

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

PROJET D'APPLICATION
PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE
DE GÉNIE DE LA CONSTRUCTION

PAR
Michael LEONARD

LE BIM4D ET LA DÉTÉCTION DES INTERFÉRENCES

MONTRÉAL, LE 23 JUILLET 2012

©Tous droits réservés, Michael Leonard, 2012

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

LE BIM 4D ET LA DÉTECTION D'INTERFÉRENCES

Michael LEONARD

RÉSUMÉ

Les projets de construction deviennent de plus en plus complexes tout en étant sujets à des échéanciers toujours plus serrés et des espaces de travail restreints. Ces conditions favorisent l'apparition d'interférences. Ces derniers constituent un enjeu majeur en construction dans la mesure où un conflit survenant sur chantier risque de déclencher une spirale de problèmes qui peut affecter dramatiquement un projet tant au niveau coût que temps. Il a été estimé que le coût individuel moyen d'un conflit de conception est d'environ 17 000 dollars.

L'émergence du Building Information Modeling (BIM) apporte de nouvelles perspectives en termes de coordination. La possibilité de représenter virtuellement le projet avant sa construction, renforcée par le concept de « modélisation intelligente », permet d'analyser et prévoir les éventuels problèmes avant même qu'ils ne surviennent.

Étant donné que le BIM est un outil relativement récent, constitué d'un amalgame de technologie et de processus, des initiatives sont nécessaires pour faciliter la transition vers ce nouveau paradigme. C'est dans cette optique qu'a été menée cette étude, qui s'est attelée à formaliser le processus de détection d'interférences dans un environnement BIM4D (3D + temps) puis à identifier les aspects pouvant être optimisés. Une méthodologie, articulée autour des paramètres TOP (technologie, organisation, processus), a été développée en vue d'analyser, détecter, gérer et corriger efficacement les interférences en construction. Cette étude a fait ressortir l'importance de considérer la détection d'interférences d'un point de vue global, et non ponctuel, en prenant en compte les phases de pré et post détection. La structure proposée a ensuite été validée et ajustée avec un cas réel.

Mots-clés: Building Information Modeling, 4D, Interférences spatiotemporelles, Coordination

BIM 4D AND CLASH DETECTION

Michael LEONARD

ABSTRACT

At the present time, construction projects become increasingly complex, with tighter schedules and limited workspaces. These conditions tend to create conflictual situations. Conflicts constitute a major concern in construction because an interference occurring on site is likely to generate a spiral of problems with potential losses in terms of cost and time. The average individual cost a change has been estimated at 17 000 dollars.

Building Information Modeling, an emerging technology, aims to reform practices in construction, in particular the aspect of coordination and collaboration between the stakeholders. The ability to model a project virtually before its erection, and the concept of “intelligent design” inherent to this technology, represent steps forward in an attempt to suppress unforeseen problems and conflicts in construction.

Since BIM is a relatively recent tool, constituted by an amalgam of technology and process, initiatives are required to support the transition towards this new paradigm. This study was undertaken with this background problematic, and aimed to formalise the process of clash detection in a BIM 4D (3D+time) environment, and to identify the aspect that could be improved. A methodology considering the TOP parameters (Technology, Organization and Process) has been developed in order to analyze, identify, manage and correct efficiently interferences in construction. This study outlined the approach to consider clash detection from a global viewpoint taking in consideration three phases: pre detection, detection and post detection. The framework was validated and adjusted using a real project.

Mots-clés: Building Information Modeling, 4D, Time and Space Interferences, Coordination

