types d'éléments et de paramètres :

- les informations définies automatiquement sur Revit (Famille, Type de famille, Étage) ne sont pas définies de la même manière pour les **familles systèmes** et les **familles chargeables**. Par exemple, le paramètre contenant l'information sur l'étage de l'élément s'appelle « Niveau » pour les **familles chargeables** et « Contrainte inférieure » pour les **familles systèmes**. La figure 5.9 illustre l'impossibilité d'obtenir l'étage où se situe un mur en appelant le paramètre « Niveau » ;

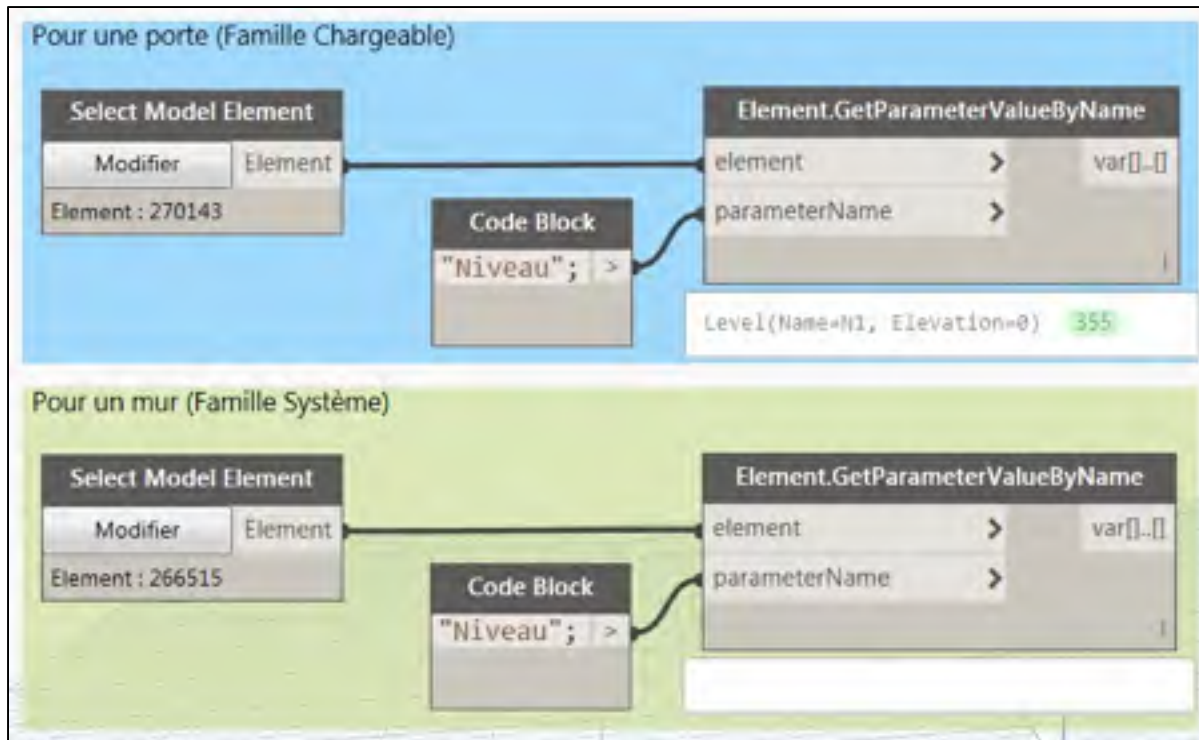


Figure 5.9 Différence de lecture du paramètre niveau

- d'autre part, il y a plus d'informations à exporter pour les **familles systèmes**. Les dimensions des éléments (murs, planchers...) vont avoir une influence sur le temps de réalisations des activités associées ;
- concernant les paramètres de **type de famille**, les nœuds prédéfinis sur dynamo ne permettent pas de lire ou d'écrire dans ces paramètres à partir de l'objet : « Élément Revit ». La lecture ou l'écriture dans un paramètre doit se faire sur l'objet : « Type de famille ». La figure 5.10 illustre la différence de lecture des paramètres d'**occurrences** des paramètres de **type de famille**⁵ ;

⁵ Remarque : Cette illustration permet de plus de visualiser qu'une trentaine de paramètres sont définis au niveau de l'occurrence et qu'une quarantaine sont définis au niveau du type de famille. Ce qui représente beaucoup d'informations pour un seul élément.

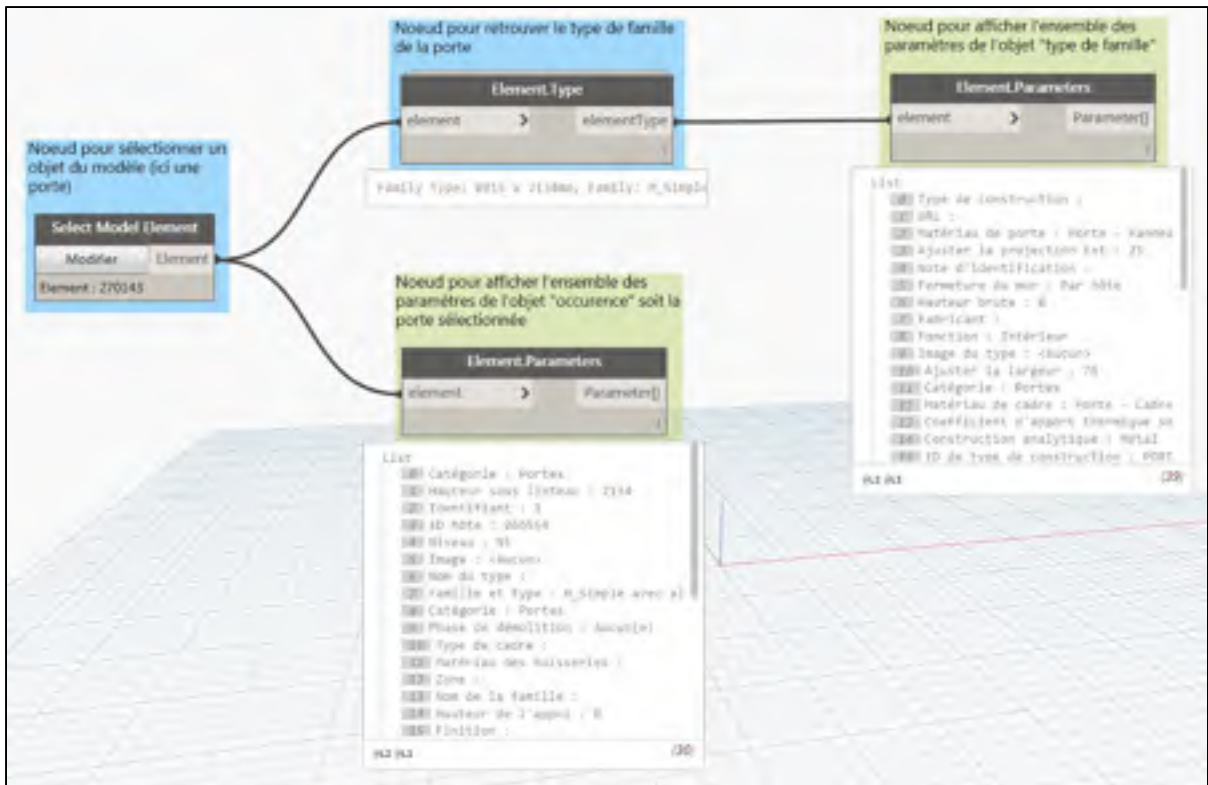


Figure 5.10 Lecture des paramètres d'occurrences et des paramètres de type de famille

- pour certains paramètres, le format de sortie n'est pas adapté à l'utilisation que l'on souhaite en faire. Par exemple, en sortie du nœud de lecture du paramètre « Niveau » (Étage de l'élément) pour un élément situé au niveau N1 (1^{er} étage), l'information est sous le format suivant : « Level1 (Name=N1, Elevation=0) ». Or l'ensemble de ces informations n'est pas nécessaire, seule l'information « N1 » importe pour l'utilisation que l'on souhaite en faire. Des problèmes similaires se retrouvent pour la lecture des paramètres **famille** et **type de famille** ;
- les informations sur les matériaux des éléments sont définis automatiquement sur Revit. Cependant, les nœuds de base ne permettent pas d'obtenir les informations directement. D'une part les informations utiles peuvent, en fonction des cas, être définies soit dans l'objet « Élément Revit », soit dans l'objet « Type de Famille » ou encore dans l'objet « Matériaux » associé à l'élément. D'autre part, ces informations ne correspondent pas toujours à ce que l'on cherche à manipuler pour la méthode Chronographique. Par exemple,

pour une activité de pose de robinetterie, le matériau rattaché avec la méthode Chronographique sera « Robinet », tandis que la lecture du paramètre matériaux de l'objet correspondant dans le modèle sera « Chrome » ou « Inox » ;

- pour que les scripts d'import fonctionnent correctement, il est nécessaire de conserver les listes de paramètres dans le même ordre qu'elles ont été extraites. Aucune modification du fichier Excel n'est donc autorisée au risque de perdre la fonctionnalité de retour d'information ;
- les chaînes de caractère d'entrée des nœuds de lecture et d'écriture dans les paramètres doivent être identiques au nom des paramètres Revit.

Une grande partie de ces différentes contraintes traduisent en réalité les limitations de Dynamo. Les nœuds prédéfinis par Dynamo ne sont pas modifiables et ne permettent pas de réaliser d'autres actions spécifiques. Si l'utilisateur souhaite réaliser des actions différentes de celles prédéfinies, il doit créer de nouveaux nœuds. Soit, en combinant des nœuds de base existants, ce qui peut s'avérer difficile dans certains cas, soit, en créant des nœuds « Script python », ce qui implique une maîtrise du langage de programmation Python. Malgré cela, cet add-in simplifie l'effort de programmation grâce à des nœuds contenant le code nécessaire à la réalisation de plusieurs actions de base sur un projet Revit. Ceci diminue énormément le travail de programmation par rapport à l'utilisation de l'API Revit (programmation dans les langages C#, VB.NET, Python et Ruby). De plus, le côté visuel de l'add-in rend son utilisation accessible aux utilisateurs non formés en programmation.

5.3.3 Développement des scripts d'export et d'import d'information

La section précédente présente les contraintes liées à l'utilisation de Dynamo pour traiter l'échange d'informations entre Revit et Excel. Cette section, présente la méthodologie adoptée pour résoudre ces différents problèmes, les solutions développées et la structure du script réalisée pour gérer l'échange des informations du projet entre Revit et Excel.

5.3.3.1 Méthodologie de développement des scripts

Différents scripts et nœuds Dynamo ont alors été développés pour résoudre les contraintes exposées précédemment. Premièrement, quatre scripts différents ont été développés pour gérer plus facilement les différences entre l'import et l'export des **familles chargeables** et des **familles systèmes**. Deux modèles numériques ont été créés pour simplifier la création de ces scripts (modèle de **familles systèmes**, modèle de **familles chargeables**). Voici la démarche suivie :

- création d'un script pour réaliser l'export des paramètres de **familles chargeables** ;
 - création d'une maquette test avec différents types de **familles chargeables** et création et renseignement des paramètres (en suivant la démarche exposée dans la partie 1) ;
 - création de nœuds personnalisés pour résoudre les différentes contraintes ;
 - assemblage et test du script d'export pour les **familles chargeables** ;
- création d'un script pour réaliser l'export des paramètres des **familles systèmes** ;
 - Création d'une maquette test avec différents types de **familles systèmes** et création et renseignement des paramètres (en suivant la démarche exposée dans la partie 1) ;
 - création ou utilisation de nœuds personnalisés pour résoudre les différentes contraintes ;
 - assemblage et test du script d'export pour les **familles systèmes** ;
- création d'un script pour réaliser l'import des paramètres de **familles chargeables** ;
 - création ou utilisation de nœuds personnalisés pour résoudre les différentes contraintes ;
 - assemblage et test du script d'import pour les **familles chargeables** ;
- création d'un script pour réaliser l'import des paramètres des **familles systèmes** ;
 - création ou utilisation de nœuds personnalisés pour résoudre les différentes contraintes ;
 - assemblage et test du script d'import pour les **familles systèmes**.

Une fois que ces différents scripts ont été créés, ils ont été assemblés en deux nœuds (nœud d'export et nœud d'import) pour simplifier le travail de l'utilisateur.

5.3.3.2 Création de nœuds personnalisés

Cette section présente les nœuds créés pour apporter des solutions aux différentes contraintes exposées précédemment. Dépendamment de la fonction des nœuds créés et des nœuds de base disponibles, certains nœuds ont été créés en assemblant des nœuds de base, tandis que d'autres ont été développés via un script python.

Création de nœuds par assemblage de nœuds de base :

Les nœuds de lecture et d'écriture dans les paramètres ne permettaient pas de lire ou d'écrire dans les paramètres du **type de famille**. Cependant, bon nombre de nos paramètres personnalisés sont définis comme cela, car ils permettent d'attribuer une même information à toutes les **occurrences** d'une **famille** et de sauvegarder cette information. Des nœuds de lecture et d'écriture ont alors été créés pour lire ou écrire dans un paramètre indépendamment de sa nature (paramètre d'**occurrence** ou de type).

La figure 5.10 ci-avant montre que les nœuds de lecture des paramètres permettent de lire la valeur des paramètres pour les objets **occurrences** ainsi que pour les objets **types de familles**. Les nœuds développés sont alors basés sur un test logique qui détermine si le paramètre existe pour l'objet « **occurrence** » et si ce n'est pas le cas, de lire ou d'écrire sur l'objet **type de famille**. La figure 5.11 ci-après illustre le nœud de lecture de paramètres créé.

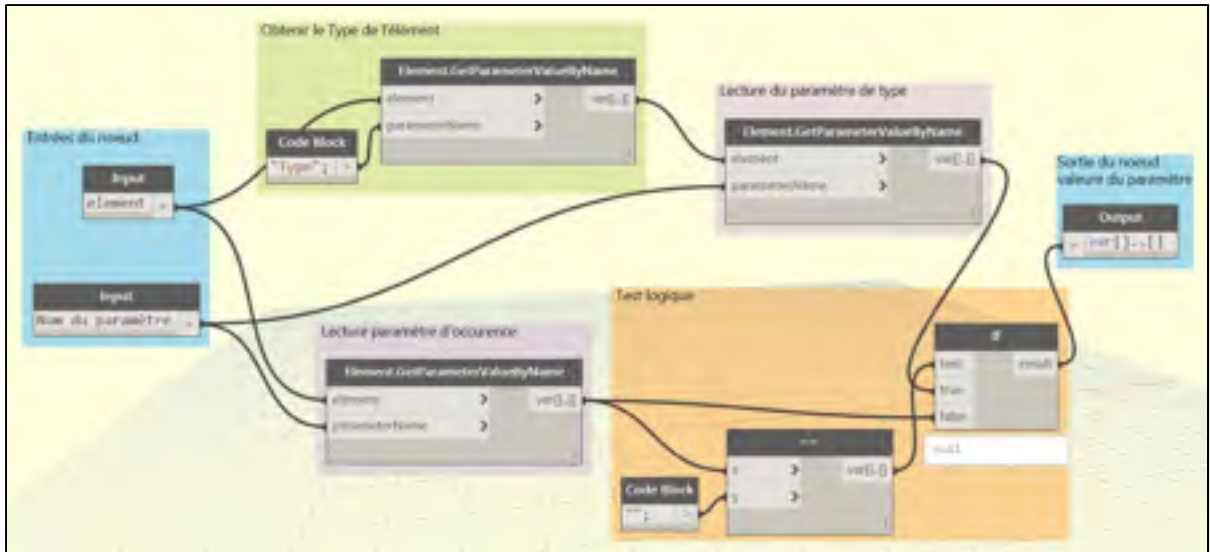


Figure 5.11 Nœud de lecture de paramètre personnalisé

Le nœud créé pour l'écriture est légèrement plus compliqué, car il a été conçu pour permettre d'écraser la valeur du paramètre en cas de besoin. Il a donc fallu créer trois tests logiques. Le nœud est présenté en **annexe 3**.

Création de nœuds « Script Python » :

La programmation visuelle présente l'avantage de créer des programmes sans maîtriser la syntaxe d'un langage de programmation. Cependant, un programme visuel peut parfois être encombré ou manquer de fonctionnalités. Les langages de programmation peuvent alors offrir des méthodes plus efficaces pour réaliser des tests logiques ou des boucles. C'est pourquoi Dynamo permet à l'utilisateur de faire appel aux fonctionnalités du langage de programmation Python pour créer des nœuds personnalisés.

Les nœuds « Script Python » permettent à l'utilisateur d'écrire du code dans une interface de programmation. L'utilisateur peut personnaliser le nombre d'entrées et de sorties de ces nœuds et accéder depuis dynamo à l'interface de programmation où il écrira son code.

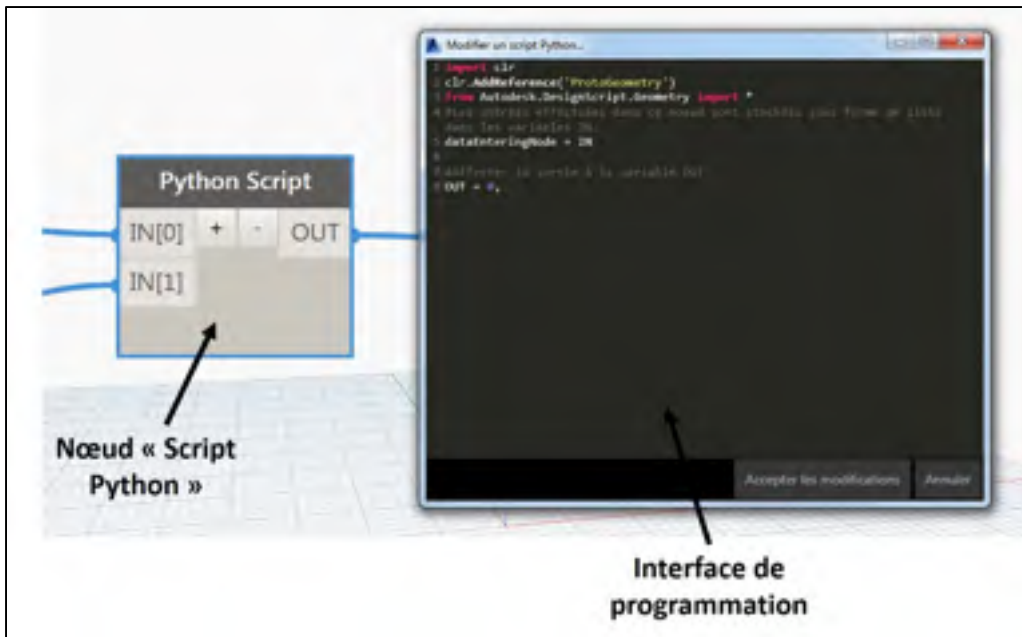


Figure 5.12 Nœud « Script Python » et interface de programmation

Il est par ailleurs possible d'importer les bibliothèques de l'API Revit dans l'environnement de programmation Dynamo et ainsi de développer des scripts pour tout type de tâche sur Revit. L'utilisation de tel type de nœud fournit alors une aide précieuse pour résoudre certaines des contraintes rencontrées pour exporter les données du projet.

Les fonctionnalités du langage de programmation Python (boucles, tests logiques...) ont permis de résoudre les problèmes de formats de sortie des nœuds. Des nœuds « Script Python » ont été créés pour travailler les formats de sorties des paramètres suivants :

- **niveau** : En sortie du nœud de lecture du paramètre niveau, le format de la liste était le suivant : Level1 (Name=N1, Élévation=0). Le script créé permet, pour tous les éléments de la liste, de ne conserver que l'information utile pour le concept à savoir le nom de l'étage « N1 ». Le script est présenté en **annexe 4** ;
- **famille** : Les nœuds de lecture des paramètres **Famille** et Type de **Famille** donnent le même résultat ; une liste affichant la même information sous le format suivant : Family Type : « Nom du Type », Family : « Nom de la **famille** ». Le script créé pour la mise en forme de la sortie du paramètre **famille** permet donc de séparer l'information du type de

celle de la **famille** et de n'en retenir que le nom pour tous les éléments de la liste d'entrée. Le script est présenté en **annexe 5** ;

- **type de famille** : Le nœud créé est semblable au nœud précédent et permet de conserver l'information sur le nom du **type de famille** uniquement. Le script est présenté en **annexe 6**.

La possibilité de travailler avec les méthodes de l'API Revit permet d'effectuer des opérations précises sur les éléments du modèle. L'utilisation de ces méthodes a donc permis la création de nœuds solutionnant la contrainte suivante :

- récupération du **niveau (Étage)** d'un élément pour différents type d'objets (issus de **familles** système ou chargeables) Revit. Le script est présenté en **annexe 7**.

Le tableau 5.1 ci-après récapitule les solutions apportées pour les contraintes rencontrées lors de la création des scripts d'export et d'import entre Revit et Excel.

Tableau 5.1 Contraintes et solutions pour la création des scripts Dynamo

Contraintes	Solutions
Différences entre les familles systèmes et chargeables : <ul style="list-style-type: none"> • nom des paramètres • informations à exporter 	Création de plusieurs scripts pour les différents cas de figure
Lecture et écriture des paramètres de type	Création de nœuds personnalisés (à partir de nœuds Dynamo)
Format de sortie pour les paramètres niveau, famille et type de famille	Création de nœuds personnalisés (Script Python)
Lecture du paramètre niveau pour toutes les familles	Création de nœuds personnalisés (Script Python)
Matériaux	Création d'un paramètre personnalisé appelé « Matériaux Chrono »
Ordre des listes de paramètre fixe	Utilisation du Fichier Excel servant de base de données intermédiaire pour l'application de planification Chronographique
Entrées des nœuds de lecture et d'écriture identiques aux noms des paramètres Revit	Les paramètres sont définis dans le gabarit Revit ils seront donc toujours les mêmes

5.3.3.3 Création des scripts d'export et d'import des informations du projet

Afin de gérer plus simplement les différences entre les **familles systèmes** et chargeables, les scripts Dynamo d'export et d'import ont été créés, dans un premier temps, indépendamment les uns des autres pour les différentes catégories d'éléments.

Les scripts composés des nœuds personnalisés ont été assemblés sur le même principe que celui expliqué dans la section **5.3.1 Présentation de la logique pour réaliser l'import et l'export d'information avec Dynamo** pour les différents paramètres. Ils ont ensuite été testés

sur différentes maquettes numériques (maquettes de **familles systèmes** et maquettes de **famille chargeables**).

Pour simplifier le travail de l'utilisateur, ces différents scripts ont été réduits en nœuds personnalisés prenant comme entrée la catégorie d'éléments et le chemin d'accès du fichier Excel servant de base de données. La figure suivante (figure 5.13) illustre le type de script à créer pour exporter les informations du projet.

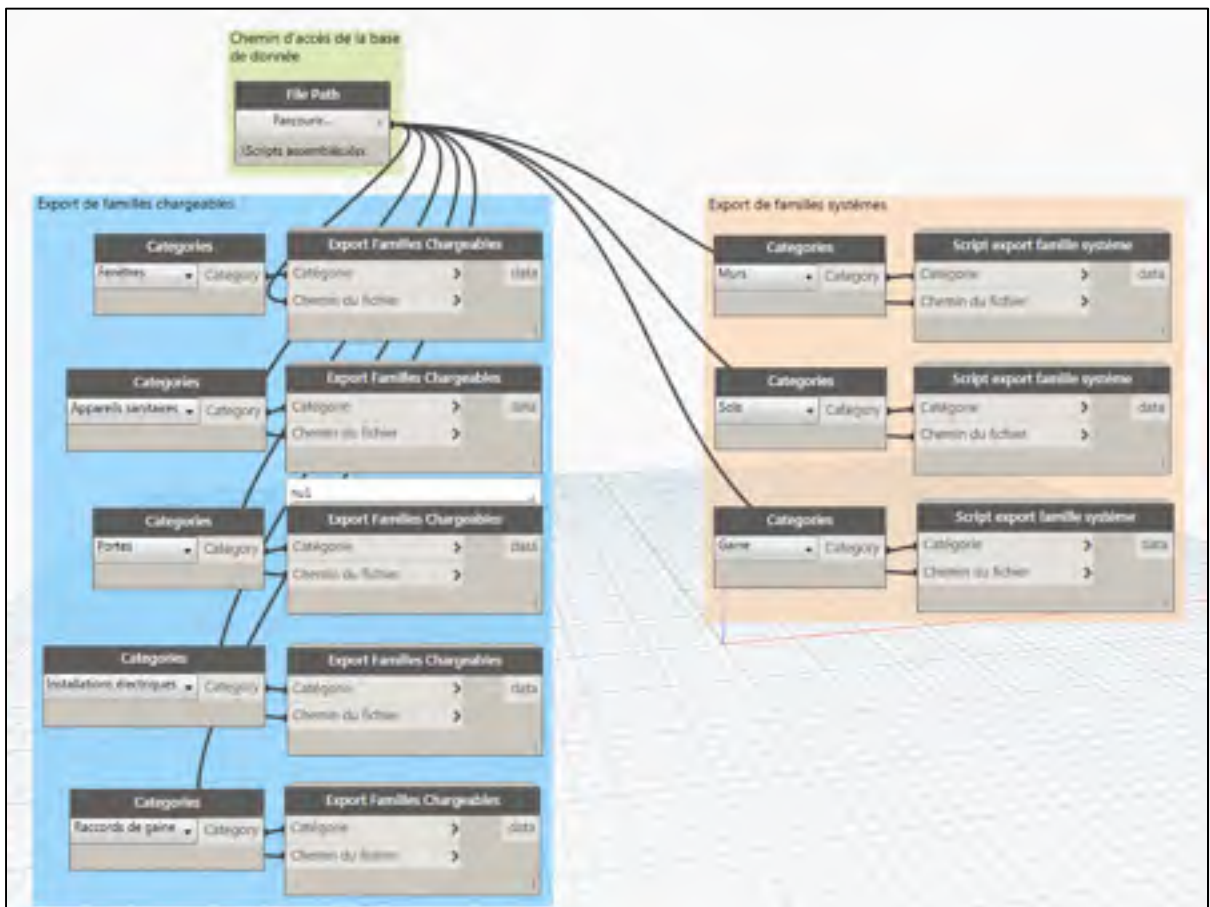


Figure 5.13 Script final d'export d'information

Ces scripts pourront par ailleurs être facilement adaptés pour ajouter d'autres catégories d'objet en utilisant les nœuds créés.

5.3.4 Structure de la base de données

L'utilisation du script Dynamo présenté précédemment permet d'exporter les informations utiles pour réaliser la planification avec la méthode Chronographique vers un fichier Excel. Cette section présente le fichier obtenu.

Le fichier obtenu est en réalité une base de données dans laquelle l'application de planification Chronographique va lire les informations utiles. Ce fichier est structuré de la façon suivante :

- les informations sur les éléments Revit sont stockées dans des onglets différents : un onglet par Catégorie d'élément Revit (murs, portes, appareils sanitaires...)
- chaque onglet présente les informations extraites sur une ligne distincte par élément ;
- chaque colonne présente les valeurs d'un paramètre différent (Famille, Étage, Zone...)
- l'ordre des paramètres dans les colonnes est le suivant ;
 - pour les **familles chargeables** : Famille, Type, N° Activité, MasterFormat, Niveau, Couche, Zone, Secteur, Matériaux, Intervenant, Fournisseur, Équipement, Équipe, Rendement ;
 - pour les **familles systèmes** : Famille, Type, N° Activité, MasterFormat, Niveau, Couche, Zone, Secteur, Longueur, Surface, Matériaux, Intervenant, Fournisseur, Équipement, Équipe, Rendement.

Pour que les scripts d'import fonctionnent, il faut que les listes de paramètres restent dans le même ordre que celui dans lesquelles elles ont été extraites. La structure présentée doit donc rester la même.

5.3.5 Processus détaillé de l'export-import d'information entre Revit et Excel

Les processus d'export et d'import des informations du projet interviennent à différentes étapes. Le processus d'export intervient une fois la préparation de la maquette terminée (étape 2). Le processus d'import intervient une fois la planification du projet réalisée (étape 4).

Processus d'export des informations

La figure 5.14 présente le processus détaillé de l'étape 2 de la stratégie : l'export d'informations de Revit vers Excel.

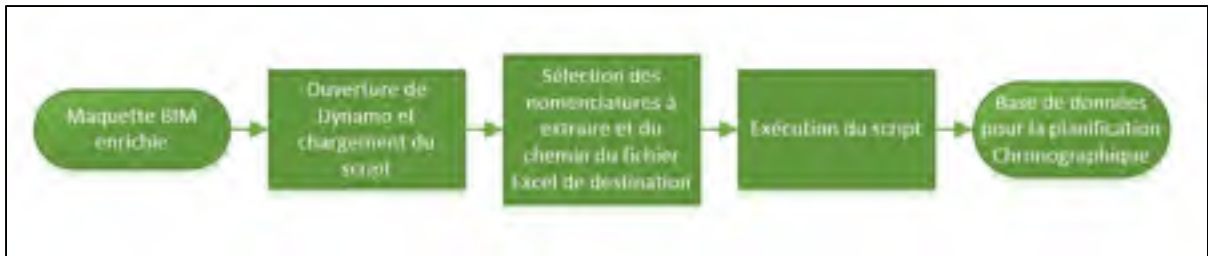


Figure 5.14 Processus d'export des informations

Pour exporter les informations du projet, l'utilisateur doit ouvrir Dynamo et charger le script présenté précédemment. Il devra ensuite sélectionner les différentes nomenclatures à exporter et le chemin du fichier Excel qui servira de base de données pour la planification Chronographique. Une fois le script exécuté, les informations du projet seront disponibles dans le fichier Excel servant de base de données.

Processus d'import des informations ajoutées avec la planification

La figure 5.15 présente le processus détaillé de l'étape 4 de la stratégie : l'import d'informations d'Excel vers Revit.



Figure 5.15 Processus d'import des informations

Pour importer les informations ajoutées durant le processus de planification du projet, l'utilisateur doit ouvrir Dynamo, le script réalisé et l'exécuter. Les informations ajoutées seront alors automatiquement écrites dans les paramètres concernés du modèle BIM. Les paramètres des différentes **familles** d'éléments seront alors complétés et si l'utilisateur souhaite conserver ces informations pour des projets futurs, il pourra alors enregistrer ces **familles** dans les bibliothèques d'éléments Revit personnalisées.

5.3.6 Discussion sur l'export-import des informations avec Dynamo

L'utilisation de Dynamo pour gérer l'import-export des informations du projet permet plusieurs choses :

- gérer l'export et l'import de tous les types de paramètres du projet ;
- maîtriser la mise en forme des nomenclatures ;
- ajouter des informations à la maquette numérique plus facilement en saisissant celles-ci avec l'application de planification Chronographique ou directement sur le fichier Excel servant de Base de données.

L'utilisation de cet add-in offre par ailleurs beaucoup de flexibilités parce que le script réalisé est aisément modifiable. Il est donc très facile de rajouter des fonctionnalités soit pour exporter d'autres paramètres soit pour travailler sur les éléments du modèle. Ceci permettra d'adapter la présente stratégie pour d'autres applications du concept de planification Chronographique.

Par ailleurs, la version 2017 de Revit propose, parmi ses nouvelles fonctionnalités, d'exécuter des scripts Dynamo directement dans l'interface du logiciel Revit (Figure 5.16 ci-après). Ceci pourra encore simplifier le travail de l'utilisateur, car il n'aura plus besoin de lancer l'interface de Dynamo.

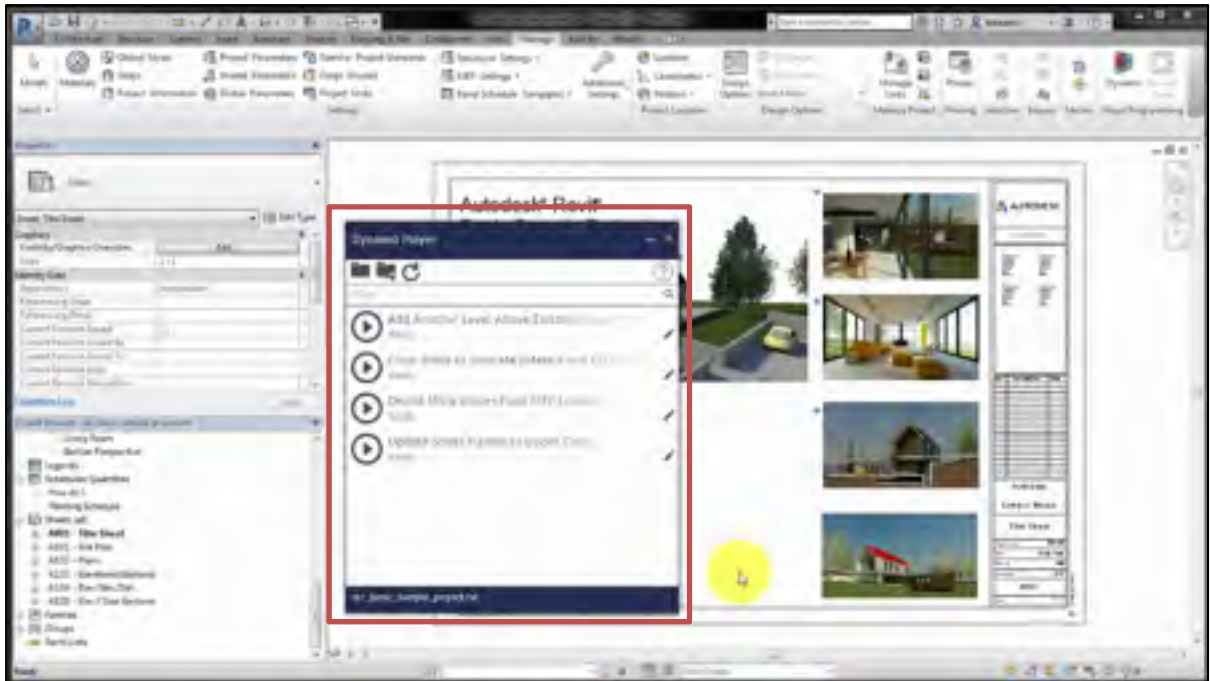


Figure 5.16 Fonctionnalité Dynamo Player
Tirée d'Autodesk Knowledge (2016)

5.4 Planification Chronographique



Figure 5.17 Étape 3 « Planification avec la méthode Chronographique »

Cette partie du processus (figure 5.17) vise à créer un échéancier du projet avec les méthodes de planification Chronographique en exploitant les données extraites du modèle numérique

BIM. Plusieurs étudiants du laboratoire MGPlan travaillent actuellement sur la planification Chronographique à partir d'une application développée en VBA Excel. L'objectif est alors de relier les éléments de la base de données créée aux fonctionnalités offertes par cette application.

5.4.1 Présentation des fonctionnalités de l'application

L'application permettant d'appliquer le concept de la méthode Chronographique a été développée en VBA (Visual Basic for Applications) dans un fichier Excel. L'objectif lié au développement de cette application est de pouvoir montrer facilement la portée du concept de planification Chronographique. Par ailleurs, le choix du langage permet d'adapter facilement les fonctionnalités pour les différents projets de recherche menés au sein du laboratoire MGPlan. Comme présenté dans le **chapitre 3**, la méthode Chronographique repose en partie sur la possibilité d'alterner entre différentes représentations des échéanciers et des informations du projet relatives à la planification. L'application propose donc à l'utilisateur, la possibilité de basculer entre différentes représentations des calendriers pour réaliser la planification d'un projet. Les différentes représentations permettent de tenir compte de différentes contraintes inhérentes à la réalisation des activités telles que les contraintes spatiales ou encore les différents lots intervenants. Ces vues sont présentées dans des feuilles indépendantes. Des liens ont été créés pour mettre à jour automatiquement les activités planifiées dans les différentes vues lorsqu'une action est réalisée dans une de ces feuilles.

Différentes versions de cette application ont été développées avec différentes possibilités de visualisation des échéanciers. La version utilisée dans le cadre du présent projet de recherche propose trois vues différentes :

La vue nommée « Revised » :

Cette vue (présentée dans la figure 5.18) permet à l'utilisateur de construire son échéancier sur une représentation graphique de type Gantt modifié faisant apparaître sur l'axe vertical, les différentes activités regroupées par lots et le temps sur l'axe horizontal. Les différentes

activités sont par ailleurs groupées par spécialité et par zone. L'étage est indiqué dans la barre de l'activité. Cela permet à l'utilisateur de visualiser sur une même vue, les contraintes spatiales du projet et les différents lots intervenants. Par ailleurs, un code couleur est mis en place pour simplifier la visualisation de ces informations.



Figure 5.18 Présentation de la vue « Revised »

La vue nommée « Niveau » :

Cette vue (présentée dans la figure 5.19 ci-après) permet de visualiser pour un étage donné, les activités planifiées selon deux configurations :

- la configuration « Site » représente verticalement les zones de l'étage sélectionné et horizontalement le temps. Les lots des activités sont par ailleurs renseignés dans les barres des activités. Celles-ci sont colorées selon la gamme de couleurs prédéfinie des lots ;
- la configuration « Lots » représente verticalement les différents lots intervenant dans l'étage sélectionné et horizontalement le temps. Les zones sont renseignées dans les barres des activités. Celles-ci sont colorées selon la gamme de couleurs prédéfinie des zones.

De plus, un plan de l'étage sélectionné vient compléter cette vue. Sur ce plan, les différentes zones de l'étage sont représentées et colorées selon les couleurs adoptées. Sur ce plan, les

activités sont présentées graphiquement au sein des différentes zones pour une date donnée. Cette vue permet alors d’appréhender l’enchaînement des travaux au sein d’un étage.



Figure 5.19 Présentation de la vue « Niveaux »

La vue nommée « Vertical » :

Cette vue (présentée dans la figure 5.20 ci-après) se présente sous la forme d’un Gantt modifié qui représente verticalement ; les différents lots regroupés par étages et horizontalement ; le temps. Le nom des activités est renseigné dans les barres du planning. Cette vue permet alors d’appréhender la succession des travaux entre les différents étages d’un projet.



Figure 5.20 Présentation de la vue « Vertical »

La planification de projets de constructions grâce à l'utilisation de ces différentes vues a d'ores et déjà été éprouvée lors de différents projets de recherches menées par les équipes du laboratoire MGPlan. C'est pourquoi la décision a été prise de faire le lien entre les bases de données issues des étapes précédentes du processus et cette version de l'application.

5.4.2 Problématiques et limitations

L'objectif de la présente partie étant de créer un lien entre la base de données extraite de la maquette numérique et l'application de planification Chronographique présentée dans la section précédente. Plusieurs problématiques et limitations ont été constatées.

Limitations concernant la structure de l'application :

Comme expliqué dans la section précédente, l'application utilisée pour supporter le concept est développée en VBA Excel, et utilise des liens entre les données renseignées dans différents onglets. L'application ne se base donc pas sur l'exploitation d'une base de données pour alimenter les différentes vues. Ceci s'explique par le fait que l'objectif de cette application n'est pas de proposer une solution logicielle, mais de fournir un support pour tester le concept

de la méthode Chronographique. Ce choix de programmation peut alors entraîner quelques difficultés pour ajouter de nouvelles fonctionnalités.

Limitations concernant les fonctionnalités de l'application :

Le concept de planification Chronographique manipule un grand nombre d'informations et s'intéresse à divers aspects de la réalisation des travaux comme la coordination des intervenants à travers les espaces des chantiers de construction, la gestion des stocks et des approvisionnements ou encore l'optimisation de l'occupation des espaces. L'application utilisée lors de ce projet de recherche ne propose pas de fonctionnalités permettant d'apporter des solutions pour chacun de ces domaines. Cette application se concentre sur la prise en compte des intervenants et des espaces de travail du chantier de construction pour la planification des travaux d'exécution. Bon nombre des paramètres ajoutés à la maquette numérique ne seront donc pas exploités directement à partir de cette application. Ils permettront néanmoins de servir de support pour traiter d'autres aspects de la planification dans le cadre de futurs projets de recherche exploitant la méthode Chronographique.

Les limitations en termes de fonctionnalités développées sont les suivantes :

- concernant le LBS créé, la stratégie développée prend en considération 5 niveaux (Bâtiment, Étage, Phase, Zone et Secteur). Cependant l'application utilisée ne manipule que 3 niveaux (Bâtiment, étage et zone) ;
- concernant les intervenants, la stratégie propose de renseigner différentes informations sur les intervenants du projet. Les paramètres relatifs aux intervenants créés sont : « Intervenant », « Fournisseur » et « Équipe ». De plus, la stratégie propose de créer un découpage du projet en adoptant le système de classification Unifomat ou MasterFormat. (D'autres systèmes de découpages peuvent être adoptés. Il suffit pour cela de créer un paramètre supplémentaire pour tous les éléments du projet). Pour simplifier le travail de programmation, les informations concernant les intervenants exploités sont les codes MasterFormat. Les autres servent à titre indicatif. C'est-à-dire que les lots correspondent aux différents codes MasterFormat. Ce choix a été fait, car le système de classification

MasterFormat correspond de manière relativement proche aux différentes spécialités des projets de construction ;

- l'un des objectifs est d'obtenir les quantités d'éléments et si nécessaire, leurs dimensions, par zones pour les différentes activités du projet. La durée de chacune des activités peut ensuite être calculée soit avec un rendement, soit en imposant la durée ;
- les paramètres matériaux et matériel ne sont pas exploités à proprement parler ils fournissent cependant des informations complémentaires sur les ouvrages à réaliser.

Le développement du lien entre la base de données extraite n'exploite donc pas toutes les informations qu'elle contient. Cependant, il est tout à fait possible de créer de nouvelles fonctionnalités qui permettront d'exploiter directement ces informations.

5.4.3 Méthodologie suivie pour la création du lien

Pour développer le lien entre la base de données et l'application, un modèle Revit a été créé. Celui-ci a été créé en suivant les étapes précédentes, afin d'obtenir une base de données couvrant les différents types d'objets rencontrés (**Familles systèmes, Familles chargeables, Familles multicouches**). Le modèle ayant servi à développer ce lien est celui utilisé pour l'étude d'application de la stratégie présentée dans le chapitre 6.

Une fois la base donnée extraite, les différentes feuilles du fichier Excel généré ont été importées directement dans le fichier Excel contenant la version de l'application utilisée. Puis différents modules VBA ont été développés pour créer des liens entre les feuilles extraites et les feuilles de l'application présentées dans la section **5.4.1 Présentation des fonctionnalités de l'application**.

5.4.4 Présentation de la solution développée

L'application développée se trouve donc dans un fichier Excel contenant 3 types de feuilles :

- les feuilles extraites de Revit, contenant les informations issues des éléments de la maquette numérique ;
- les feuilles de la version initiale de l'application, permettant de réaliser la planification du projet (présentées dans la section 5.4.1) ;
- et une feuille nommée « Compil » qui va servir de lien entre les deux autres types de feuilles.

La feuille « Compil » :

Cette feuille (figure 5.21) permet de réaliser différentes actions :

- compiler les informations issues de feuilles de nomenclatures issues de Revit pour obtenir les quantités d'éléments par intervenants (MasterFormat), par étages et par zones. La feuille présente alors sur les différentes colonnes, les informations suivantes : **Famille**, MasterFormat, Niveau, Zone et Quantité. Ces informations sont donc compilées grâce à l'utilisation d'un bouton nommé « Compiler » ;
- une fois les éléments totalisés et regroupés selon ces critères, les différentes activités de l'échéancier à créer sont identifiées, une ligne par activité. Ceci donne la structure de découpage LBS. Une fonction permet alors de construire la structure de découpage de la feuille « Revised » ;
- par ailleurs, cette feuille sert de base pour la création de l'échéancier destiné à être exporté dans Navisworks. Plusieurs informations sont alors ajoutées afin d'obtenir les informations nécessaires à la réalisation du modèle 4D. À savoir : un code activité unique et les dates de début et date de fin. Les dates de début et dates de fin sont automatiquement importées en fonction de la planification réalisée dans les feuilles destinées à cet effet grâce à un bouton nommé « Dates ».