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTERATURE	5
1.1 BIM, introduction	5
1.1.1 Limites des pratiques actuelles en construction.....	5
1.1.2 Le BIM, un nouveau paradigme	7
1.1.2.1 Présentation.....	7
1.1.2.2 Représentation orientée objet et paramétrique.....	7
1.1.2.3 Outil de collaboration	8
1.1.3 Impacts et avantages du BIM.....	10
1.2 LE BIM 4D	11
1.2.1 Limites de la planification de projet traditionnelle	11
1.2.2 BIM 4D	11
1.2.2.1 Visualisation	12
1.2.2.2 Intégration	13
1.2.2.3 Analyse	15
1.3 Les interférences en construction.....	16
1.3.1 Définition	16
1.3.2 Les contraintes spatiales sur un chantier.....	16
1.3.3 Les types de conflits.....	17
1.3.3.1 Les conflits spatio-temporels	17
Les types d'espaces rencontrés pour les activités en construction	17
1.3.3.2 Les conflits statiques et dynamiques :	20
1.4 Impacts des interférences en construction	21
1.4.1 Impacts sur les coûts	21
1.4.2 Impacts sur les délais d'exécution	26
1.5 Outils et méthodes de détection	26
1.5.1 Les approches possibles	26
1.5.1.1 Évolution des techniques	27
1.5.1.2 La détection d'interférences "à la main"	27
1.5.1.3 La détection d'interférences dans un modèle 3D.....	27
1.5.1.4 La détection dans un modèle BIM	28
1.5.2 Principaux outils	28
1.5.2.1 Outils BIM 3D	29
1.5.2.2 Outils BIM 4D	31
1.5.2.3 Outils de détection d'interférences :	32
1.6 Discussion	35
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE	37
2.1 Justification d'une stratégie pour la détection d'interférences	37
2.2 Logique de l'étude	37

2.3	Structure.....	38
CHAPITRE 3 ANALYSE EXPERIMENTALE		39
3.1	Modèle expérimental	39
3.1.1	Objectifs de l'analyse expérimentale	39
3.1.2	Description du projet étudié.....	39
3.2	Réalisation du modèle.....	40
3.2.1	Outils utilisés	40
3.2.2	Processus 3D.....	41
3.2.2.1	Modélisation 3D.....	41
3.2.2.2	Détection de conflits à partir de l'outil de conception.....	42
3.2.2.3	Assemblage des modèles tridimensionnels dans l'outil d'intégration.....	42
3.2.2.4	Détection de conflits lors de la fusion des modèles.....	42
3.2.3	Processus 4D.....	44
3.2.3.1	Montage du modèle 4D.....	44
3.2.3.2	Simulation 4D.....	45
3.2.4	Approches de détection.....	48
3.3	Résultats.....	49
3.3.1	Résultats de l'analyse du modèle.....	49
3.3.1.1	Configuration de l'outil d'intégration.....	50
3.3.1.2	Interférences détectées	50
3.3.2	Problèmes et contraintes relevés.....	52
3.3.2.1	Contraintes liées au projet.....	53
3.3.2.2	Problèmes liés aux aspects 3D/4D.....	53
3.3.2.3	Problèmes liés à la détection d'interférences.....	54
3.3.3	Analyse des flux de travail.....	55
3.4	Discussion.....	56
CHAPITRE 4 PLAN DE DÉTECTION D'INTERFÉRENCES.....		57
4.1	Points saillants du plan de détection d'interférences	57
4.2	Technologie.....	58
4.3	Organisation.....	58
4.4	Processus.....	60
4.4.1	Phase de Pré détection : Modélisation en vue de la détection d'interférences.....	61
4.4.1.1	Conformité au Niveau de détail	61
4.4.1.2	Checklists de modélisation	64
4.4.2	Phase de détection : Identification, tri et gestion des conflits.....	65
4.4.2.1	Classification des conflits	65
4.4.2.2	Gestion et résolution des conflits.....	66
4.4.3	Phase de Post détection : Constitution d'une base de connaissances	68
4.4.3.1	Feedback	68
4.4.3.2	Stockage des tests répétitifs	70
4.4.3.3	Familles d'objets.....	70