F	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
	Famille	Master/omat	Niveau	Zone	Quantité	Code activité	Date de début	Date de fin						
1	Dalle Béton	03.2100	1	H	1	03.2100-3-H	2016-07-11	2016-07-15						
2	Dalle Béton	03.2100	2	H	1	03.2100-2-H	2016-07-25	2016-07-29						
3	Dalle Béton	03.2100	3	H	1	03.2100-3-H	2016-08-08	2016-08-12						
4	Dalle Béton	03.2100	4	H	1	03.2100-4-H	2016-08-22	2016-08-26						
5	Sillon	03.2100	1	V	7	03.2100-3-V	2016-07-18	2016-07-22						
6	Sillon	03.2100	2	V	7	03.2100-2-V	2016-08-01	2016-08-05						
7	Sillon	03.2100	3	V	7	03.2100-3-V	2016-08-15	2016-08-19						
8	Sillon	03.2100	4	V	7	03.2100-4-V	2016-08-29	2016-09-02						
9	Sillon	04.2000	1	EXT	4	04.2000-1-EXT	2016-09-13	2016-09-17						
10	Sillon	04.2000	2	EXT	4	04.2000-2-EXT	2016-09-26	2016-09-30						
11	Sillon	04.2000	3	EXT	4	04.2000-3-EXT	2016-10-10	2016-10-14						
12	Sillon	04.2000	4	EXT	4	04.2000-4-EXT	2016-10-24	2016-10-28						
13	Sillon	07.2100	1	EXT	4	07.2100-1-EXT	2016-08-22	2016-08-26						
14	Sillon	07.2100	2	EXT	4	07.2100-2-EXT	2016-08-29	2016-09-02						
15	Sillon	07.2100	3	EXT	4	07.2100-3-EXT	2016-09-05	2016-09-09						
16	Sillon	07.2100	4	EXT	4	07.2100-4-EXT	2016-09-12	2016-09-16						
17	Porte simple panneau	08.14.15	1	Zone1	1	08.14.15-1-Zone1	2016-10-06	2016-10-06						
18	Porte simple panneau	08.14.15	2	Zone1	1	08.14.15-2-Zone1	2016-10-11	2016-10-11						
19	Porte simple panneau	08.14.15	3	Zone1	1	08.14.15-3-Zone1	2016-10-14	2016-10-14						
20	Porte simple panneau	08.14.15	4	Zone1	1	08.14.15-4-Zone1	2016-10-19	2016-10-19						
21	Porte simple panneau	08.14.15	1	Zone2	1	08.14.15-1-Zone2	2016-10-07	2016-10-07						
22	Porte simple panneau	08.14.15	2	Zone2	1	08.14.15-2-Zone2	2016-10-12	2016-10-12						
23	Porte simple panneau	08.14.15	3	Zone2	1	08.14.15-3-Zone2	2016-10-17	2016-10-17						
24	Porte simple panneau	08.14.15	4	Zone2	1	08.14.15-4-Zone2	2016-10-20	2016-10-20						
25	Porte simple panneau	08.14.15	1	Zone3	1	08.14.15-1-Zone3	2016-10-10	2016-10-10						
26	Porte simple panneau	08.14.15	2	Zone3	1	08.14.15-2-Zone3	2016-10-15	2016-10-15						
27	Porte simple panneau	08.14.15	3	Zone3	1	08.14.15-3-Zone3	2016-10-16	2016-10-16						
28	Porte simple	08.14.16	1	Zone1	5	08.14.16-1-Zone1	2016-10-05	2016-10-05						
29	Porte simple	08.14.16	2	Zone1	5	08.14.16-2-Zone1	2016-10-10	2016-10-10						
30	Porte simple	08.14.16	3	Zone1	5	08.14.16-3-Zone1	2016-10-13	2016-10-13						
31	Porte simple	08.14.16	4	Zone1	5	08.14.16-4-Zone1	2016-10-18	2016-10-18						
32	Porte simple	08.14.16	1	Zone2	5	08.14.16-1-Zone2	2016-10-08	2016-10-08						
33	Porte simple	08.14.16	2	Zone2	5	08.14.16-2-Zone2	2016-10-11	2016-10-11						
34	Porte simple	08.14.16	3	Zone2	5	08.14.16-3-Zone2	2016-10-14	2016-10-14						
35	Porte simple	08.14.16	4	Zone2	5	08.14.16-4-Zone2	2016-10-19	2016-10-19						
36	Porte simple	08.14.16	1	Zone3	1	08.14.16-1-Zone3	2016-10-07	2016-10-07						
37	Porte simple	08.14.16	2	Zone3	1	08.14.16-2-Zone3	2016-10-12	2016-10-12						
38	Porte simple	08.14.16	3	Zone3	1	08.14.16-3-Zone3	2016-10-17	2016-10-17						
39	Porte simple	08.14.16	4	Zone3	1	08.14.16-4-Zone3	2016-10-20	2016-10-20						
40	Fenêtre simple	08.53.00	1	Zone1	3	08.53.00-1-Zone1	2016-09-11	2016-09-11						
41	Fenêtre simple	08.53.00	2	Zone1	3	08.53.00-2-Zone1	2016-09-14	2016-09-14						
42	Fenêtre simple	08.53.00	3	Zone1	3	08.53.00-3-Zone1	2016-09-16	2016-09-16						
43	Fenêtre simple	08.53.00	4	Zone1	3	08.53.00-4-Zone1	2016-09-18	2016-09-18						
44	Fenêtre simple	08.53.00	1	Zone2	3	08.53.00-1-Zone2	2016-09-11	2016-09-11						
45	Fenêtre simple	08.53.00	2	Zone2	3	08.53.00-2-Zone2	2016-09-14	2016-09-14						
46	Fenêtre simple	08.53.00	3	Zone2	3	08.53.00-3-Zone2	2016-09-15	2016-09-15						
47	Fenêtre simple	08.53.00	4	Zone2	3	08.53.00-4-Zone2	2016-09-18	2016-09-18						
48	Fenêtre simple	08.53.00	1	Zone3	1	08.53.00-1-Zone3	2016-09-11	2016-09-11						
49	Fenêtre simple	08.53.00	2	Zone3	1	08.53.00-2-Zone3	2016-09-14	2016-09-14						
50	Fenêtre simple	08.53.00	3	Zone3	1	08.53.00-3-Zone3	2016-09-15	2016-09-15						
51	Fenêtre simple	08.53.00	4	Zone3	1	08.53.00-4-Zone3	2016-09-16	2016-09-16						
52	Cloison	05.21.16	1	PC	3	05.21.16-1-PC	2016-09-26	2016-09-26						
53	Cloison	05.21.16	2	PC	4	05.21.16-2-PC	2016-09-30	2016-09-30						

Figure 5.21 Présentation de la feuille « Compil »

La feuille « Compil » sert donc d’élément central pour les fonctionnalités développées dans ce projet, car elle permet d’une part de faire le lien entre les informations issues de la maquette numérique ainsi que de faire le lien avec le modèle 4D en fournissant l’échéancier nécessaire à sa création.

5.4.5 Remontée d’informations vers Revit

Le concept développé repose sur les possibilités de remontées d’informations de l’application vers le logiciel Revit. En effet, comme présenté dans la section 4.5 La simulation 4D, une

fonctionnalité de Navisworks permet de lier automatiquement les activités de l'échéancier aux éléments du modèle. Cette opération n'est possible que si un code d'identification unique pour chacune des activités est présent à la fois dans l'échéancier et dans les paramètres de l'élément concerné.

Dans le cadre du présent projet, le code activité permettant d'assurer cette fonctionnalité est définie de la façon suivante : Code MasterFormat-Étage-Zone (ex : 03 31 00 –Niveau1-Zone1). Ainsi ce code d'activité permet de définir simplement les activités auxquelles sont rattachés les objets des nomenclatures grâce à une fonction de concaténation de chaîne de caractères. L'utilisateur reste cependant libre d'adopter n'importe quel code d'activité qui lui semblerait plus adapté à condition que celui-ci soit renseigné pour tous les éléments des feuilles des nomenclatures ainsi que pour les activités de la feuille « Compil ».

Remarque : La solution développée pour l'import d'informations exige que la structure des feuilles de nomenclatures reste strictement la même.

De la même manière, une remontée d'informations sera aussi possible pour les autres informations (Matériaux, Fournisseurs, Équipements...) concernant les activités, grâce au remplissage des cellules correspondantes dans les feuilles de nomenclatures.

5.4.6 Processus détaillé de planification avec la méthode Chronographique

La figure 5.22 présente le processus détaillé de l'étape 4 : planification avec la méthode Chronographique.

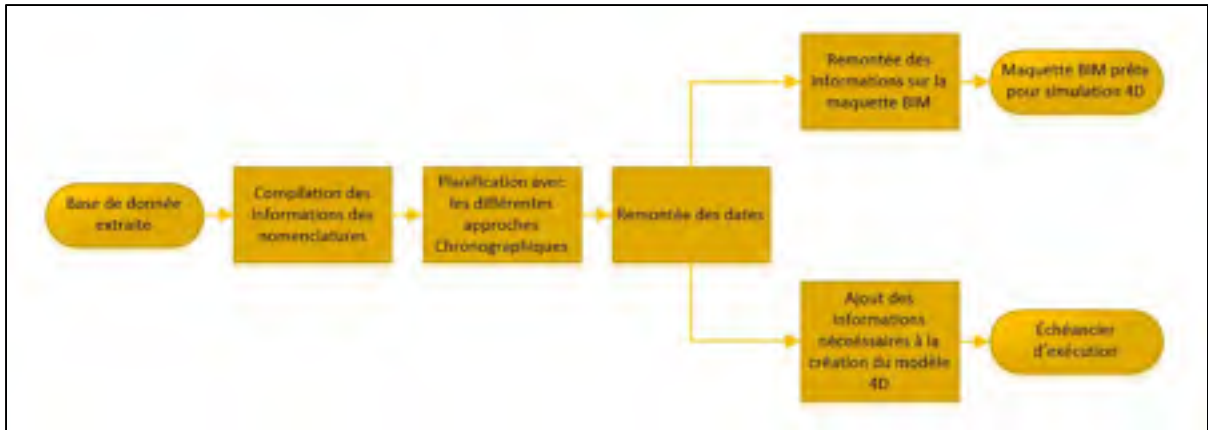


Figure 5.22 Processus de planification Chronographique

Pour l'utilisateur, cette étape de la stratégie débute par la compilation des informations du projet dans la feuille « Compil », ensuite les données compilées vont permettre de créer la structure de l'onglet « Revised » qui elle-même permet de générer la structure des onglets « Niveaux » et « Vertical ». Ensuite, l'utilisateur évalue la durée de l'activité par la méthode qu'il désire puis établit la planification du projet grâce aux différentes vues fournies par l'application. Une fois la planification réalisée, il importe les dates dans la feuille « Compil » et ajoute les informations nécessaires au montage du modèle 4D, à savoir le **type de tâche** pour chacune des activités. En parallèle, il utilise le script dynamo d'import d'informations pour faire remonter les codes activités dans les différents éléments du modèle (procédure présentée dans la section 5.3.5). Ainsi, le modèle 3D est prêt à être utilisé pour réaliser la simulation 4D en liant les tâches de l'échéancier et les éléments du modèle de façon automatique.

5.4.7 Discussion

Cette étape de la stratégie est une étape centrale. En effet, c'est ici que le lien entre le modèle numérique et la planification du projet se fait. En utilisant l'application de planification Chronographique, l'échéancier créé appréhende les contraintes spatiales des ouvrages à réaliser et grâce au lien avec la maquette numérique, les éléments du modèle sont liés aux activités.

La principale limitation de cette partie provient alors du manque de fonctionnalités offertes par l'application pour appliquer toutes les facettes que prévoit le concept. Cependant, il s'agit d'une application pour illustrer et éprouver le concept. Pour ajouter les fonctionnalités envisagées, il serait alors judicieux de travailler sur la base d'un logiciel contenant une base de données. Le développement de nouvelles vues serait alors simplifié et le lien entre les informations du modèle BIM et des représentations de l'échéancier serait alors plus simple. Une telle solution logicielle exige d'importants efforts supplémentaires en termes de réflexion et de programmation. C'est pourquoi, la décision a été prise de ne développer que des liens entre les intervenants (par les biais des codes MasterFormat) et les espaces du projet. La structure de la base de données extraite du modèle BIM permettra cependant de s'adapter à de futures applications VBA Excel permettant de développer le concept de planification Chronographique ou d'alimenter une solution logicielle plus sophistiquée si elle est développée.

5.5 Simulation 4D



Figure 5.23 Étape 5 « Modélisation 4D »

Cette partie présente la dernière étape du processus (figure 5.23). Elle consiste à réaliser le modèle 4D du projet avec le modèle 3D créé et l'échéancier issu de la planification Chronographique. L'un des avantages de réaliser la planification en suivant cette stratégie

réside dans la possibilité de lier automatiquement les éléments du modèle avec les activités de l'échéancier. C'est cet aspect qui est présenté dans les parties suivantes.

5.5.1 Lier automatiquement les activités aux éléments du modèle

Afin de monter le modèle 4D, il est nécessaire d'une part d'importer la maquette numérique ainsi que l'échéancier réalisé. Pour que le lien s'effectue automatiquement, les éléments de la maquette et les activités de l'échéancier doivent contenir le N° d'activité défini précédemment.

5.1.2 Informations manipulées.

Spécifications pour l'import de la maquette numérique :

Avant d'importer le modèle 3D dans Navisworks, il faudra donc utiliser le script Dynamo pour importer le N° d'activité pour chaque élément du modèle. Ainsi, une fois le modèle 3D chargé dans Navisworks, les paramètres N° d'activité seront visibles.

Spécifications pour l'import de l'échéancier :

L'import de l'échéancier se réalise par l'import d'un fichier format CSV. L'utilisateur doit ensuite faire le lien entre les colonnes du fichier CSV et les différentes colonnes de l'outil Timeliner de Navisworks présentées dans la section **4.5.2 Spécifications sur les échéanciers Navisworks**. Aucune colonne n'est prédéfinie pour accueillir les informations du « N° d'activité » créé, il est donc recommandé de lier cette colonne à l'une des colonnes « Utilisateur » (permettant de rajouter de l'information personnalisée).

Une fois l'import du modèle 3D et de l'échéancier réalisé, le lien automatique entre les éléments et les tâches du planning se fait avec la fonctionnalité « Attacher automatiquement à l'aide de règles » du Timeliner. L'utilisateur doit alors définir une nouvelle règle de type « Attacher les éléments aux tâches selon leur catégorie ou propriété ». La figure 5.24 présentée

ci-après illustre le paramétrage de la règle qui consiste à spécifier entre quelle colonne du Timeliner et quel paramètre le lien doit être fait. Comme il s'agit d'un paramètre personnalisé, il faut activer l'option « développeur » qui permet d'afficher les propriétés internes des éléments.



Figure 5.24 Paramétrage de la règle Navisworks

Une fois la règle créée et appliquée, l'ensemble des éléments du modèle sont liés aux activités correspondantes de l'échéancier. La simulation 4D est donc prête à être visualisée. Elle permettra de visualiser les différentes séquences de travaux avec un enchaînement zone par zone.

5.5.2 Processus détaillé

La figure 5.25 présentée ci-après décrit le processus détaillé de l'étape 5 : la réalisation du modèle 4D.

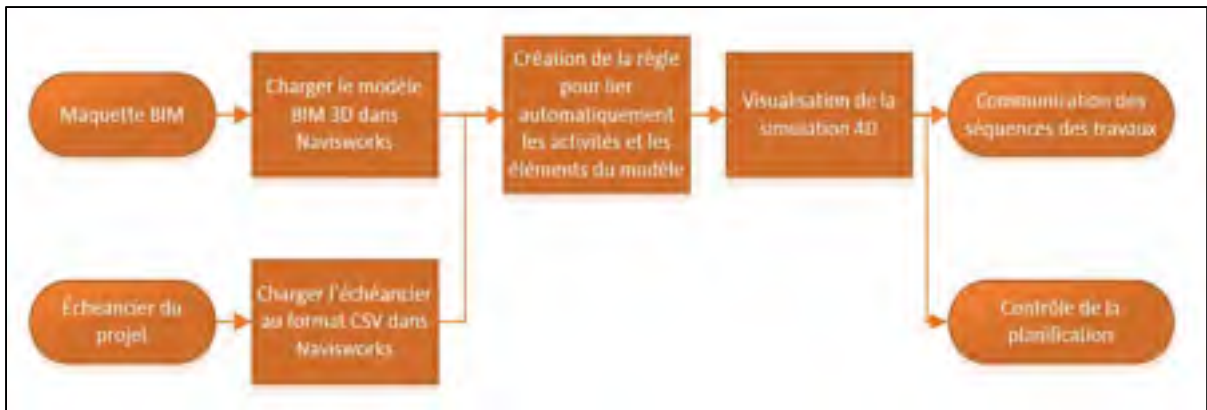


Figure 5.25 Processus de montage du modèle 4D

Pour réaliser le modèle 4D du projet, l'utilisateur doit dans un premier temps charger le modèle numérique 3D et l'échéancier du projet, tous deux issus de l'étape précédente. Il devra ensuite créer et appliquer la règle permettant de faire le lien entre les tâches et les éléments automatiquement présentés dans la section précédente.

5.5.3 Discussion autour de la partie simulation 4D

En utilisant la présente stratégie de communication, la simulation 4D créée permet de lier automatiquement les tâches aux éléments concernés. Et comme la planification a été réalisée sur la base d'une organisation spatiale des activités, la simulation 4D présente alors la succession des travaux zone par zone puis étages par étage.

L'utilisation des fonctionnalités de Navisworks en termes de création de points de vue, d'attribution de couleurs aux éléments et de création de coupes peut être utile pour obtenir une visualisation claire des séquences de travaux.

5.6 Discussion autour de la stratégie

Ce chapitre présente les différentes étapes de la stratégie retenue pour l'exploitation des maquettes numériques BIM pour la planification Chronographique et pour la simulation 4D. Elle présente aussi les différents outils développés et mis en place pour supporter cette stratégie. Ainsi les objectifs secondaires n°3 et 4 sont atteints.

La présente stratégie de communication entre Revit, l'application de modélisation Chronographique de la planification et Navisworks présente quelques avantages :

- grâce au lien entre Revit et l'application de planification Chronographique, les vues métiers offertes par la méthode Chronographique vont pouvoir exploiter les informations d'un modèle BIM et vont aussi permettre d'en ajouter. Les informations ajoutées pourront ensuite être exploitées pour d'autres tâches comme l'estimation ;
- l'utilisation de la méthode Chronographique permet d'obtenir un échéancier reflétant la coordination des travaux dans les différents espaces du projet. Grâce au lien entre l'application et Revit, il est possible de lier automatiquement les éléments du modèle aux tâches de l'échéancier ce qui diminue énormément la tâche de montage du modèle 4D ;
- les outils développés pour supporter le concept sont facilement modifiables et peuvent être améliorés grâce à l'utilisation d'une interface de programmation visuelle. Ainsi la présente stratégie pourra être adaptée pour les besoins de recherches futures.

Concernant les limitations de cette stratégie :

- toutes les possibilités offertes par la méthode Chronographique n'ont pas été analysées dans ce projet, car elles nécessitent d'importants efforts de programmation. Cette étude s'est limitée à développer les liens permettant d'utiliser les fonctionnalités « principales » à savoir la coordination des intervenants au sein des différents espaces d'un chantier. La partie 3 mentionne certaines études concernant, par exemple la gestion des stocks, l'occupation des espaces... Pour pouvoir exploiter le modèle BIM à ces fins, le script développé pourra facilement être adapté pour envoyer les informations pertinentes. Pour adapter ces scripts, les contraintes majeures résident dans les différences de structuration

- de l'information entre les différentes catégories d'objet nécessitant alors un peu de programmation pour créer des nœuds Dynamo s'adaptant à tout type d'éléments ;
- l'une des principales contraintes des logiciels BIM étudiés réside dans la difficulté d'organiser spatialement le modèle (Phases, Zones, Secteurs). En effet ni Revit, ni Navisworks ne proposent de fonctions permettant de classer les éléments par zones automatiquement (par l'exploitation des coordonnées géométriques des éléments). Cependant des fonctionnalités semblables à celles recherchées sont offertes par d'autres solutions comme Vico ou All Plan. Ces fonctionnalités pourront alors être développées sous la forme d'add-in ou grâce à l'utilisation de Dynamo si les concepteurs du logiciel n'intègrent pas ces fonctionnalités dans les prochaines versions ;
 - une autre limitation de la présente stratégie de communication pourrait résider dans le niveau de détail de la maquette numérique. En effet, comme exposé dans la section **5.1.3 Parties prenantes**, le LOD défini pour la création des modèles 3D BIM de conception n'est pas adapté à la planification. Cette contrainte est similaire à celle des éléments multicouches (section **5.2.5 Le cas particulier des familles multicouches**) et s'explique par le fait que la création des éléments sur Revit est pensée pour simplifier le travail de conception. Certains éléments sont alors regroupés et difficilement dissociables. C'est le cas par exemple des portes qui comportent dans un seul objet le cadre, la porte, les poignées. Ces différents éléments font souvent l'objet d'activités différentes lors de la construction d'un ouvrage. À l'inverse, d'autres éléments dissociés dans la conception doivent être regroupés pour la planification. Pour reprendre l'exemple des portes : tous les cadres de porte sur un étage ou un secteur sont dissociés dans la conception selon leurs types, mais doivent être regroupés pour la planification. C'est pareil pour les portes ou les poignées de différents types. Pour adapter ces éléments, un temps supplémentaire de modélisation sera alors nécessaire ou bien il faudra en passer par la création d'un add-in (comme l'add-in Smart Wall) pour résoudre ces contraintes.

CHAPITRE 6

ÉTUDE DE CAS

6.1 Objectifs de l'étude de cas

La stratégie de communication développée dans le présent projet de recherche vise l'exploitation des maquettes numériques BIM pour alimenter le concept de planification Chronographique et ainsi simplifier la création d'une simulation 4D des projets de construction. Les différents processus et outils ont été conçus en analysant les problématiques à chacune des étapes de cette stratégie de communication entre les maquettes numériques BIM, la planification Chronographique et l'outil de simulation 4D. L'objectif principal de ce chapitre est donc d'éprouver cette stratégie dans son ensemble et d'effectuer retour critique sur son utilisation.

Un objectif secondaire du projet vise à rendre la stratégie de communication adaptable pour différents autres aspects de la méthode Chronographique non couverts dans le présent projet. Ce chapitre démontre donc les possibilités d'adaptation de la stratégie développée.

Ce chapitre est divisé en trois sections ; la première présente le projet utilisé dans l'étude de cas ; la seconde partie présente l'application de modélisation graphique de la planification ; et la troisième décrit une méthode pour visualiser les intervenants sur le modèle 4D.

6.2 Présentation du projet d'étude de cas

Le projet sur lequel se base l'étude de cas est un projet fictif de construction d'un immeuble de logements de quatre étages identiques. La maquette numérique du projet a été entièrement réalisée sur le logiciel Revit. La présente stratégie manipule un grand nombre d'informations pour chacun des éléments du modèle. Ce qui implique un effort considérable de

programmation pour obtenir les résultats escomptés. Ainsi, plusieurs hypothèses ont été considérées pour la création du modèle supportant l'étude de cas.

6.2.1 Hypothèses et limitations de l'étude de cas

Concernant le contenu du modèle numérique réalisé :

Les projets de construction contiennent généralement un grand nombre d'ouvrages à réaliser. Un modèle numérique représentatif de tels projets contiendra certainement un grand nombre d'éléments. Le logiciel Revit sépare l'ensemble des éléments en deux principales catégories ; les **familles systèmes** et les **familles chargeables**. Cependant le comportement des différentes **familles** au sein de chacune de ces catégories est très similaire. Par exemple, les différentes portes, fenêtres et appareils sanitaires (qui sont toutes des **familles chargeables**) vont se comporter de la même manière pour l'ajout et l'exploitation de paramètres. Le modèle numérique n'a pas été conçu pour représenter les différents types d'ouvrages, mais plutôt pour représenter les différentes catégories Revit existantes pour lesquelles il a fallu développer des solutions particulières (présentées dans la section **5.3.3 Développement des scripts d'export et d'import d'informations**).

Concernant les informations manipulées :

Le concept de la planification Chronographique repose sur la manipulation d'un grand nombre d'informations sur les activités et les ouvrages à réaliser. C'est pourquoi la stratégie développée propose de renseigner un nombre relativement important de paramètres pour les éléments du modèle numérique. Cependant, la présente étude se concentre seulement sur la planification des différentes interventions sur le site d'un chantier de construction. Ainsi, tous les paramètres définis dans le gabarit de planification Chronographique (présenté dans la section **5.2.2 Création d'un gabarit Revit dédié à la planification Chronographique**) ne sont pas utilisés. Les informations exploitées lors de cette étude de cas sont celles renseignant sur le caractère spatial et les spécialités d'exécution classées selon le code MasterFormat.

6.2.2 Contenu du modèle

Comme expliqué dans la section précédente le modèle est destiné à éprouver la prise en compte des différentes catégories d'objets par la stratégie développée. Certains lots n'ont alors pas été modélisés entièrement ou complètement omis. Les éléments créés dans le modèle sont destinés à refléter différentes spécialités communes que l'on retrouve sur les chantiers de construction (Structure, Mécanique, Plomberie, Peinture...).

Le modèle réalisé pour cette étude de cas présente les caractéristiques suivantes :

- quatre (4) étages identiques contenant chacun un espace commun et trois (3) logements : deux (2) appartements de six (6) pièces et un (1) appartement de deux (2) pièces ;
- la structure de l'immeuble est constituée de voiles et planchers en béton armé ;
- les lots des travaux extérieurs concernant les spécialités suivantes ;
 - travaux d'isolation ;
 - revêtement en brique ;
- les lots des finitions intérieures concernant les spécialités suivantes ;
 - les cloisons ;
 - les travaux de peintures ;
 - les revêtements de sols ;
 - les portes ;
 - les fenêtres ;
 - les équipements sanitaires : douches ;
 - système de chauffage : radiateurs ;
 - la mécanique de bâtiment : Gaines de ventilations et raccords de gaines.

La figure 6.1 présente un rendu visuel du modèle BIM développé.

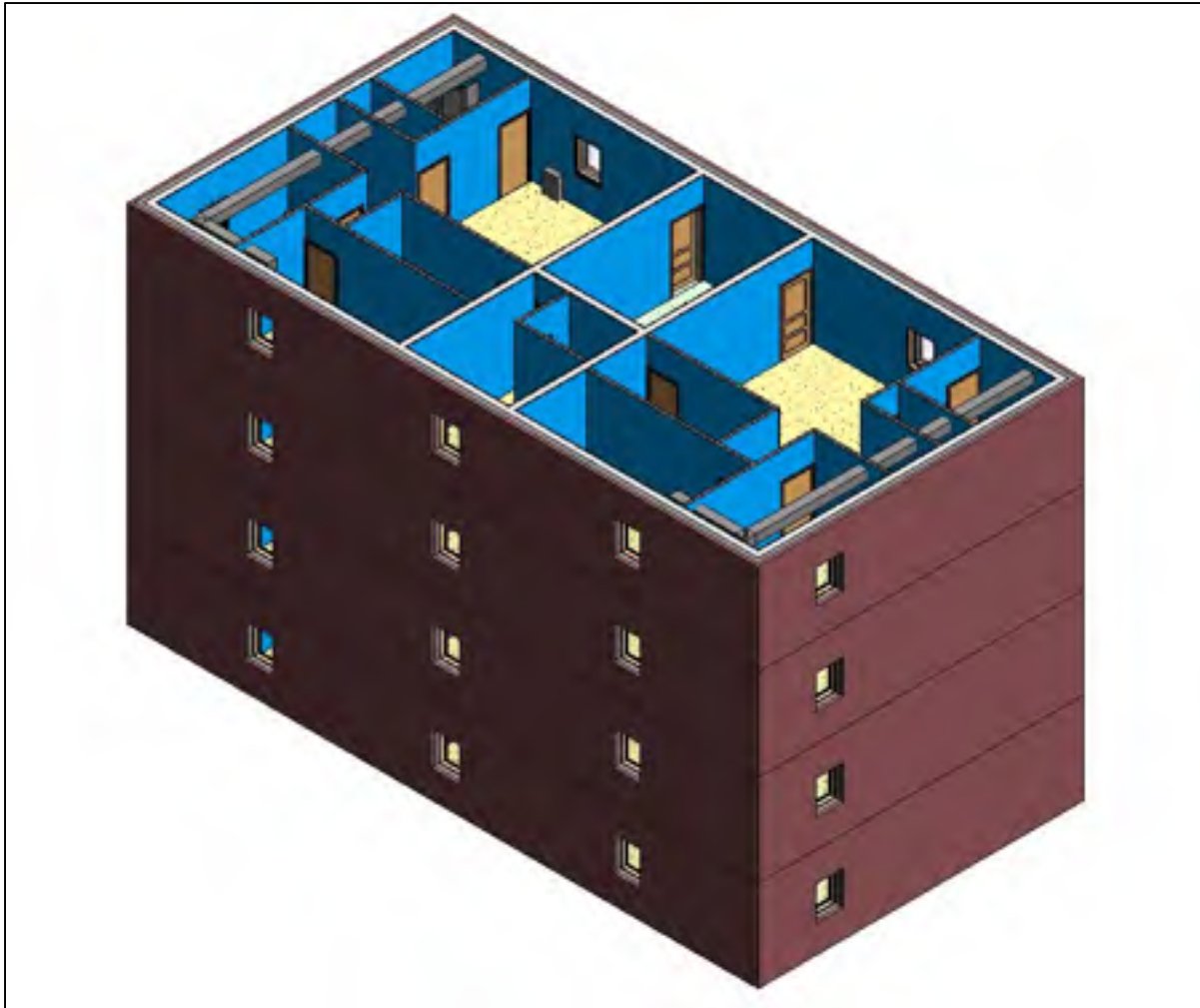


Figure 6.1 Modèle BIM réalisé pour l'étude de cas

Ce modèle a servi de base pour l'application de la stratégie ainsi que pour l'étude des possibilités d'adaptation de celle-ci.

6.3 Application de la stratégie de communication développée

Une fois la modélisation du projet terminée, les différentes étapes de la stratégie présentée dans le chapitre 5 ont été suivies. Cette section présente alors quelques précisions sur la démarche suivie, les observations réalisées pour chacune des étapes et le cas échéant, les mesures

correctives qui ont été prises. Les étapes de la stratégie de communication sont présentées dans le **chapitre 5 Développement de la stratégie de communication**.

6.3.1 Étape 1 : Préparation de la maquette numérique

Pour cette étape, la préparation de la maquette a été réalisée en même temps que la création du modèle. En raison du caractère répétitif du projet, un premier étage a été réalisé, les informations spatiales (zones) et les codes MasterFormat de tous les éléments de cet étage ont été renseignés et tous les paramètres contenant des informations ont été complétés (Phase, Zone et secteur). Ensuite, cet étage a été dupliqué sur les niveaux 2, 3 et 4.

Observations :

Comparativement aux maquettes numériques réalisées précédemment, le temps de modélisation et de création et de renseignement des paramètres a considérablement diminué. Ceci grâce à une combinaison des éléments suivants :

- le gabarit mis en place permet de définir la quasi-totalité des paramètres automatiquement. Seuls les paramètres des **familles chargeables** restaient à créer et cette tâche a été simplifiée par l'utilisation du script destiné à cet effet ;
- certaines **familles** des modèles d'export et d'import d'informations sur Dynamo ont été utilisées. Ceci a diminué le temps de saisie des informations suivantes ; code MasterFormat et Phase de construction, car ces informations ont été directement importées lors de l'ajout des **familles** au modèle. L'utilisation de bibliothèques s'avère donc être un grand avantage pour diminuer le temps de saisie des paramètres ;
- le gabarit a par ailleurs été utile pour réduire le temps de saisie des informations spatiale grâce aux vues filtrées créées dans le gabarit, qui permettent de n'afficher que les éléments d'une phase de construction donnée.

Bien que le temps de préparation ait été considérablement réduit par rapport à celui des modèles créés précédemment, cette étape n'en reste pas moins coûteuse en temps et en rigueur.

En effet, une erreur de saisie à cette étape peut entraîner des répercussions sur les étapes suivantes de la stratégie. Il est donc important que les prochaines versions de Revit proposent des fonctionnalités pour remédier à cela.

6.3.2 Étape 2 : Extraction des informations

L'extraction des informations a été réalisée en adaptant le script Dynamo présenté dans la section **5.3.3 Développement des scripts d'export et d'import d'informations** pour les différentes catégories d'objet présentes dans le modèle.

Observations :

Toutes les informations⁶ contenues dans les paramètres ont été correctement exportées vers le fichier Excel de destination à l'exception du paramètre « Niveaux » (étages) pour les gaines de ventilation. Ceci provient du fait que le nom du paramètre indiquant l'étage des gaines portait un nom différent de ceux répertoriés (Section **5.3.3 Développement des scripts d'export et d'import d'informations**). Ce nom a alors été ajouté dans les scripts et à l'avenir, ce dysfonctionnement ne se représentera plus.

6.3.3 Étape 3 : Planification Chronographique

L'étape de planification du projet a été réalisée en même que le développement du lien entre la base de données extraite et l'application de planification Chronographique utilisée. Les fonctionnalités et la démarche suivie sont donc celles présentées dans la **section 5.4 Planification Chronographique**. Pour rappel, les activités sont séparées en fonction du code MasterFormat pour les diverses spécialités et en fonction des étages et des zones où elles seront réalisées. Les différentes zones utilisées sont les suivantes :

⁶ Remarque : L'export de l'ensemble des informations du projet vers le classeur Excel a été testé. Cependant toutes ces informations ne seront pas exploitées pour la suite de l'étude de cas.

Tableau 6.1 Zones manipulées

Nom de la zone	Espace correspondant
V (Verticale)	Espace occupé par les éléments structuraux verticaux (murs en béton armé)
H (Horizontale)	Espace occupé par les éléments structuraux horizontaux (murs en béton armé)
EXT (Extérieur)	Espace occupé par les activités réalisées à l'extérieur du bâtiment
Zone1	Espace occupé par les activités réalisées à l'intérieur du logement 1
Zone2	Espace occupé par les activités réalisées à l'intérieur du logement 2
Zone3	Espace occupé par les activités réalisées à l'intérieur du logement 3
PC (Parties communes)	Espace occupé par les activités réalisées à l'intérieur des parties communes

La fonction de compilation a permis de générer automatiquement les 141 activités du projet (une activité différente pour chaque Code MasterFormat, étage et zone différents). Ces activités étaient donc par la suite visibles dans les vues « Revised », « Niveaux » et « Vertical » (respectivement présentées dans les figures 6.2, 6.3, 6.4 et 6.5).

Concernant la création de l'échéancier, la durée des tâches a été imposée pour chacune des activités. L'échéancier a ensuite été réalisé en utilisant les différentes vues (figures 6.2, 6.3, 6.4 et 6.5 présentées ci-après) de l'application.



Figure 6.2 Échéancier du projet dans la vue « Revised »

La figure 6.2 présente la vue « Revised ». Cette vue a permis de réaliser le premier assemblage de l'échéancier. Elle représente les intervenants (séparés en fonction du code MasterFormat) et les niveaux sur son axe vertical et le temps sur l'axe horizontal. Les étages sont, de plus, renseignés dans les barres des activités. L'utilisation de cette vue pour créer la planification offre l'avantage de pouvoir travailler directement avec des activités réparties par zone et par intervenant.

La vérification de l'échéancier et son optimisation, ont ensuite été réalisées grâce à l'utilisation des autres vues. Malgré la possibilité de voir les informations des intervenants, des étages et des zones dans la vue « Revised », l'appréhension de certaines contraintes restait délicate dans cette vue. La vue « Niveaux (regroupement par lots) » (figure 6.3) a permis de contrôler l'enchaînement des travaux du point de vue des intervenants. La vue « Niveaux (regroupement par zones) » (figure 6.4) a quant à elle permit de contrôler l'enchaînement des travaux du point

de vue des zones de travail. Puis l'utilisation de la vue « Vertical » a permis d'optimiser l'échéancier.



Figure 6.3 Échéancier dans la vue « Niveaux (regroupement par lot) »

La vue « Niveau (Regroupement par lot) » (figure 6.3) représente, pour un étage donné, les lots sur l'axe vertical et le temps sur l'axe horizontal. Les zones de travail sont renseignées dans les activités. Cette vue permet de plus, de visualiser sur un plan d'étage quels intervenants interviennent dans quelles zones. Cette vue s'avère donc très utile pour vérifier que les intervenants travaillent en continu au sein des différents espaces. En effet, pour chaque intervenant, si les activités sont accolées les unes aux autres dans cette représentation, cela signifie que les équipes travaillent en continu.



Figure 6.4 Échéancier du projet avec la vue « Niveaux (regroupement par zones) »

La vue « Niveau (Regroupement par zones) » (figure 6.4) représente, pour un étage donné, les zones sur l'axe vertical et le temps sur l'axe horizontal. Les zones de travail sont renseignées dans les activités. Cette vue permet de plus, de visualiser sur un plan d'étage quels intervenants interviennent dans quelles zones. Cette vue s'avère donc très utile pour détecter des conflits entre activités au sein des différentes zones. En effet, si pour chaque zone il n'y a qu'une seule ligne, cela signifie qu'un seul intervenant travaille dans cette zone en même temps. S'il y a plusieurs lignes, cela signifie qu'à une certaine date, plusieurs intervenants vont travailler en même temps dans la même zone⁷. Une attention particulière doit alors être accordée pour ces cas de figure pour vérifier que les deux intervenants puissent bien intervenir en même temps dans le même espace.

⁷ C'est le cas ici, car les activités correspondant à la pose des gaines et des raccords de gaines ont des codes MasterFormat différents et sont donc considérées comme réalisées par des intervenants différents.



Figure 6.5 Échéancier dans la vue « Vertical »

La vue « Vertical » (figure 6.5) présente les étages et les lots sur l'axe vertical et le temps sur l'axe horizontal. Les activités sont par ailleurs colorées en fonction des zones, avec la même charte graphique que dans les vues précédentes. Cette vue est utile pour des questions d'optimisation. En effet, dans le cadre d'un immeuble à étages répétitifs, les activités vont avoir une évolution linéaire sur une telle représentation graphique. L'étude des lignes caractérisant l'évolution des activités va donc permettre d'identifier plusieurs choses⁸. Si deux lignes se croisent, et que les activités se succèdent, il y a un conflit d'espace (figure 6.6.a). Si

⁸ L'utilisation de cette vue s'apparente à la méthode de planification LOB (Line of Balance) présentée dans la section 1.2.4 détection des conflits spatio-temporels de la revue de littérature.

l'espace entre les lignes augmente l'échéancier n'est pas optimisé (figure 6.6.b). Un échéancier optimisé se traduit alors par des lignes relativement proches (figure 6.6.c).

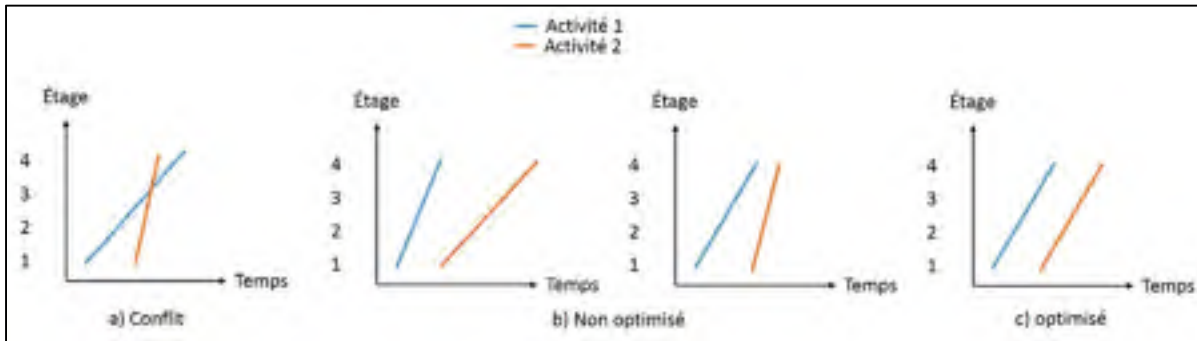


Figure 6.6 Étude des lignes caractérisant les activités

Une fois la planification réalisée, les différentes dates de réalisation des activités ont été importées dans l'onglet « Compil » (figure 6.7) de l'application. Une colonne contenant le type de tâche (« Construire » pour toutes les activités) a été ajoutée sur Navisworks.

Il est possible de renseigner les informations du type de tâche directement sur Navisworks, mais pour cela il faudrait renseigner les informations manuellement. Saisir cette information directement sur le fichier Excel permet donc d'économiser beaucoup de temps grâce à la fonction copier/coller.

De plus, il est pratiquement impossible d'optimiser l'échéancier sur Navisworks notamment en ce qui concerne l'optimisation de l'occupation des zones et l'assurance de la continuité des travaux des équipes. Car, la seule représentation graphique de la planification offerte par le logiciel est le diagramme à barre.