4.4.3.4	Enrichir les checklists de modélisation.....	71
4.4.3.5	Conflits non détectés survenus sur chantier.....	71
CHAPITRE 5 VALIDATION		72
5.1	Objectifs.....	72
5.2	Cas étudié.....	72
5.2.1	Description du projet.....	72
5.2.2	Contexte du projet.....	73
5.2.3	Processus de modélisation	75
5.2.3.1	Modèles 3D.....	76
5.2.3.2	Modèle 4D	77
5.3	Processus de détection	77
5.3.1	Approche de détection	77
5.3.2	Résultats.....	78
5.4	Problèmes et contraintes rencontrés.....	78
5.5	Ajustements du Plan de détection.....	80
5.6	Discussion	81
CONCLUSION.....		82
RECOMMANDATIONS		85
ANNEXE I PROCESSUS GÉNÉRIQUES		87
ANNEXE II CHECKLISTS		91
ANNEXE III LA DÉTECTION D'INTERFÉRENCES DANS DIFFÉRENTS MODES DE RÉALISATION		93
ANNEXE IV PROGRESSION DU NIVEAU DE DÉTAIL POUR CHAQUE COMPOSANTE DU BÂTIMENT		97
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		102

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Récapitulatif des conflits en construction	21
Tableau 1.3 Caractéristiques des conflits identifiés en MEP, tiré de Riley, Varadan et al. (2005).....	24
Tableau 1.4 Outils de modélisation 3D.....	30
Tableau 1.5 Outils de modélisation 4D.....	31
Tableau 1.6 Outils de détection d'interférences	33
Tableau 3.1 Approches de détection selon les types de problèmes dans un modèle 4D	48
Tableau 3.2 Sommaire des problèmes identifiés	49
Tableau 3.3 Volume de conflits dans le modèle	51
Tableau 4.1 Description des niveaux de Détails de Bedrick (2008) et American Institute of Architects (2008)	Tiré 63
Tableau-A II-1 Extrait de checklist de vérification	91
Tableau-A IV-1 Spécification des niveaux de détail , tiré de American Institute of Architects (2008).....	97

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Index de productivité de la main d'œuvre dans l'industrie	6
Figure 1.2 Le BIM, une plate-forme de collaboration	10
Figure 1.3 Définition d'un modèle 4D	12
Figure 1.4 Coordination BIM	14
Figure 1.5 Exemple de conflit spatiotemporel, tiré de Wu and Chiu (2010).....	19
Figure 1.6 Collision détectée par Archicad 14.....	21
Figure 1.7 Cout total des conflits en fonction du mode de réalisation	23
Figure 1.8 Courbe illustrant le cout des changements	25
Figure 1.9 Catégories d'outils utilisés dans un processus 4D	29
Figure 3.1 Perspective du projet expérimental	40
Figure 3.2 Simulation 4D du modèle expérimental	45
Figure 3.3 Collision entre un mur porteur et un conduit.....	52
Figure 4.1 Composantes du plan de détection d'interférences.....	57
Figure 4.2 Responsabilités et Relations entre les différents intervenants.....	59
Figure 4.3 Étapes identifiées pour réaliser efficacement une détection d'interférences sur un modèle 4D	60
Figure 4.4 Addition d'un nouveau paramètre dans Revit.....	69
Figure 4.5 Base de connaissances rajoutée au projet.....	70
Figure 5.1 Perspective du projet	73
Figure 5.2 Système Upbrella.....	74
Figure 5.3 Modèles structure et architecture du projet Upbrella	76
Figure-A I.1 Phases de modélisation	89

Figure-A I.2 Processus de détection90

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

2D	Deux Dimensions
3D	Trois Dimensions
4D	Quatre Dimensions
AEC	Architecture Engineering Construction
AIA	American Institute of Architects
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CIFE	Center for Integrated Facility Engineering
BIM	Building Information Modeling
ETS	École de Technologie Supérieure
GSA	General Services Administration
GRIDD	Laboratoire de Recherche en Intégration et Développement Durable en Environnement Bâti
IFC	Industry Foundation Classes
IPD	Integrated Project Delivery
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
LOD	Level Of Detail (Niveau de détail)
MEP	Mécanique Électricité Plomberie
NBIMS	National BIM Standards
PME	Petites et Moyennes Entreprises

INTRODUCTION

Malgré les progrès techniques et technologiques, l'industrie de la construction telle qu'elle est aujourd'hui s'appuie sur des pratiques de travail qui ont faiblement évoluées depuis près de deux siècles (Little 2012). Parmi ces pratiques obsolètes figurent l'utilisation massive de documents papiers pour générer et échanger de l'information, qui est pourtant source d'erreurs et d'omissions ; et le manque de coordination et de communication entre les différents acteurs impliqués dans un projet de construction. De nombreuses études (Gallaher, O'Connor et al. 2004; Teicholz 2004) ont conclu que des mauvaises performances en matière de productivité et les effets néfastes sur coûts et les délais d'exécution sont occasionnées par ces pratiques. Les raisons évoquées sont, entre autres, le manque de vecteurs de collaboration et de systèmes d'information performants.