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
		Famille	MasterFormat	Niveau	Zone	Quantité	Code activité	Date de début	Date de fin	Type de tâche		
2		Dalle Béton	03 31 00	1	H	1	03 31 00-1-H	2016-07-11	2016-07-13	Construire		
3		Dalle Béton	03 31 00	2	H	1	03 31 00-2-H	2016-07-25	2016-07-29	Construire		
4		Dalle Béton	03 31 00	3	H	1	03 31 00-3-H	2016-08-08	2016-08-12	Construire		
5		Dalle Béton	03 31 00	4	H	1	03 31 00-4-H	2016-08-12	2016-08-26	Construire		
6		Béton	03 31 00	1	V	2	03 31 00-1-V	2016-07-18	2016-07-22	Construire		
7		Béton	03 31 00	2	V	2	03 31 00-2-V	2016-08-01	2016-08-05	Construire		
8		Béton	03 31 00	3	V	2	03 31 00-3-V	2016-08-15	2016-08-19	Construire		
9		Béton	03 31 00	4	V	2	03 31 00-4-V	2016-08-29	2016-09-02	Construire		
10		Brique	04 20 00	1	EXT	4	04 20 00-1-EXT	2016-09-19	2016-09-23	Construire		
11		Brique	04 20 00	2	EXT	4	04 20 00-2-EXT	2016-09-26	2016-09-30	Construire		
12		Brique	04 20 00	3	EXT	4	04 20 00-3-EXT	2016-10-03	2016-10-07	Construire		
13		Brique	04 20 00	4	EXT	4	04 20 00-4-EXT	2016-10-10	2016-10-14	Construire		
14		Isolant	07 21 00	1	EXT	4	07 21 00-1-EXT	2016-08-22	2016-08-26	Construire		
15		Isolant	07 21 00	2	EXT	4	07 21 00-2-EXT	2016-08-29	2016-09-02	Construire		
16		Isolant	07 21 00	3	EXT	4	07 21 00-3-EXT	2016-09-05	2016-09-09	Construire		
17		Isolant	07 21 00	4	EXT	4	07 21 00-4-EXT	2016-09-12	2016-09-16	Construire		
18		Porte simple panneaux	08 14 13	1	Zone1	1	08 14 13-1-Zone1	2016-10-06	2016-10-06	Construire		
19		Porte simple panneaux	08 14 13	2	Zone1	1	08 14 13-2-Zone1	2016-10-11	2016-10-11	Construire		
20		Porte simple panneaux	08 14 13	3	Zone1	1	08 14 13-3-Zone1	2016-10-14	2016-10-14	Construire		
21		Porte simple panneaux	08 14 13	4	Zone1	1	08 14 13-4-Zone1	2016-10-19	2016-10-19	Construire		
22		Porte simple panneaux	08 14 13	1	Zone7	1	08 14 13-1-Zone7	2016-10-07	2016-10-07	Construire		
23		Porte simple panneaux	08 14 13	2	Zone7	1	08 14 13-2-Zone7	2016-10-12	2016-10-12	Construire		
24		Porte simple panneaux	08 14 13	3	Zone7	1	08 14 13-3-Zone7	2016-10-17	2016-10-17	Construire		
25		Porte simple panneaux	08 14 13	4	Zone7	1	08 14 13-4-Zone7	2016-10-20	2016-10-20	Construire		
26		Porte simple panneaux	08 14 13	1	Zone3	1	08 14 13-1-Zone3	2016-10-10	2016-10-10	Construire		
27		Porte simple panneaux	08 14 13	2	Zone3	1	08 14 13-2-Zone3	2016-10-13	2016-10-13	Construire		
28		Porte simple panneaux	08 14 13	3	Zone3	1	08 14 13-3-Zone3	2016-10-18	2016-10-18	Construire		
29		Porte simple panneaux	08 14 13	4	Zone3	1	08 14 13-4-Zone3	2016-10-21	2016-10-21	Construire		
30		Porte simple	08 14 16	1	Zone1	3	08 14 16-1-Zone1	2016-10-05	2016-10-05	Construire		
31		Porte simple	08 14 16	2	Zone1	3	08 14 16-2-Zone1	2016-10-10	2016-10-10	Construire		
32		Porte simple	08 14 16	3	Zone1	3	08 14 16-3-Zone1	2016-10-15	2016-10-15	Construire		
33		Porte simple	08 14 16	4	Zone1	3	08 14 16-4-Zone1	2016-10-18	2016-10-18	Construire		

Figure 6.7 Échéancier réalisé dans la vue Revised

La feuille « compil » est alors une nouvelle vue représentant l'échéancier de construction comme celles présentes dans les feuilles « Revised », « Niveaux » et « Vertical ». Cette vue de l'échéancier est alors destinée à la présentation des informations nécessaires à l'élaboration du modèle 4D.

6.3.4 Étape 4 : Remontée d'information vers la maquette numérique

Une grande force de la stratégie de réalisation de la planification choisie réside dans la possibilité de faire remonter automatiquement un grand nombre d'informations vers les éléments du modèle Revit. En effet, la saisie manuelle du code d'activité pour chacun des éléments du modèle sur Revit prendrait un temps considérable. De plus, un grand nombre de codes différents sont à créer étant donné le nombre important d'activités engendré la structure de découpage adoptée.

Pour remonter l'information du code d'activité, les fonctions de concaténations permettent d'obtenir très rapidement les codes activités pour chacun des éléments. Le script Dynamo d'import d'informations (présenté dans la section **5.3.3 Développement des scripts d'import et d'export d'informations**) a ensuite été utilisé pour remonter les différents codes activités pour les éléments du modèle concerné⁹.

Observations :

La remontée d'informations se fait à partir des feuilles de nomenclature. De futures fonctions sur Revit pourront faire ces liens automatiquement, dans le cas d'une application intégrée. Une telle fonctionnalité permettra alors d'économiser du temps à l'utilisateur en évitant la saisie des informations sur Revit.

6.3.5 Étape 5 : Création du modèle 4D

Cette étape a été réalisée sur Navisworks, à partir du modèle BIM mis à jour avec les codes activités et l'échéancier issu de l'étape de planification Chronographique.

Une fois le modèle numérique mis à jour sur Revit (par l'intermédiaire du script d'import Dynamo), le modèle est exporté au Format Navisworks (Format NWC). Pour ce faire, la feuille « Compil » est enregistrée avec un Format CSV. Le modèle numérique est ensuite ouvert dans Timeliner de Navisworks. Le tableau suivant précise la correspondance entre les colonnes de la feuille « Compil » et les colonnes du Timeliner.

⁹ Remarque : Le script Dynamo a aussi été testé pour l'ensemble des paramètres créés même si ces paramètres sont inexploités.

Tableau 6.2 Correspondance Timeliner/Feuille Compil

Colonnes du Timeliner	Colonnes de la feuille « Compil »
Nom de la tâche	Famille
Type de tâche	Type de tâche
ID de Synchronisation ¹⁰	ID de Synchronisation
Date de début planifiée	Date de début
Date de fin planifiée	Date de fin
Utilisateur 1	Code activité

Le modèle numérique et l'échéancier importés sont liés grâce au code unique des activités (Fonctionnalité présentée dans la section **5.5.1 Lier automatiquement les activités aux éléments du modèle**). Une fois cette action terminée, la simulation 4D est prête à être lancée.

Précision : La fonctionnalité de base de règles automatiques utilise directement le nom du paramètre. Cependant celle-ci ne fonctionnait pas correctement. Pour résoudre ce problème, il a donc fallu utiliser les noms internes. Il s'agit en fait d'une fonctionnalité « développeur » qui permet d'utiliser les codes d'identification associés au paramètre.

Observations :

Concernant l'utilisation de règles automatiques sur Navisworks :

La création de règles automatiques pour lier les éléments du modèle et les activités grâce au **code activité** a contraint à utiliser les fonctionnalités « développeur » de l'application. Ce qui implique une maîtrise relativement poussée du logiciel.

¹⁰ Une colonne ID de synchronisation est nécessaire pour construire la hiérarchie des tâches dans le Timeliner. Une colonne a alors été ajoutée dans la feuille compil de l'application avec une suite de numéros incrémentés pour chaque activité différente

Concernant la visualisation de la simulation 4D :

Le modèle 4D réalisé permet de distinguer les différents espaces dans lesquels interviennent les travaux. Cependant, afin que l'évolution des activités entre les différents espaces soit clairement identifiable, il est nécessaire d'exploiter les fonctionnalités de Navisworks pour avoir des points de vue adéquats. En effet, la réalisation virtuelle d'activités comme la pose des murs ou la réalisation de plancher empêche de voir l'évolution des travaux à l'intérieur des étages inférieurs. Il n'est donc pas possible de visualiser l'avancée du travail zone par zone à l'intérieur de ces étages. Une solution à cette limite de visualisation consiste à utiliser des vues multiples du modèle 4D et des coupes afin de personnaliser chaque vue. Les fonctionnalités de Navisworks permettent aussi de changer l'apparence des éléments, les couleurs peuvent être changées et les éléments peuvent être rendus transparents. L'utilisateur devra donc détenir quelques compétences dans le maniement du logiciel Navisworks pour obtenir des visualisations 4D adéquates.

Il existe donc beaucoup de possibilités pour paramétrer la simulation 4D de manière à pouvoir visualiser l'enchaînement des travaux à travers les espaces du chantier. Le présent projet ne vise pas la proposition d'un guide pour paramétrer la simulation 4D afin d'obtenir un tel résultat. Elle vise à la réorganisation du modèle 3D pour correspondre à des perspectives de réalisation des travaux. Ainsi, l'étude des fonctionnalités de visualisation n'a pas été poussée outre mesure.

6.4 Visualisation des intervenants au sein des espaces dans la simulation 4D

Des fonctionnalités ont aussi été ajoutées pour permettre de visualiser quels intervenants réalisent les activités dans les différents espaces lors de la simulation 4D. Le modèle 4D réalisé dans les étapes précédentes reflète principalement le caractère spatial de la réalisation des travaux, car il permet de visualiser la réalisation des ouvrages zone par zone. Ceci grâce à l'approche spatiale de la méthode Chronographique. Cette méthode utilise aussi un code couleur dans les différentes représentations de l'échéancier pour identifier les intervenants

responsables de la réalisation des activités. De cette façon, il est facile d'appréhender l'évolution des intervenants et des activités à travers les espaces. Cette section présente donc les fonctionnalités développées pour faire ressortir cette évolution lors de la simulation 4D grâce à l'utilisation du code couleur.

Une première idée serait de colorer les éléments du modèle avec la couleur des intervenants responsables de leurs réalisations. Cependant, la taille de certains éléments pourrait rendre difficile la perception de la couleur lors de la visualisation de la simulation. La décision a alors été prise de créer des volumes sur le modèle 3D correspondant aux différents espaces (zones) et de colorer ces volumes en fonction de l'intervenant réalisant l'activité. Les volumes vont donc changer de couleur au fur et à mesure de l'avancement de la simulation 4D.

Pour rappel, le paramètre **type de tâche** du Timeliner Navisworks permet de gérer l'apparence des éléments lors de la simulation 4D. Cette fonctionnalité permet de définir l'apparence des objets associés à une activité à trois (3) étapes : avant le début de l'activité, pendant la réalisation de l'activité et une fois l'activité terminée. L'apparence de l'élément (couleur et transparence) peut être personnalisée à chacune de ces étapes. L'idée est donc de créer des **types de tâches** avec les couleurs des intervenants et de lier les activités aux volumes (zones) créés. Ainsi le volume prendra la couleur de l'intervenant lors de la réalisation de l'activité¹¹.

L'ajout de cette fonctionnalité a entraîné des actions supplémentaires à réaliser dans les différentes étapes de la stratégie de communication : à l'étape 1 sur Revit, à l'étape 3 dans le progiciel de la méthode chronographique et à l'étape 5¹². Ces actions sont présentées ci-après.

¹¹ Remarque : Cela implique que les volumes créés soient reliés à plusieurs activités. Réaliser ces opérations manuellement prendrait beaucoup de temps. C'est pourquoi des règles automatiques semblables à celles créées précédemment ont été ajoutées pour lier les éléments et les activités sur Navisworks.

¹² L'utilisation des fonctions d'import et d'export n'était pas pertinente étant donné le nombre restreint de saisies manuelles à réaliser sur le modèle. Cependant dans le cadre de projet plus complexe, les scripts pourront facilement être adaptés pour communiquer les informations des volumes (zones) avec le progiciel de la méthode Chronographique.

Étape 1 : préparation de la maquette numérique

Afin de pouvoir appliquer des couleurs aux différentes zones du projet, des objets Revit ont été ajoutés pour représenter géométriquement les zones dans le modèle. Il s'agit de volumes créés in-situ (section 4.2.3.2) prenant la forme des différents espaces. Différents volumes ont alors été créés pour les différentes zones présentées dans le tableau 6.1. Un paramètre appelé « Code espace » a de plus été ajouté (son rôle sera décrit plus en détail par la suite). Les paramètres « Zone » des différents volumes ont ensuite été renseignés de la même manière que pour les autres éléments du modèle.

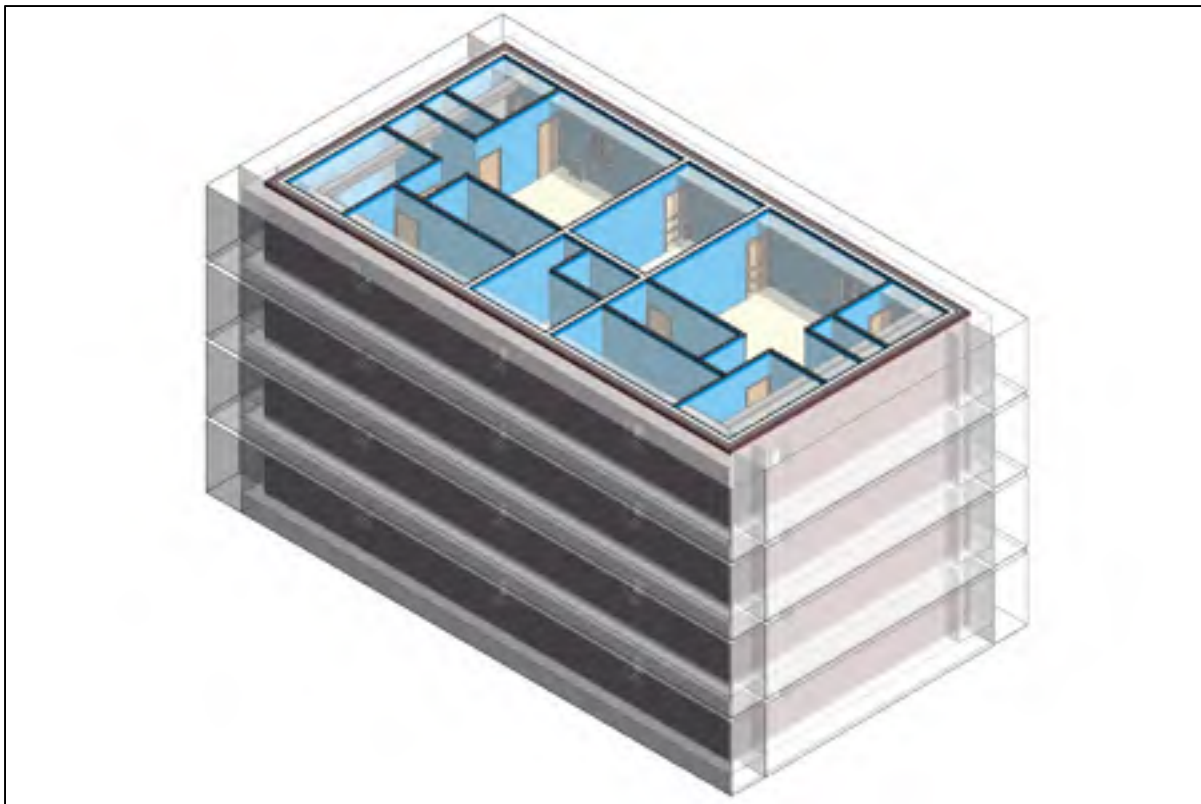


Figure 6.8 Modélisation des espaces sur Revit

Étape 3 : Planification Chronographique

Afin de pouvoir créer un lien entre les volumes et l'échéancier, une colonne intitulée « Code espace » a été ajoutée. Cette colonne est remplie par concaténation de l'étage et de la zone de chaque activité. L'échéancier est par la suite exporté au format CSV de la même manière que pour la stratégie présentée précédemment.

Étape 5 : La simulation 4D

Les deux fonctionnalités de Navisworks utilisées sont la possibilité de lier plusieurs échéanciers au modèle et la possibilité de paramétrage des **types de tâches**.

Cette fonctionnalité permet de colorer un élément du modèle le temps de réalisation d'une activité. Ainsi, un type de tâche a été créé pour chacun des intervenants et nommé avec le Code MasterFormat correspondant. La couleur associée à chacun des types de tâches est la même que la couleur de l'intervenant définie dans l'application de planification Chronographique (tableau 6.3). Ainsi, lors de l'importation de l'échéancier dans le modèle 4D précédemment réalisé, l'association de la colonne MasterFormat de l'échéancier avec la colonne Type de tâche du Timeliner permet d'associer directement les activités avec les types de tâches correspondants. Par ailleurs, la création d'une règle avec les paramètres « Code espaces » permet de créer automatiquement le lien entre les activités et les volumes ajoutés. Les volumes correspondant aux espaces prennent donc la couleur de l'intervenant associé à l'activité.

Tableau 6.3 couleurs associées aux intervenants

Intervenant (Code MasterFormat)	Couleur¹³
03 31 00	Béton
04 20 00	Briques
07 21 00	Isolant
08 14 13	Porte simple panneau
08 14 16	Porte simple
08 53 00	Fenêtre simple
09 21 16	Cloisons
09 68 13.2	Sol souple
09 91 23	Peinture
10 21 16	Douche
23 31 13	DuctType
23 31 19	Coude gaine
23 82 33	Chauffage

La figure 6.9 présentée ci-après montre une capture d'écran de la visualisation 4D faisant apparaître les espaces colorés lors de la réalisation des activités. À cet instant de la simulation 4D, les activités en cours réalisation étaient les suivantes ;

- la réalisation des cloisons dans la zone 1 de l'étage 4 (volume coloré en vert) ;
- la pose de la douche dans la zone 3 de l'étage 4 (volume coloré en bleu) ;
- la réalisation du revêtement extérieur en brique sur l'étage 3 (volume coloré en rouge).

Ainsi grâce au code couleur défini et à l'ajout de volumes correspondant aux zones, il est possible de voir quel sous-traitant intervient dans quel espace à chaque étape du projet dans la simulation 4D.

¹³ Le nom des activités correspondantes est indiqué dans la colonne couleur

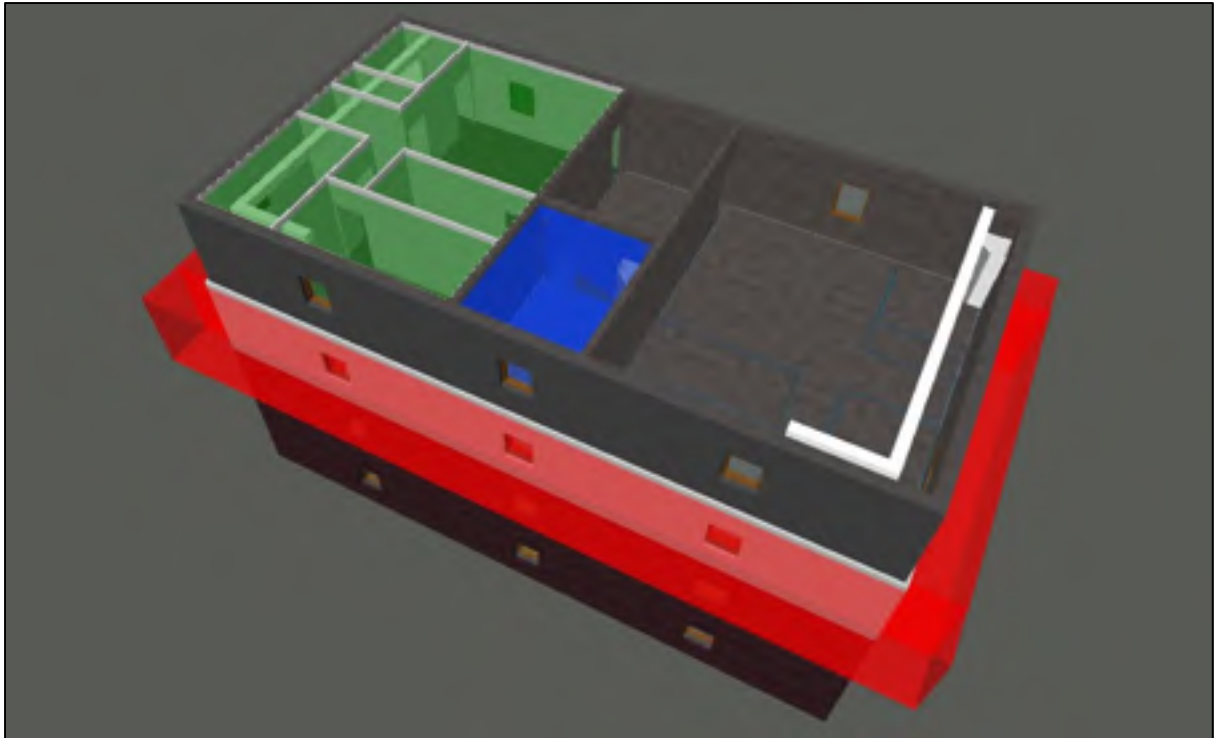


Figure 6.9 Visualisation 4D des intervenants au sein des différents espaces du projet

6.4.1 Observations

Lors de cette étude, des fonctionnalités ont été ajoutées pour permettre à l'utilisateur de visualiser clairement les intervenants réalisant les activités au sein des différentes zones du projet. L'ajout de cette possibilité repose en grande partie sur le travail précédemment réalisé avec l'application de la stratégie développée.

Cette étude s'intéresse à l'évolution dynamique des espaces de travail occupés par les intervenants. En utilisant des fonctionnalités similaires à celles présentées dans cette section, la stratégie pourrait être adaptée pour traiter d'autres aspects de la planification et de la gestion des projets en phase de réalisation. Par exemple, des volumes pourraient être ajoutés pour représenter les espaces de circulation ou de stockage. L'ajout de couleurs pourrait permettre de renseigner sur l'occupation d'un espace (occupé par une activité, utilisé comme espaces de stockage...).

Les principales limites constatées lors de cette étude résident dans le besoin de s'adapter aux fonctionnalités de Navisworks. Les limites suivantes ont été observées :

- même si plusieurs échéanciers peuvent être liés à un modèle, Navisworks ne permet de réaliser qu'une seule simulation 4D à la fois. Ce qui limite la visualisation des différentes contraintes simultanément ;
- la création des types de tâches correspondant aux intervenants peut s'avérer fastidieuse. Elle nécessite de créer manuellement le code couleur pour chacun des intervenants et de paramétrer chacun des types de tâches. Dans le cadre d'un projet important, cette étape peut donc s'avérer très longue. Par ailleurs, ces types de tâches ne peuvent pas être sauvegardés. Ils devront alors être recréés pour chaque modèle 4D ¹⁴ ;
- quelques limitations ont par ailleurs été observées en créant plusieurs vues de la simulation 4D. Lors de la création d'un nombre important de vues simultanées, les couleurs associées aux types de tâches n'apparaissaient plus. Ce type de bogues devrait certainement être corrigé lors de prochaines versions du logiciel.

¹⁴ Remarque : Une fonctionnalité similaire aux « gabarits Revit » pourrait alors être très pertinente pour ne pas avoir à redéfinir ces types de tâches à chaque nouveau projet.

CONCLUSION

L'arrivée du BIM dans le secteur de la construction a permis d'augmenter la performance des projets en phase de conception. Cependant, les principaux outils BIM permettant d'étudier la dimension du temps se limitent bien souvent à l'étude de la planification selon les méthodes traditionnelles ; représentation sous forme de diagramme Gantt et méthode du chemin critique. Ces méthodes ne sont pas adaptées à la planification de l'exécution des travaux étant donné qu'elles rendent difficile l'appréhension des contraintes spatiales et celles concernant les intervenants responsables de la réalisation des travaux. Ceci freine alors l'exploitation du BIM pour la planification des travaux en phase de construction. La planification Chronographique propose des solutions pour planifier l'exécution des travaux. Ceci en alternant entre différentes représentations des échéanciers. Ainsi elle permet d'illustrer le caractère spatial du projet et d'appréhender le rôle des intervenants au sein des différents espaces. L'objectif principal de ce projet était alors de développer une stratégie de communication entre les maquettes numériques, la planification Chronographique et les modèles 4D afin d'offrir une solution d'exploitation du BIM pour la planification de l'exécution des travaux de construction.

L'étude de la littérature servant de base pour cette recherche a permis d'identifier clairement le besoin de prendre en considération la gestion des espaces lors de la planification de la réalisation des travaux. Elle a par ailleurs souligné que les outils BIM et la méthode de planification actuellement utilisés sont destinés à aborder des problématiques de conception des ouvrages et nécessitent d'importants efforts d'adaptation pour refléter les perspectives de construction. En effet, d'une part les échéanciers de construction réalisés avec les méthodes traditionnelles ne tiennent pas compte des différents espaces du chantier de construction, et d'autre part, l'organisation des maquettes numériques classe les éléments en fonction du système et non par zones de construction. La planification doit alors être retravaillée pour obtenir une structure de découpage par zones de construction et les éléments du modèle BIM doivent être réorganisés pour correspondre à ces zones.

Une analyse plus poussée des mécanismes de la méthode Chronographique a permis d'identifier différents éléments permettant de prendre en considération les contraintes de réalisation des ouvrages lors de la planification. Cette méthode adopte une structure de découpage LBS qui permet au planificateur d'étudier les espaces du chantier à différents niveaux de précisions. Les activités sont alors planifiées sur la base de l'intervention des intervenants au sein des différents espaces du projet. Les maquettes BIM permettent de contenir un grand nombre d'informations de projet. La création d'un lien entre les maquettes numériques et la planification Chronographique, devrait donc permettre d'une part de fournir certaines des données nécessaires au travail de planification et d'autre part de créer des liens entre les activités et les éléments du modèle BIM.

Une étude expérimentale a donc été menée afin d'identifier les possibilités d'exploitation des maquettes numériques pour réaliser une planification avec la méthode Chronographique. Une application a été développée afin de mettre en œuvre le concept de planification Chronographique. Une analyse des possibilités de personnalisation des outils BIM a donc été réalisée et plusieurs possibilités de communication avec l'application de planification Chronographique ont été étudiées pour développer un lien d'interopérabilité avec celle-ci. Cette analyse expérimentale a permis d'une part d'identifier la solution la plus adéquate pour gérer la communication avec l'application de planification Chronographique et d'autre part de définir les étapes d'une stratégie de communication entre les différents outils pour réaliser la planification du projet. Cinq étapes ont alors été identifiées : la préparation du modèle BIM, l'export des informations vers l'application, la réalisation de planification avec la méthode Chronographique, la remontée d'information vers le modèle BIM et la réalisation de simulations 4D.

L'étude expérimentale a permis d'identifier les différentes étapes d'une stratégie de communication. Il a par ailleurs été observé que plusieurs possibilités existaient pour mener à bien ces différentes étapes et que certains outils devaient être mis en place pour rendre la stratégie pertinente. Une analyse plus approfondie des problématiques inhérentes à chacune de ces étapes a alors été menée et différentes solutions ont été mises en place pour rendre cette

stratégie la plus performante possible. Différents processus détaillés ont alors été créés pour chacune des étapes de la stratégie.

La stratégie développée a ensuite été mise en application avec l'étude d'un projet fictif. La portée de la stratégie a alors pu être analysée dans son ensemble. L'objectif principal de la stratégie visait à fournir une solution permettant de simplifier le travail de planification des travaux de construction. Cet objectif a été atteint dans le sens où le travail de planification a pu être simplifié grâce à l'exploitation des informations de la maquette numérique. De plus cette stratégie permet de réaliser des simulations 4D plus simplement, car elle évite le long travail de réorganisation du modèle 3D sur le logiciel de simulation. Un objectif secondaire de ce projet était de concevoir une stratégie facilement adaptable pour de futurs travaux sur la méthode Chronographique. Le caractère adaptable de cette stratégie a donc été étudié avec la réalisation d'une expérience visant à faire ressortir l'information sur l'intervenant en charge des travaux lors de la simulation 4D. Cet objectif a été atteint en faisant apparaître le code couleur des intervenants utilisé lors de la planification Chronographique du projet. Des adaptations similaires pourront par ailleurs être utilisées pour appréhender différents autres aspects tels que la gestion des stocks ou pour faire ressortir la fonction des différents espaces (Stockage, Travail, Circulation...).

Ce mémoire apporte alors une analyse des outils et techniques actuels pour réaliser la planification des travaux de construction et propose une stratégie de planification sur la base de l'utilisation conjointe du BIM, de la méthode Chronographique et de la simulation 4D. La solution développée se veut générale et pourra être adaptée et enrichie pour les besoins des futures recherches menées sur la planification de la réalisation des travaux de construction.

En conclusion, la difficulté d'appréhender les perspectives de construction des ouvrages avec les outils actuels de modélisation BIM rend difficile l'utilisation de la simulation 4D pour assister la planification des travaux. Plus précisément, les principales difficultés rencontrées sont les suivantes :

- la difficulté de réorganiser spatialement le modèle 3D du projet pour que les éléments soient séparés par espaces de travail ;
- les regroupements automatiques de plusieurs objets du modèle en un seul (comme les différentes couches de murs). Ces éléments doivent alors être séparés pour la planification ;
- l'organisation et la classification des éléments dans la structure du projet. Les éléments sont ordonnés et classés pour simplifier la conception. Il est donc nécessaire de les réorganiser en adoptant un autre système de classification plus adéquat à la phase de réalisation des travaux ;
- la difficulté et le temps nécessaire pour ajouter des informations aux objets du modèle.

Par ailleurs, l'utilisation des méthodes traditionnelles de planification rajoute aussi de la complexité pour réaliser les modèles 4D. Notamment, en raison de leur incapacité à traduire clairement le caractère spatial du projet ou encore les ressources engagées.

Une solution pour palier à ces différentes contraintes réside donc dans l'utilisation conjointe de modèles BIM et de méthode de planification spatiale telle que la méthode Chronographique. Pour la mise en place de telles solutions, il sera alors nécessaire d'avoir à personnaliser les outils actuels de modélisation BIM. Dans ces cas-là, l'utilisation d'add-in ou d'interface de programmation visuelle (telle que Dynamo pour Revit) s'avère alors d'une grande utilité pour personnaliser le contenu des maquettes.

RECOMMANDATIONS

La stratégie de communication développée au cours de ce projet de recherche s'inscrit dans la continuité des travaux menés au sein du laboratoire MGPlan sur la méthode Chronographique. L'un des objectifs poursuivis lors de la création de cette stratégie réside dans la possibilité d'adapter la méthode pour de futures applications. Voici alors quelques recommandations pour les recherches futures.

Premièrement, cette étude s'est concentrée sur l'étude du couple Revit/Navisworks développé par la société Autodesk pour la modélisation de la maquette numérique et la réalisation de la simulation 4D en raison de leur implantation marquée dans l'industrie de la construction et de la maturité de leur développement. Bon nombre d'autres solutions logicielles existent pour la création de maquettes numériques ainsi que pour la réalisation de simulations 4D. Il pourrait donc être intéressant d'étudier les fonctionnalités d'autres logiciels BIM pour appliquer la présente stratégie de communication. Des solutions logicielles telles que la suite Vico propose des solutions pour une gestion BIM couvrant les domaines de la coordination 3D, des rapports de quantités, de l'estimation des coûts et de la planification des projets de construction. Cette suite propose des outils pour étudier la planification des travaux en prenant en considération la localisation des ouvrages par type de corps d'état et propose des représentations de la planification sous forme de diagramme LOB. La structure de découpage du projet étant aussi basée sous la forme d'un LBS. Des liens pourraient alors potentiellement être créés avec les vues de la méthode Chronographique.

D'autre part, la stratégie créée se base sur l'exploitation d'un nombre relativement important d'informations ajoutées sur les éléments du modèle BIM. Mais, toutes les informations utiles à la méthode Chronographique n'ont pas été étudiées. Ces informations pourraient alors être ajoutées par la suite pour développer de nouvelles fonctionnalités. Dans ce cas, les informations pourraient être saisies à différentes étapes du projet et par différents intervenants. Des études complémentaires pourraient alors être menées dans le but de déterminer à quelles étapes et par quels intervenants il serait le plus pertinent d'ajouter ces informations.

La stratégie développée permet d'exploiter les données issues d'une maquette BIM. Elle offre aussi la possibilité faire remonter des informations issues de la planification vers cette maquette numérique. Une fois stockées sur la maquette numérique, ces informations pourront servir de base pour d'autres spécialités comme l'estimation des coûts, la gestion des risques ou le suivi des travaux. Des études approfondies de l'exploitation de ces informations dans d'autres applications pourraient alors être menées. Ceci afin de poursuivre l'objectif de l'utilisation de la maquette BIM comme élément central autour de laquelle s'articuleront les différentes spécialités des projets de construction.

La présente stratégie passe par la création d'une base de données renfermant les informations nécessaires à la planification Chronographique. L'application permettant d'illustrer le concept de la méthode Chronographique est développée en VBA Excel, le choix a donc été fait d'utiliser les feuilles des classeurs Excel comme base de données. Dans le cadre d'un développement de logiciel plus complet pour l'application de la méthode Chronographique, celui-ci s'articulera certainement autour d'une base de données. Revit offre différentes possibilités pour communiquer avec des bases de données. Il serait donc intéressant d'étudier ces possibilités pour augmenter la performance du lien d'interopérabilité entre les deux logiciels.

L'étude menée pour étudier les possibilités d'adaptation de la stratégie a permis de réaliser une simulation 4D renseignant sur les intervenants occupant les différents espaces grâce à une colorisation des volumes. Comme discuté dans cette partie, la démarche suivie pour réaliser une telle simulation 4D pourrait facilement être adaptée pour faire ressortir plus d'informations comme la fonction de l'espace ou son état d'occupation. Le tout par la modélisation de volume élémentaire sur Revit et par la création de liens entre ces volumes et la planification Chronographique du projet. Parallèlement à cela, les outils actuels permettant de traiter la détection de conflits statiques et dynamiques génèrent un nombre important de faux conflits. Les utilisateurs doivent alors réaliser d'importants efforts pour passer en revue l'ensemble des conflits relevés afin de juger de leur importance et prendre les mesures nécessaires à leurs levées. Ceci s'explique par le nombre important d'éléments présents dans ces modèles. Des

études ont été menées pour détecter des conflits entre les différents espaces de travail. Cependant, la modélisation de ces espaces était faite par la génération de volumes élémentaires correspondant aux espaces de travail et à leur évolution autour de tous les éléments du modèle 3D. Une telle manière de procéder donne alors lieu à un nombre très important de conflits à analyser manuellement. Une modélisation des espaces de travail selon le concept de la planification Chronographique réduit considérablement le nombre de volumes à créer. Ainsi, la détection de conflits entre ces différents espaces devrait être considérablement réduite. Un effort de recherche serait donc intéressant pour mettre en place une stratégie de détection des conflits spatio-temporels entre les espaces de travail sur la base de la méthode Chronographique et de la stratégie de communication développée dans ce mémoire.

Enfin, si la stratégie devait être utilisée telle quelle dans de futurs travaux pour réaliser la planification des travaux, voici quelques recommandations :

- appliquer les différentes étapes de la stratégie dans le cadre de projets réels pour en évaluer la pertinence et au besoin l'adapter ;
- surveiller les fonctionnalités ajoutées dans les dernières versions des différents logiciels et applications utilisés. Certaines pourraient simplifier l'utilisation de la stratégie et la rendre encore plus pertinente.

ANNEXE I

SCRIPT DE CRÉATION DES PARAMÈTRES DE TYPE

La création du script d'ajout des paramètres de types s'est fait sur la base d'un script python proposé sur le site web **dynamobim**. Le script python proposé sur ce site (figure-A I) proposait d'automatiser la création d'un **paramètre de type** avec comme donnée d'entrée le nom du paramètre à créer. L'exécution de ce script entraînait la création d'un paramètre de type **Texte**, enregistré dans le groupe de paramètre **Données**.

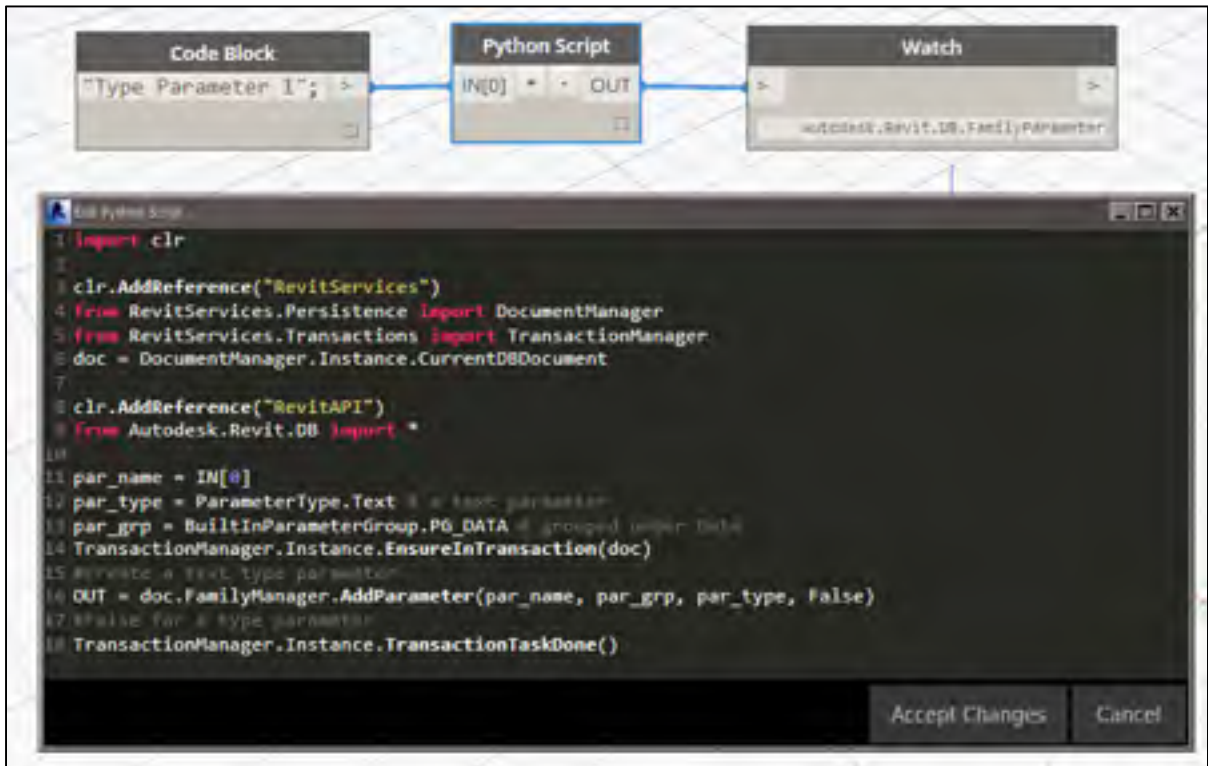


Figure-A I-1 Script de création de paramètre de type
tiré de dynamobim (2016)

Ce script a par la suite été adapté pour enregistrer le paramètre dans le groupe de paramètres **Données d'identification**. Et plusieurs noms de paramètres ont été prédéfinis (figure-B I).

Ainsi l'utilisateur n'a qu'à ouvrir la **famille** à laquelle il souhaite ajouter les paramètres et à lancer le script Dynamo.

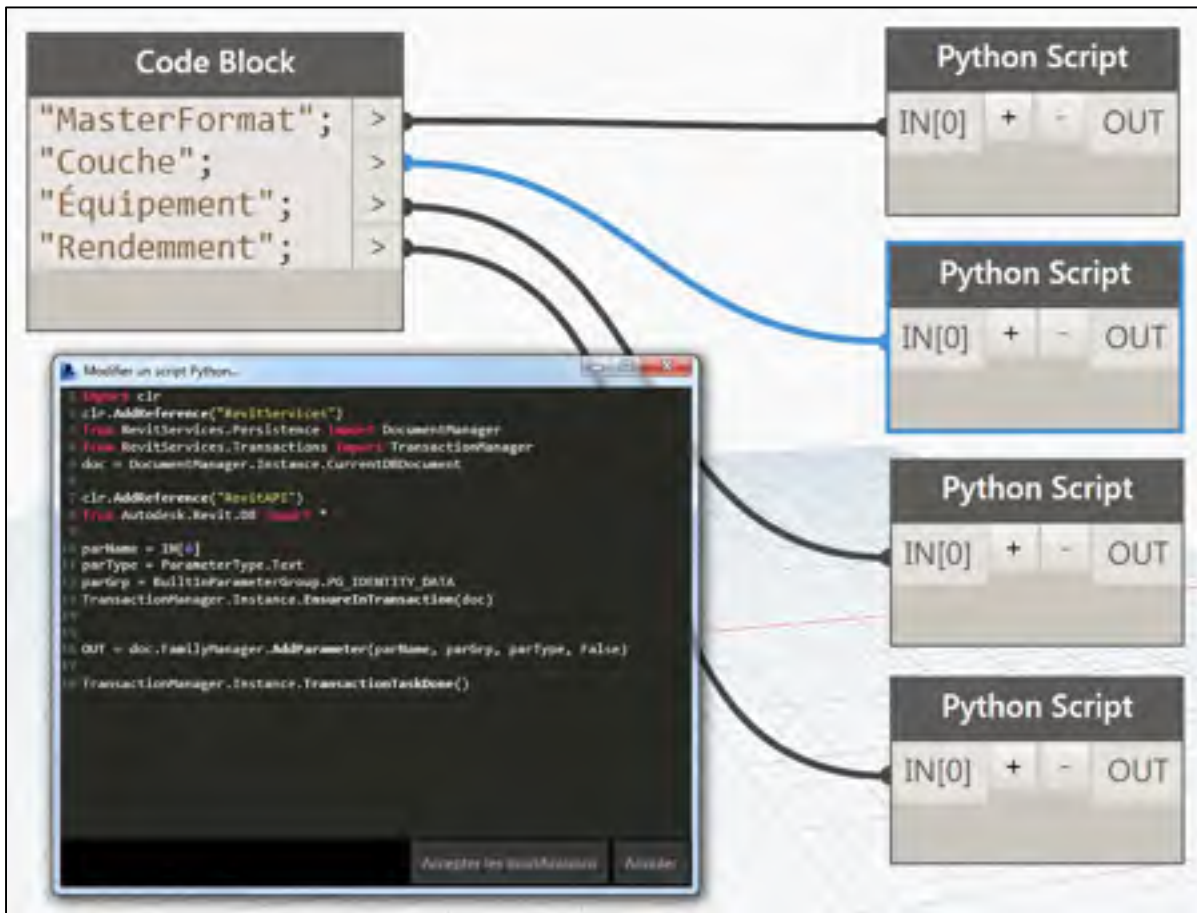


Figure-A I-2 Script adapté pour le besoin du projet

Ce script peut par ailleurs être facilement modifié pour ajouter des paramètres à créer. Il suffit de dupliquer le nœud **PythonScript** et de lui passer le nom du paramètre à créer en entrée. Ce script est de plus fonctionnel pour toutes les **familles chargeables**.

ANNEXE II

PARAMÈTRES MANIPULÉS POUR LA STRATÉGIE DE COMMUNICATION

Tableau-A I-1 Paramètres manipulés pour la stratégie de communication

Information manipulée	Nom du paramètre Revit	Type de paramètre	Exemple de valeur du paramètre
Famille	Famille	Prédéfini	Porte simple
Type de Famille	Type	Prédéfini	0.915m x 2.032m
Code activité	Code activité	Occurrence	09 91 23-N4-Z3
Matériaux	Matériaux ou Matériaux Chrono	Type	« Béton » ou « porte »
Équipement	Équipement	Type	Grue
Étage	Niveau (peut varier selon les catégories)	Prédéfini	N1 (Niveau 1)
Phase	Couche	Type	CE (Création d'espace)
Zone	Zone	Occurrence	Z1 (Zone 1)
Secteur	Secteur	Occurrence	S1 (Secteur 1)
Code MasterFormat	MasterFormat	Type	08 14 13
Code Unifomat	Code d'assemblage	Prédéfini	C1020120
Intervenant	Intervenant	Occurrence	Plombier – Nom de l'entreprise
Équipe	Équipe	Occurrence	Équipe 1
Fournisseur	Fournisseur	Type	Nom du fournisseur
Longueur	Longueur	Prédéfini	12m
Surface	Surface (peut varier selon les catégories)	Prédéfini	5m2

ANNEXE III

NŒUD D'ÉCRITURE DANS UN PARAMÈTRE INDÉPENDAMMENT DE L'OBJET

Le nœud d'écriture dans les paramètres (présenté dans la figure-A III) a été réalisé afin d'écrire dans tout type de paramètre (paramètre d'occurrence ou de type). Il a été réalisé par combinaison de plusieurs nœuds. Plusieurs tests logiques sont mis en place pour déterminer si le paramètre est un paramètre d'occurrence ou de type. D'autres tests logiques servent à écraser la valeur du paramètre si la case correspondant dans le fichier Excel (Permet ainsi de supprimer une valeur mauvaise sur Excel, la valeur sera alors aussi supprimée sur Revit).