Pour pallier à ces lacunes, de nouvelles approches ont été développées aussi bien du côté des modes de réalisation des projets, que des technologies employées pour supporter leur cycle de vie. D'une manière générale ces nouvelles technologies visent à créer des plates-formes permettant aux différents intervenants d'un même projet de travailler étroitement et de façon intégrée. Le développement d'internet dans les années 2000 a par exemple favorisé l'émergence des portails web spécialisés en construction qui constituent des plates-formes collaboratives en ligne pour le partage d'informations (documents, fichiers, etc.). Un autre outil s'est basé sur l'intégration et la synergie de systèmes autour d'un modèle virtuel, le Building Information Model. Bien que le concept de ce dernier ne soit pas nouveau, puisqu'il existe depuis près de trois décennies, c'est encore une technologie méconnue au Québec qui tend à s'installer lentement mais sûrement dans le paysage de la construction.

Les conflits spatiotemporels sur chantier constituent l'un des principaux problèmes rencontrés sur un projet de construction. Des dépassements de coûts, des baisses de productivité et de qualité et des retards importants peuvent être occasionnés par les ordres de changement qui découlent de ces conflits qui peuvent ultimement déboucher sur des litiges entre les partis. La meilleure stratégie à adopter serait d'attaquer le problème à la source en

évitant que des conflits ne surviennent pendant la construction. La détection des interférences et leur correction dès les phases de conception constitue par conséquent un point clé au sein de projets de construction toujours plus complexes et impliquant des intervenants issus de corps de métiers multidisciplinaires. Une attente pour des outils plus performants capables de résoudre ce problème est palpable. A l'heure actuelle, de nombreux outils BIM offrent de telles fonctionnalités avancées de détection d'interférences. Néanmoins, en raison du fait que le BIM est une technologie relativement récente, les pratiques et les processus qui y sont associés, qui diffèrent de ceux de la CAO 2D traditionnelle, demeurent encore méconnus des professionnels de la construction

L'objectif de ce projet d'application est de proposer un plan pour l'analyse, la détection et la correction des interférences dans un environnement 4D c'est-à-dire combinant l'aspect géométrique (3D) et l'aspect temporel.

Ce mémoire est subdivisé en quatre parties. Dans le premier chapitre une revue de littérature est menée afin d'asseoir une base de connaissances pour mener à bien l'étude. Les thèmes du BIM 3D et 4D sont développés en mettant l'emphase sur l'innovation que ces technologies constituent et sur les avantages qu'elles apportent pour améliorer les manières de travailler en construction. Les interférences en construction sont également développées en profondeur afin de comprendre leur taxonomie, leur impact sur un projet et les méthodes utilisées pour les corriger. Dans le deuxième chapitre, la méthodologie de travail retenue pour conduire cette étude est exposée. Dans le troisième chapitre, il sera question d'une présentation du modèle 4D expérimental réalisé dans le cadre de l'approche empirique adoptée. Cette phase d'expérimentation a consisté à jauger les outils de modélisation 3D et 4D que sont Revit et Navisworks et à assimiler le workflow autour de leur détection d'interférences. Les résultats collectés suite à l'analyse de la maquette 4D sont exposés. Le quatrième chapitre est consacré au développement de la méthodologie pour la détection d'interférences qui, afin de traiter la problématique de façon systématique, aborde les aspects Technologique, Organisationnel et Procédural. Enfin, le dernier chapitre présente une validation du plan

proposé sur un projet pilote. Cette phase est nécessaire pour calibrer les résultats de l'étude à la réalité et aux contraintes de l'environnement en construction.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTERATURE

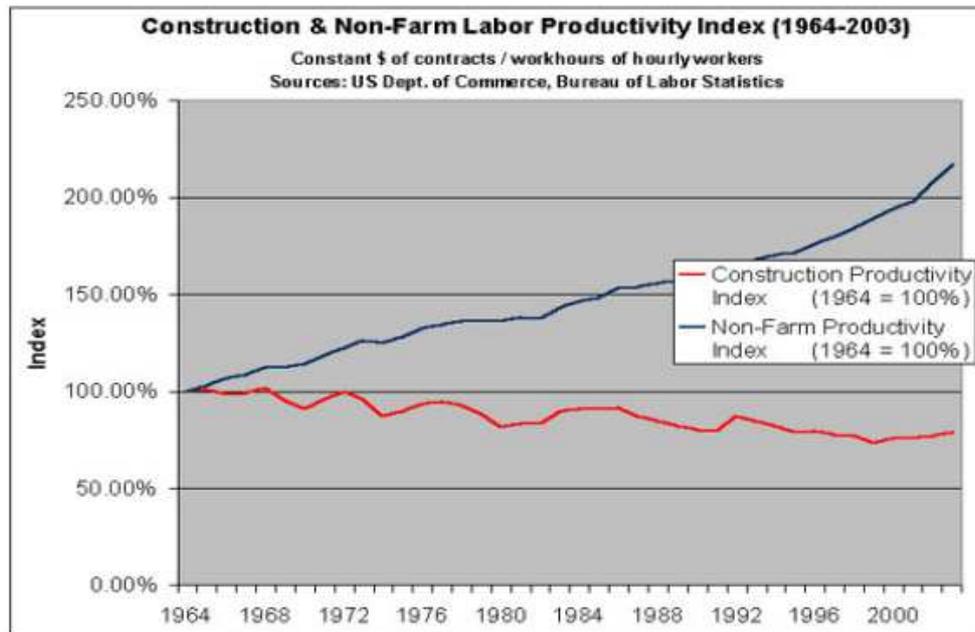
Cette revue de littérature a été entreprise pour acquérir les bases théoriques nécessaires. Cette revue s'est articulée autour de deux axes : 1) dresser les avantages et les enjeux actuels liés au BIM, 3D et 4D. 2) identifier les différents types d'interférences, leurs impacts sur un projet et les approches actuelles pour les détecter.

1.1 BIM, introduction

1.1.1 Limites des pratiques actuelles en construction

La construction connaît actuellement d'importants problèmes d'inefficacité en raison des pratiques à l'œuvre dans cette industrie. Une recherche menée par la Center for Integrated Facility Engineering (CIFE) de Stanford, dont les résultats sont présentés sur la courbe de la Figure 1.1, illustre comment la productivité dans la construction aux États-Unis a chuté de 10% au cours des quarante dernières années, alors qu'elle a plus que doublé dans d'autres secteurs. Les auteurs expliquent ce manque de performance par le retard qu'accuse l'industrie de la construction par rapport aux industries manufacturières en matière d'automatisation, d'utilisation de systèmes d'informations, de logistique et d'outils de collaboration.

Taylor and Levitt (2004) expliquent que la lenteur de l'industrie de la construction à adopter de nouvelles pratiques vient en partie de la nature unique des projets. Un bâtiment n'est en effet érigé qu'une fois et peut être assimilé à un prototype. Alors que dans l'industrie manufacturière une fois le processus en place, plusieurs produits peuvent être obtenus avec une efficacité accrue.



**Figure 1.1 Index de productivité de la main d'œuvre dans l'industrie
De la construction américaine entre 1964 et 2003
Tiré de Teicholz (2004)**

Bien que les outils informatiques soient largement répandus dans la construction, la variété des formats utilisés par les différents intervenants provoque souvent de la duplication de tâche lorsqu'un document passe d'un système à un autre. Pourtant, la re-saisie d'une information est d'une part une perte au niveau temps et d'autre part peut provoquer des erreurs. La National Institute of Standards and Technology (NIST) a estimé qu'en 2004 l'industrie américaine perdait 15,8 milliards de dollars par an en raison du manque d'interopérabilité entre les plateformes logicielles utilisées durant les phases de conception et de réalisation (Gallaher, O'Connor et al. 2004). Ces pertes abyssales étaient expliquées par le manque de standardisation dans la documentation, par la dispersion des technologies adoptés par les différents partis, une gestion des Demandes d'Informations inefficace, la re-saisie manuelle des données et par l'utilisation de documents papiers pour la création et l'échange d'information.