Précision : Le script réalisé ne permet pas d'écrire dans tous les paramètres manipulés. En effet il est préférable que certains paramètres ne puissent pas être modifiés depuis Excel. Par exemple les zones ou les niveaux.

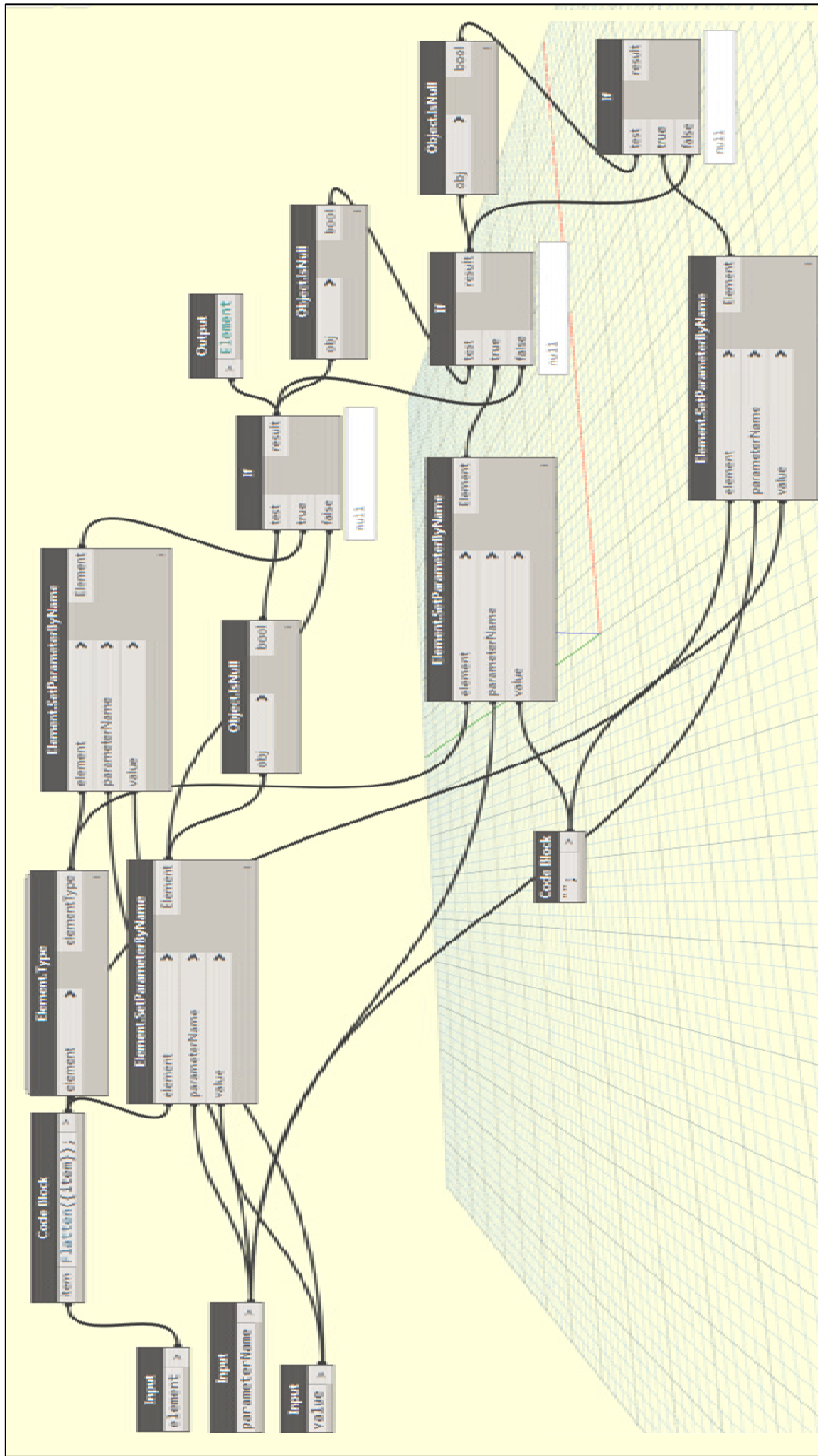
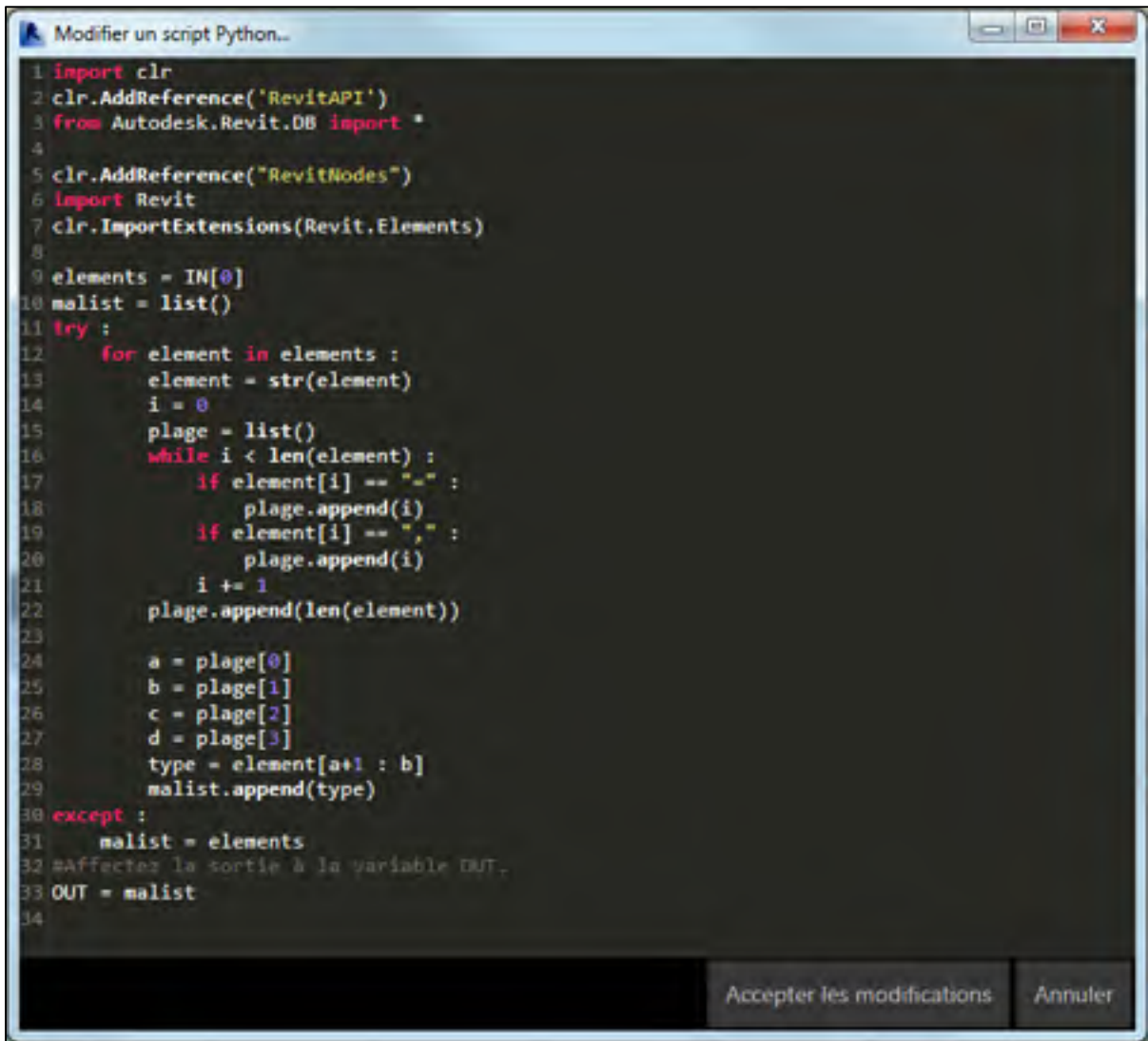


Figure - A III-1 : Nœud d'écriture dans tout type de paramètre

ANNEXE IV

MISE EN FORME SORTIE NŒUD NIVEAU



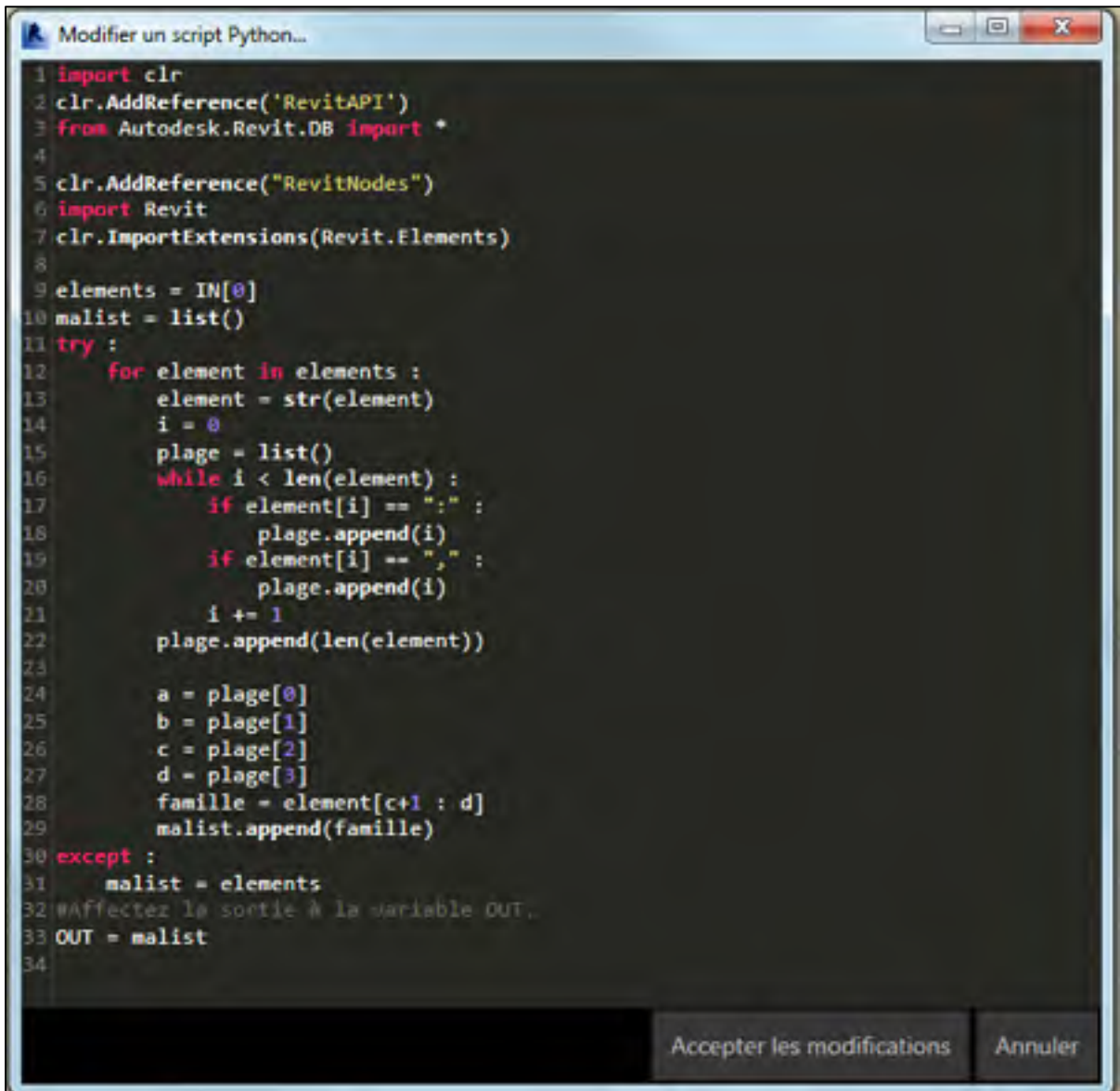
```
1 import clr
2 clr.AddReference('RevitAPI')
3 from Autodesk.Revit.DB import *
4
5 clr.AddReference("RevitNodes")
6 import Revit
7 clr.ImportExtensions(Revit.Elements)
8
9 elements = IN[0]
10 malist = list()
11 try :
12     for element in elements :
13         element = str(element)
14         i = 0
15         plage = list()
16         while i < len(element) :
17             if element[i] == "-" :
18                 plage.append(i)
19             if element[i] == "," :
20                 plage.append(i)
21             i += 1
22         plage.append(len(element))
23
24         a = plage[0]
25         b = plage[1]
26         c = plage[2]
27         d = plage[3]
28         type = element[a+1 : b]
29         malist.append(type)
30 except :
31     malist = elements
32 #Affecter la sortie à la variable OUT.
33 OUT = malist
34
```

Accepter les modifications Annuler

Figure-A IV-1 Script Python mise en forme sortie nœud niveau

ANNEXE V

MISE EN FORME SORTIE NŒUD FAMILLE



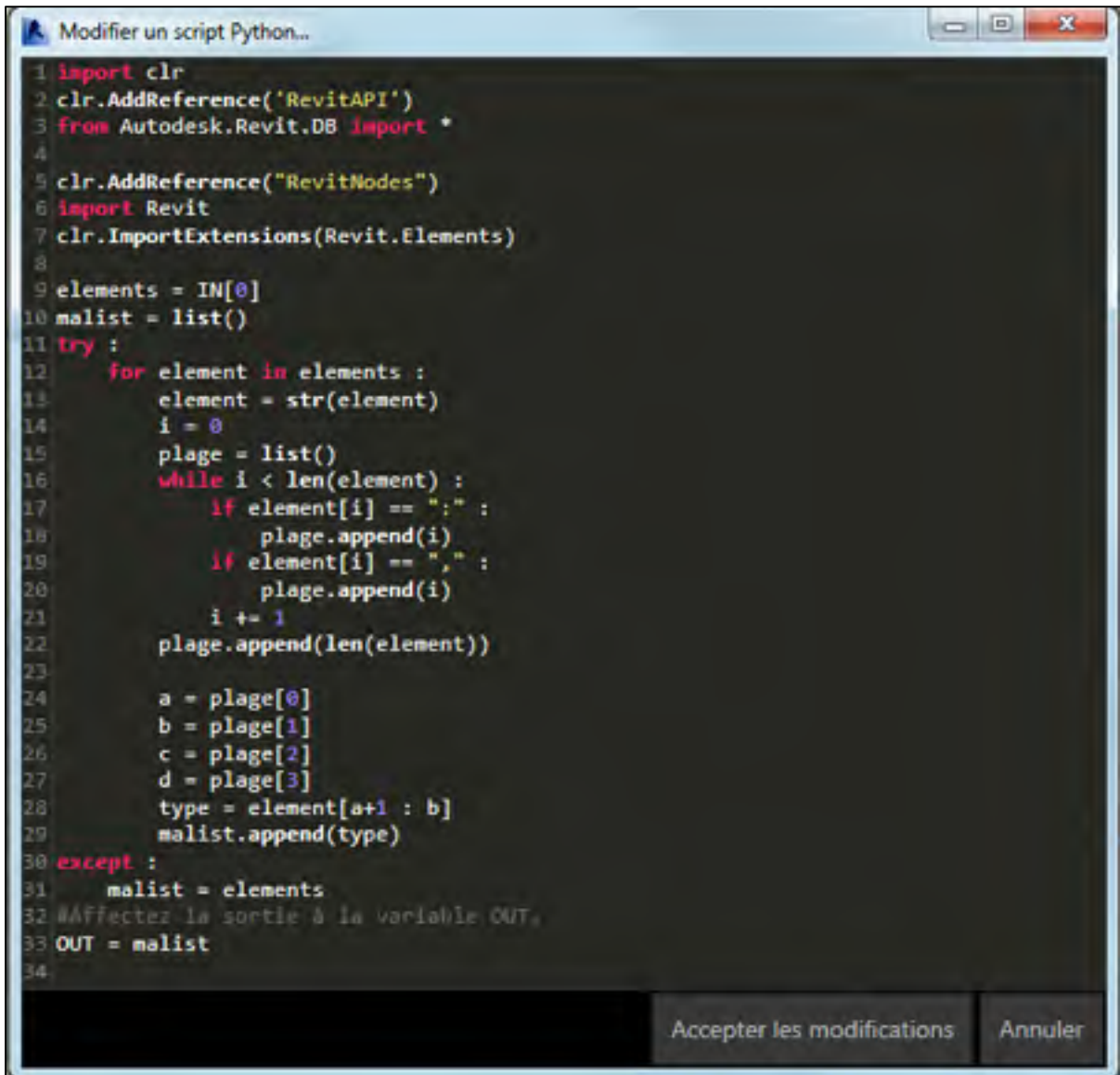
```
1 import clr
2 clr.AddReference('RevitAPI')
3 from Autodesk.Revit.DB import *
4
5 clr.AddReference("RevitNodes")
6 import Revit
7 clr.ImportExtensions(Revit.Elements)
8
9 elements = IN[0]
10 malist = list()
11 try :
12     for element in elements :
13         element = str(element)
14         i = 0
15         plage = list()
16         while i < len(element) :
17             if element[i] == ":" :
18                 plage.append(i)
19             if element[i] == "," :
20                 plage.append(i)
21             i += 1
22         plage.append(len(element))
23
24         a = plage[0]
25         b = plage[1]
26         c = plage[2]
27         d = plage[3]
28         famille = element[c+1 : d]
29         malist.append(famille)
30 except :
31     malist = elements
32 #Affectez la sortie à la variable OUT.
33 OUT = malist
34
```

Accepter les modifications Annuler

Figure-A V-1 Script Python mise en forme sortie nœud famille

ANNEXE VI

MISE EN FORME SORTIE NŒUD TYPE DE FAMILLE



```
1 import clr
2 clr.AddReference('RevitAPI')
3 from Autodesk.Revit.DB import *
4
5 clr.AddReference("RevitNodes")
6 import Revit
7 clr.ImportExtensions(Revit.Elements)
8
9 elements = IN[0]
10 malist = list()
11 try :
12     for element in elements :
13         element = str(element)
14         i = 0
15         plage = list()
16         while i < len(element) :
17             if element[i] == ":" :
18                 plage.append(i)
19             if element[i] == "," :
20                 plage.append(i)
21             i += 1
22         plage.append(len(element))
23
24         a = plage[0]
25         b = plage[1]
26         c = plage[2]
27         d = plage[3]
28         type = element[a+1 : b]
29         malist.append(type)
30 except :
31     malist = elements
32 #Affectez la sortie à la variable OUT.
33 OUT = malist
34
```

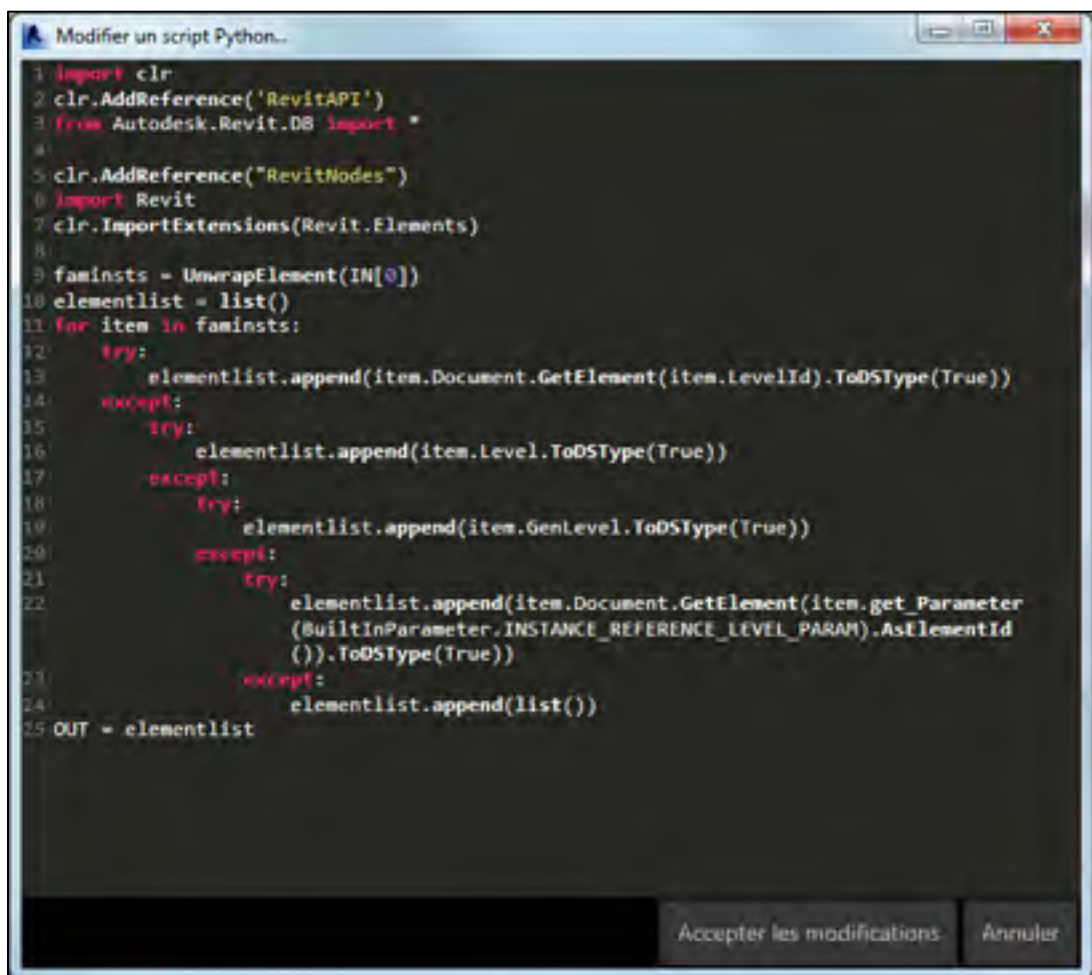
Accepter les modifications Annuler

Figure-A VI-1 Script Python mise en forme sortie nœud type de famille

ANNEXE VII

NŒUD NIVEAU UNIVERSEL

Le nœud niveau (étage) universel a été développé pour que l'on puisse récupérer la valeur du paramètre indépendamment de son nom. En effet, le nom des paramètres contenant l'information sur l'étage de localisation de l'élément varie selon les objets. Un nœud **Script Python** référençant plusieurs noms de paramètres pour l'information **Étage** est disponible dans la bibliothèque de nœuds **Clockwork** disponible en téléchargement directement à partir de **Dynamo** (figure-A VII). Ce nœud a servi de base pour la création du nœud **niveau universel**.



```
1 import clr
2 clr.AddReference('RevitAPI')
3 from Autodesk.Revit.DB import *
4
5 clr.AddReference("RevitNodes")
6 import Revit
7 clr.ImportExtensions(Revit.Elements)
8
9 faminsts = UnwrapElement(IN[0])
10 elementlist = list()
11 for item in faminsts:
12     try:
13         elementlist.append(item.Document.GetElement(item.LevelId).ToOStype(True))
14     except:
15         try:
16             elementlist.append(item.Level.ToOStype(True))
17         except:
18             try:
19                 elementlist.append(item.GenLevel.ToOStype(True))
20             except:
21                 try:
22                     elementlist.append(item.Document.GetElement(item.get_Parameter(
23                         BuiltInParameter.INSTANCE_REFERENCE_LEVEL_PARAM).AsElementId(
24                         )).ToOStype(True))
25                 except:
26                     elementlist.append(list())
27
28 OUT = elementlist
```

Figure-A VII-1 Nœud Clockwork Niveau universel (Element.Level)

Ce nœud ne couvrait cependant pas toutes les variations d'appellation du paramètre contenant l'information Étage. Différents autres noms ont alors été ajoutés en réalisant des tests logiques pour déterminer si la sortie du nœud **Clockwork** était nulle. Les noms de paramètres ajoutés sont : **Contrainte inférieure** et **Niveau de référence**. Le nœud créé est présenté dans la figure-B VII.

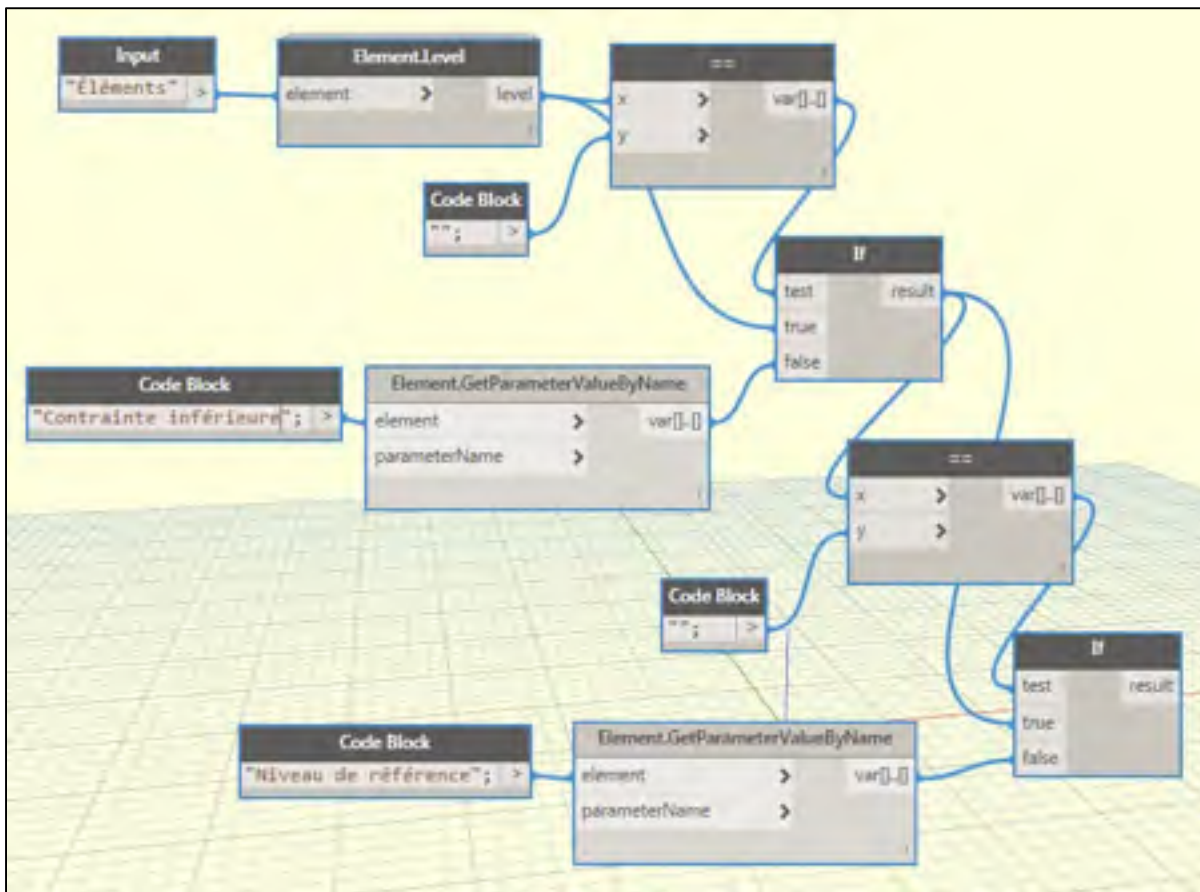


Figure-A VII-2 Nœud niveau universel créé

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Akinci, B., Fischen, M., Levitt, R., & Carlson, R. (2002). Formalization and automation of time-space conflict analysis. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 16(2), 124-134.
- Antill, J. M., & Woodhead, R. W. (1990). *Critical path methods in construction practice* (4e éd.). John Wiley & Sons. Repéré à https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=ubJfZ_p65NMC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Critical+path+methods+in+construction+practice&ots=q_K5Od-El9&sig=Oou3JchVXxbmA_TEkczthNeO-IE#v=onepage&q&f=false
- Ballard, H. G. (2000). *The last planner system of production control* (Thèse de Doctorat, The University of Birmingham, Birmingham,). Repéré à <http://theses.bham.ac.uk/4789/>
- Bertelsen, S., Koskela, L., Henrich, G., & Rooke, J. (2006). Critical flow—towards a construction flow theory. Dans *Proceedings IGLC* (Vol. 14, pp. 31-40). IGLC.
- Boton, C. (2013). *Conception de vues métiers dans les collecticiels orientés service. Vers des multi-vues adaptées pour la simulation collaborative 4D/nD de la construction* (Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, France). Repéré à <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00818022/document>
- Chau, K., Anson, M., & De Saram, D. (2005). 4D dynamic construction management and visualization software: 2. Site trial. *Automation in Construction*, 14(4), 525-536.
- Chau, K., Anson, M., & Zhang, J. (2005). 4D dynamic construction management and visualization software: 1. Development. *Automation in Construction*, 14(4), 512-524.
- Chavada, R., Kassem, M., Dawood, N., & Naji, K. (2012). A framework for construction workspace management: a serious game engine approach. Dans *Computing in Civil Engineering (2012)* (pp. 57-64).
- Coyne, K. (2008). Leveraging the Power of 4D Models for Analyzing and Presenting CPM Schedule Delay Analyses. *AACE International Transactions*, BIM31. Repéré à http://openurl.quebec.ca:9003/ets?url_ver=Z39.88-2004&rft_val_fmt=info%3Aofi%2Ffmt%3Akev%3Amtx%3Ajournal&genre=article&sid=ProQ%3AProQ%3A&atitle=Leveraging%20the%20Power%20of%204D%20Models%20for%20Analyzing%20and%20Presenting%20CPM%20Schedule%20Delay%20Analyses&title=AACE%20International%20Transactions&issn=15287106&date=2008-01-01&volume=&issue=&spage=BIM31&au=Coyne%2C%20Kevin%2C%20PE%20PS

P&isbn=&jtitle=AACE%20International%20Transactions&btile=&rft_id=info%3Aeric%2F&rft_id=info%3Adoi%2F

- Crotty, R. (2013). *The impact of building information modelling : transforming construction*. Routledge. Repéré à <https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=KJ7HBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT10&dq=The+impact+of+building+information+modelling+:+transforming+construction&ots=1wZewZBW3Y&sig=buwESJfitBPQ96x9SYdMYUIHzdA#v=onepage&q=The%20impact%20of%20building%20information%20modelling%20%3A%20transforming%20construction&f=false>
- de Vries, B., & Harink, J. M. (2007). Generation of a construction planning from a 3D CAD model. *Automation in Construction*, 16(1), 13-18.
- Dhillon, R. K., Jethwa, M., & Rai, H. S. (2014). Extracting Building Data from BIM with IFC. *Int. J. on Recent Trends in Engineering and Technology*, 11(1).
- dynamobim. (2016). Create Type Parameters in Dynamo. Repéré le 13 mars 2017 à <https://forum.dynamobim.com/t/create-type-parameters-in-dynamo/3200/5>
- Eastman, C. M., Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. John Wiley & Sons.
- Fondahl, J. W. (1962). *A non-computer approach to the critical path method for the construction industry* (n° Technical Report No. 9). Stanford University: The Construction Institute, Departement of Civil Engineering.
- Fondahl, J. W. (1964). *Methods for extending the range of non-computer critical path applications* (n° Technical Report No. 47). Stanford University: The Construction Institute, Departement of Civil Engineering.
- Ford, L., & Fulkerson, D. (1957). A simple algorithm for finding maximal network flows and an application to the Hitchcock problem. *Journal Canadien des Mathématiques*, 9, 210-218.
- Forgues, D., & Becerik-Gerber, B. (2013). Integrated project delivery and building information modeling: redefining the relationship between education and practice. *International Journal of Design Education*, 6(2), 47-56.
- Francis, A. (2004). *La modélisation chronographique de la planification des projets de construction* (Tèse de Doctorat, École de technologie supérieure, Montréal). Repéré à <http://espace.etsmtl.ca/id/eprint/692>

- Francis, A. (2015). Applying the chronographical approach for modelling to different types of projects. Dans *Proceedings of the 5th International/11th Construction Specialty Conference (ICSC 15), Vancouver, BC, Canada* (Vol. 101).
- Francis, A. (2015). Graphical modelling classification for construction project scheduling. *Creative Construction Conference 2015, Selected Papers*, 123, 162-168.
- Francis, A. (2016a). A chronographic protocol for modelling construction projects. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Management Procurement and Law*, 169(4), 168-177.
- Francis, A. (2016b). Comparing Time and Quantity Scales for Relationship and Float Calculations. *5th Creative Construction Conference (Ccc 2016)*, 164, 49-56.
- Francis, A. (2017). Simulating Uncertainties in Construction Projects with Chronographical Scheduling Logic. *Journal of construction engineering and management*, 143(1), 1-14.
- Francis, A., & Ardila, F. (2015). The Chronographic Protocol: Validation of textures and colors. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 5(7), 36-43.
- Francis, A., Bibai, J., & Miresco, E. (2013). Simulation of scheduling logic using dynamic functions. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Management, Procurement and Law*, 166(3), 145-158.
- Francis, A., & Miresco, E. (2000). *Decision Support for Project Management Using a Chronographic Approach* présentée à Conf. on Decision Making in Urban and Civil Engineering, Lyon, France.
- Francis, A., & Miresco, E. (2006). A chronographic method for construction project planning. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(12), 1547-1557.
- Francis, A., & Miresco, E. (2011). A generalized time-scale network simulation using chronographic dynamics relations. Dans *Computing in Civil Engineering (2011)* (pp. 560-568).
- Francis, A., & Miresco, E. (2016). Schedule margins computation using the chronographic logic.
- Francis, A., & Miresco, E. T. (2002). Decision support for project management using a chronographic approach. *Journal of decision systems*, 11(3-4), 383-404.
- Francis, A., & Morin-Pepin, S. (2017). The Concept of Float Calculation Based on the Site Occupation using the Chronographical Logic. *Procedia Engineering*, 196, 690-697.

- Frandsen, A., & Tommelein, I. D. (2014). Development of a takt-time plan: A case study. Dans *Construction Research Congress 2014: Construction in a Global Network* (pp. 1646-1655).
- Froese, T. M. (2010). The impact of emerging information technology on project management for construction. *Automation in Construction*, 19(5), 531-538.
- Fulkerson, D. R. (1962). Expected critical path lengths in PERT networks. *Operations Research*, 10(6), 808-817.
- Gantt, H. L. (1919). Work, wages, and profits. *The Engineering magazine co*, 340.
- Gao, S., & Low, S. P. (2014a). The Last Planner System in China's construction industry—A SWOT analysis on implementation. *International Journal of Project Management*, 32(7), 1260-1272.
- Gao, S., & Low, S. P. (2014b). *Lean Construction Management*. Springer. Repéré à <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-981-287-014-8.pdf>
- Guo, S. J. (2002). Identification and resolution of work space conflicts in building construction. *Journal of Construction Engineering and Management-Asce*, 128(4), 287-295.
- Hajdu, M. (2015). Continuous precedence relations for better modelling overlapping activities. *Creative Construction Conference 2015, Selected Papers*, 123, 216-223.
- Hajdu, M. (2016). PDM time analysis with continuous and point-to-point relations: Calculations using an artificial example. *5th Creative Construction Conference (Ccc 2016)*, 164, 57-67.
- Hajdu, M., Skibniewski, M., Vanhoucke, M., Horvath, A., & Brilakis, I. (2016). How Many Types of Critical Activities Exist? A Conjecture in Need of Proof. *Procedia Engineering*, 164, 3-11.
- Hardin, B., & McCool, D. (2015). *BIM and construction management: proven tools, methods, and workflows*. John Wiley & Sons.
- Hendrickson, C., & Au, T. (1989). *Project management for construction: Fundamental concepts for owners, engineers, architects, and builders* (2e éd.). Chris Hendrickson. Repéré à https://books.google.ca/books?hl=fr&lr=&id=N5mVq8GrT0kC&oi=fnd&pg=PT44&dq=Project+management+for+construction:+Fundamental+concepts+for+owners,+engineers,+architects,+and+builders&ots=9eUoHyZpC6&sig=vWCpQg_SnC5R_IPQiYT5RHzWUXk#v=onepage&q=Project%20management%20for%20construction%3A%20Fundamental%20concepts%20for%20owners%2C%20engineers%2C%20architects%2C%20and%20builders&f=false

- Henrich, G., Tilley, P., & Koskela, L. (2005). Context of production control in construction.
- Hinze, J. (2008). *Construction planning and scheduling* (3rd ed. éd.). Upper Saddle River, N.J.: Pearson/Prentice Hall.
- Kelley, J., & James, E. (1961). Critical-path planning and scheduling: Mathematical basis. *Operations Research*, 9(3), 296-320.
- Kelly, J., & Walker, M. (1959). Critical path planning and scheduling: An introduction. *Mauchly Associates, Ambler, PA*.
- Kim, K., & de la Garza, J. M. (2005). Critical path method with multiple calendars. *Journal of Construction Engineering and Management-Asce*, 131(3), 330-342.
- Kim, S. G. (2012). CPM Schedule Summarizing Function of the Beeline Diagramming Method. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 11(2), 367-374.
- Koo, B., & Fischer, M. (2000). Feasibility study of 4D CAD in commercial construction. *Journal of Construction Engineering and Management-Asce*, 126(4), 251-260.
- Koskela, L., Howell, G., Ballard, G., & Tommelein, I. (2002). The foundations of lean construction. *Design and construction: Building in value*, 211-226.
- Laufer, A., & Tucker, R. L. (1987). Is construction project planning really doing its job? A critical examination of focus, role and process. *Construction Management and Economics*, 5(3), 243-266.
- Laufer, A., Tucker, R. L., Shapira, A., & Shenhar, A. J. (1994). The multiplicity concept in construction project planning. *Construction Management and Economics*, 12(1), 53-65.
- Le Meur, E. (2016). *Application de la méthode Chronographique pour la coordination des approvisionnements et du cycle inversé à travers une gestion dynamique des équipements de manutention, des flux de circulation et des zones de stockages pour les chantiers de construction* (École de Technologie Supérieure, Montréal).
- Lennert, L. P. (2012). *Use of 4D BIM for general contractors* (Master Thesis, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark).
- Liston, K., Fischer, M., & Winograd, T. (2003). Focused sharing of information for multidisciplinary decision making by project teams. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 6(6), 69-82.

- Liu, H. X., Al-Hussein, M., & Lu, M. (2015). BIM-based integrated approach for detailed construction scheduling under resource constraints. *Automation in Construction*, 53, 29-43.
- Liu, M., Ballard, G., & Ibbs, W. (2010). Work flow variation and labor productivity: Case study. *Journal of management in engineering*, 27(4), 236-242.
- Lu, M., & Lam, H. C. (2009). Transform Schemes Applied on Non-Finish-to-Start Logical Relationships in Project Network Diagrams. *Journal of Construction Engineering and Management-Asce*, 135(9), 863-873.
- Matthews, O., & Howell, G. A. (2005). Integrated project delivery an example of relational contracting. *Lean construction journal*, 2(1), 46-61.
- Mawdesley, M. J., Al-jibouri, S. H., & Yang, H. B. (2002). Genetic algorithms for construction site layout in project planning. *Journal of Construction Engineering and Management-Asce*, 128(5), 418-426.
- McKinney, K., Kim, J., Fischer, M., & Howard, C. (1996). Interactive 4D-CAD. Dans *Proceedings of the third Congress on Computing in Civil Engineering* (pp. 17-19). ASCE, Anaheim, CA, June.
- Melin, J., & Whiteaker, B. (1983). Fencing a Bar-Chart. *Journal of the Construction Division*, 109, 123-124.
- Miresco, E. T., Beliveau, M., & Gilbert, P. (1987). New Graphical Planning Representation with ICES-Project 1. *AACE Transactions*, A.6.1-A.6.7.
- Newitt, J. S. (2005). *Construction scheduling : principles and practices* (1st éd.). Upper Saddle River, N.J.: Pearson/Prentice Hall.
- Pauwels, P., De Meyer, R., & Van Campenhout, J. (2010). Interoperability for the design and construction industry through semantic web technology. Dans *International Conference on Semantic and Digital Media Technologies* (pp. 143-158). Springer.
- Plotnick, F. (2004). Introduction to modified sequence logic. Dans *Conference Proceedings, PMICOS (first annual) Conference*.
- Ponce de Leon, G. (2008). Graphical Planning method. Dans *PMICOS Annual Conference, Chicago, IL*.
- Prats, G. (2016). *Application de la méthode Chronographique pour la coordination de tâches et des intervenants à travers une gestion dynamique des emplacements de travail pour les projets de construction de bâtiments* (École de Technologie Supérieur, Montréal).

- Riley, D. R., & Sanvido, V. E. (1995). Patterns of Construction-Space Use in Multistory Buildings. *Journal of Construction Engineering and Management-Asce*, 121(4), 464-473.
- Roy, B. (1959). Contribution de la théorie des graphes à l'étude de certains problème linéaires. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'académie des sciences*, 248(17), 2437-2439.
- Roy, B. (1960). Contribution de la theorie des graphes a l'etude des problems d'ordonnancement. Dans *Comptes rendus de la 2ème conférence internationale sur la recherche opérationnelle* (pp. 171-185). Londres: English Universities Press.
- Rush, R. D. (1986). *The building systems integration handbook*. New York: American Institute of Architects. Butterworth-Heinemann.
- Sanders, S. R. (1989). *An analysis of factors affecting labor productivity in masonry construction*.
- Sheppard, L. M. (2004). Virtual building for construction projects. *IEEE Comput Graph Appl*, 24(1), 6-12. Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15384661>
- Song, Y. B., & Chua, D. K. H. (2007). Temporal logic representation schema for intermediate function. *Journal of Construction Engineering and Management-Asce*, 133(4), 277-286.
- Staub-French, S., & Khanzode, A. (2007). 3D and 4D modeling for design and construction coordination: issues and lessons learned. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 12(26), 381-407.
- Su, X., & Cai, H. B. (2014). Life Cycle Approach to Construction Workspace Modeling and Planning. *Journal of construction engineering and management*, 140(7), 1-12.
- Taylor, J., & Levitt, R. (2004). *Bridging the Innovation Gap in Project-based Industries: 2003-2004 CIFE Seed Project Report*. CUFE Technical Report.
- Tulke, J., & Hanff, J. (2007). 4D construction sequence planning—new process and data model. Dans *Proceedings of CIB-W78 24th International Conference on Information Technology in Construction, Maribor, Slovenia* (pp. 79-84).
- Wang, W. C., Weng, S. W., Wang, S. H., & Chen, C. Y. (2014). Integrating building information models with construction process simulations for project scheduling support. *Automation in Construction*, 37, 68-80.
- Weaver, P. (2012). Henry L Gantt, 1861 – 1919 : A retrospective view of his work *Mosaic Project Services Pty Ltd*, 1-17.

- Weber, S. C. (2005). *Scheduling construction projects : principles and practices* (1st éd.). Upper Saddle River, N.J: Pearson Prentice Hall.
- Wiest, J. D. (1981). Precedence diagramming method: Some unusual characteristics and their implications for project managers. *Journal of Operations management*, 1(3), 121-130.
- Willis, E. M. (1986). *Scheduling construction projects*: Taylor & Francis.
- Winch, G. M., & North, S. (2006). Critical space analysis. *Journal of Construction Engineering and Management-Asce*, 132(5), 473-481.
- Wu, I., & Chiu, Y. (2010). 4D Workspace conflict detection and analysis system. Dans *Proceedings of the 10th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality*.
- Zhang, J., Yu, F., Li, D., & Hu, Z. (2014). Development and Implementation of an Industry Foundation Classes-Based Graphic Information Model for Virtual Construction. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 29(1), 60-74.
- Zouein, P. P., & Tommelein, I. D. (2001). Improvement algorithm for limited space scheduling. *Journal of Construction Engineering and Management-Asce*, 127(2), 116-124.