Au cours du cycle de vie d'un projet de construction, une importante quantité d'informations est générée. Lorsque cette information n'est pas centralisée et adéquatement gérée, le volume de documents est tel qu'il est souvent source d'erreurs et d'omissions.

Vers des approches plus intégrées

Des changements progressifs s'opèrent dans la manière dont les projets sont réalisés. Consciente de ses lacunes, l'industrie de la construction tend de plus en plus à changer ses anciennes pratiques au profit d'approches plus intégrées. On voit ainsi des changements au niveau des modes de réalisation des projets qui s'éloignent du mode traditionnel (conception-soumission-réalisation) vers des modes plus innovants comme le "clé-en-main" (design-build), qui offrent des opportunités de conception et de réalisation plus intégrées (Kunz and Fischer 2005; Sabole 2007; Dossick, Neff et al. 2009; Eastman, Teicholz et al. 2011). On assiste également au recours à de nouvelles technologies destinées à offrir une plate-forme de collaboration dès les premières phases d'un projet (CRC 2009; National Research Council of Canada 2011).

1.1.2 Le BIM, un nouveau paradigme

1.1.2.1 Présentation

Le Building Information Modeling est le processus de génération d'un modèle virtuel d'un bâtiment: le Building Information Model. Un modèle BIM est une représentation tridimensionnelle avec des bases de données associées.

1.1.2.2 Représentation orientée objet et paramétrique

L'attribut principal du BIM est d'organiser l'information d'une manière structurée : elle est définie, organisée et échangeable.

La CAO traditionnelle (2D et 3D) définit les objets uniquement d'un point de vue géométrique c'est-à-dire en utilisant des lignes, des surfaces ou des volumes. Le BIM génère une base de données orientée objet c'est-à-dire constituée d'objets intelligents capables d'emmagasiner des informations à la fois quantitatives et qualitatives sur le projet. Ainsi, une fenêtre dans un modèle BIM, au lieu d'être une simple collection de lignes, devient un objet intelligent contenant des informations sur les coûts, le fournisseur,...

Le BIM représente également les objets de façon paramétrique. Cette représentation est la base de toutes les composantes, également appelées familles, conçues dans un modèle BIM. Les applications BIM ont préalablement prédéfinies une gamme de familles d'objets pour les utilisateurs, gamme qui peut être enrichi et modifié (Eastman, Teicholz et al. 2011). Une famille d'objet permet la création de n'importe quelle instance d'objet, avec des formes qui dépendent des paramètres et des relations avec les autres objets.

Par ailleurs, le BIM cherche à faciliter la gestion de l'information. La structure autour d'une base de donnée permet aux objets de se mettre automatiquement à jour selon les changements apportés par l'utilisateur. Par exemple, si un mur est supprimé dans le modèle, toutes les ouvertures éventuellement rattachées (fenêtres, portes) seront également supprimées et les modifications par rapport à l'échéancier et aux coûts seront apportées instantanément et automatiquement.

1.1.2.3 Outil de collaboration

Pratique intégrée

D'après Elvin (2007) la pratique intégrée est une approche holistique de la construction dans laquelle tous les participants d'un projet travaillent de concert dans un environnement hautement collaboratif à travers tout le cycle de vie de l'édifice afin de réaliser des projets fluides et efficaces. Des architectes, ingénieurs, constructeurs et clients travaillant de façon intégrée collaborent dès les premières phases du projet. Ils

partagent non seulement une vision et un but en commun mais également le plan pour y parvenir.

Le BIM occupe une place primordiale dans un tel processus en permettant à l'équipe de projet de créer et partager de l'information via une seule et unique représentation, comme illustrée sur la Figure 1.2.

Interopérabilité

De nombreux outils informatiques sont utilisés au cours du cycle de vie d'un bâtiment, pour sa conception, sa réalisation ou son exploitation. Toutes ces applications ne peuvent toutefois pas communiquer entre elles en raison de la diversité de formats existants. Les approches traditionnelles pour échanger de l'information via des formats d'échange tels que .dxf, .dwf, .dwg et .pdf ne véhiculent par les niveaux appropriés de renseignements entre les modèles.

L'interopérabilité désigne la possibilité d'échanger des informations entre des applications multiples, permettant à des spécialités différentes de travailler de concert sur un même projet. L'interopérabilité élimine le besoin de répliquer la saisie d'information qui a déjà été générée, en plus de faciliter la circulation des flux d'information et l'automatisation (Eastman, Teicholz et al. 2011).

C'est pour remplacer le système d'information fragmenté existant en construction en une solution interopérable autour d'un modèle de donnée commun que le format IFC (Industry Foundation Classes) a été créé. Ce standard public est né de l'initiative du buildingSMART (anciennement International Alliance for Interoperability) qui en a publié la première version en 1997. L'IFC utilise le format texte, le seul véritable format informatique universel. Bien que les outils BIM soient capables de générer des représentations riches de composantes d'un bâtiment, l'IFC utilise un langage simple pour transférer cette information entre les différentes applications.



Figure 1.2 Le BIM, une plate-forme de collaboration
Tiré de Brochure Autodesk Revit (2010)

1.1.3 Impacts et avantages du BIM

D'après les statistiques du Center For Integrated Facilities Engineering (CIFE) de Sandford (cité dans l'étude de Fischer (2007) concernant l'Opéra de Sydney), les principaux avantages du BIM consistent en:

- **Une meilleure coordination** : À la différence des dessins 2D, BIM analyse, détecte et rapporte les interférences. Les économies peuvent représenter jusqu'à 10% de la valeur du projet grâce à la détection d'interférences;
- **Une baisse des RFI et Ordres de changement** : Jusqu'à 40% de suppression de changements imprévus;
- **Des projets plus harmonieux et plus fluides** : des gains jusqu'à 7% sur le temps de réalisation du projet peuvent être atteints.

- **Contrôle des coûts** : La précision au niveau de l'estimation des coûts est de 3%, comparativement aux méthodes traditionnelles.

1.2 LE BIM 4D

1.2.1 Limites de la planification de projet traditionnelle

Les Réseaux CPM (diagrammes de Gantt) sont une représentation graphique et abstraite d'une séquence de construction. Largement utilisés par des logiciels comme MS Project, Primavera ils ont pendant longtemps été l'outil de référence pour la planification de projet. D'après Koo and Fischer (1998), ils ont cependant leurs limites en ce sens qu'ils ne facilitent pas la visualisation de l'échéancier. Les lecteurs doivent essayer de conceptualiser la séquence de construction en associant les dessins en 2D et les activités dans le calendrier de travaux. Kymmell (2008) rajoute qu'en comparaison avec la quantité d'information nécessaire pour son élaboration, l'échéancier final ne reflète pas la logique et le raisonnement qui ont conduit à son élaboration. Cette lacune au niveau de la visualisation et de l'interprétation, freine la communication et la collaboration entre les partis impliqués dans le projet. Ainsi, les problèmes potentiels ne sont pas facilement identifiables à la phase de planification et les changements au niveau de l'échéancier en cours de construction sont monnaies courantes.

Les derniers développements en matière d'outils de modélisation permettent d'entrevoir de nouvelles approches en matière de planification de projet.

1.2.2 BIM 4D

Le BIM 4D est le fruit de la liaison d'un Building Information Model en trois dimensions (3D) avec la quatrième dimension qui est le temps. Ce modèle 4D représente une maquette numérique du projet en plus d'incorporer les informations contenues dans un échéancier de projet.

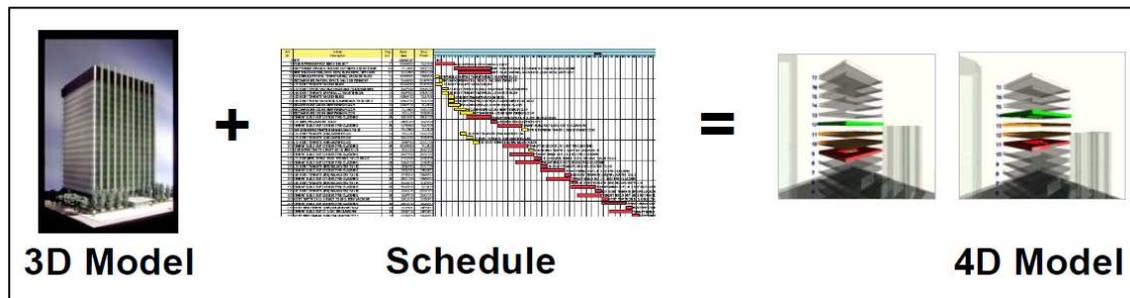


Figure 1.3 Définition d'un modèle 4D

Tiré de GSA, 4D phasing guide

Selon Koo and Fischer (1998) , la CAO 4D est un outil :

- De visualisation
- D'intégration
- D'analyse

1.2.2.1 Visualisation

La CAO 4D permet de visualiser la réalisation des composantes du modèle 3D étape par étape en fonction du temps. Selon Collier and Fischer (1995) cette visualisation évite aux différents partis toute mauvaise interprétation du calendrier et minimise par conséquent les problèmes de connexion. En se basant sur le même modèle 4D, les intervenants peuvent mieux comprendre la logique derrière l'échéancier. Une meilleure perception de l'échéancier permet de déceler les problèmes pouvant survenir et de cibler les contradictions dans la logique des activités (Hastings, Kibiloski et al. 2003).

De tels problèmes peuvent également être mis en évidence durant la conception du modèle 4D. En effet, le concepteur doit solutionner les problèmes non résolus ou non détectés dans l'échéancier.

Parmi l'une des plus importantes tâches des planificateurs figure la détermination de la séquence d'activités à adopter afin d'allouer le plus efficacement les ressources et d'utiliser de manière optimale l'espace disponible, souvent restreint. D'après Eastman, Teicholz et al. (2011), en plus de véhiculer visuellement la dépendance temporelle entre

les activités, le modèle 4D montre les contraintes spatiales qui existent sur le chantier et sur le bâtiment. C'est une caractéristique importante d'un modèle 4D dans la mesure où elle permet de détecter les conflits espace-temps. Les outils de planification traditionnels ne montrent pas de tels conflits entre les activités. Bien qu'ils explicitent les dépendances temporelles, Akinci, Staub et al. (1997) notent que les interférences qui peuvent se produire entre deux activités partageant un même espace ne sont pas représentés et ne peuvent être détectés. Si ces conflits ne sont pas détectés durant la planification, il en résulte souvent un échéancier trop optimiste et des dépassements de coûts en raison d'estimations irréalistes.

Les changements sont inévitables en construction. Une fois qu'un changement a été décidé, il doit être incorporé dans l'échéancier. À cet effet, les échéanciers sont périodiquement mis à jour. En raison de la nature séquentielle de la construction, un retard dû à changement dans une activité entrainera des retards dans les activités subséquentes. Grâce à un modèle 4D le planificateur peut immédiatement déterminer les répercussions d'un changement en montrant les activités et les composantes affectées.

1.2.2.2 Intégration

L'un des principaux freins à la collaboration pendant la conception et la réalisation d'un projet provient du processus traditionnel de construction et des vecteurs à travers lesquels l'information est échangée. Le secteur du bâtiment s'appuie massivement sur la sous-traitance à des entrepreneurs spécialisés. Ainsi, la qualité de la communication entre les multiples participants impliqués est critique pour le succès d'un projet. La réalité est pourtant toute autre car le processus est séquentiel et fragmenté.

Il y a un manque de standardisation et de cohérence dans l'information utilisée par le concepteur et le constructeur. Des professionnels de disciplines distinctes vont interpréter les dessins 2D différemment et ainsi ne remarqueront pas nécessairement les incohérences (Eastman, Teicholz et al. 2011).

Les modèles 4D peuvent être utilisés comme outils pour échapper aux limitations des dessins 2D en intégrant l'information dans une plate-forme unique. Le concepteur et le

constructeur peuvent tous les deux travailler sur les mêmes modèles en visualisant le modèle 4D, ce qui élimine l'usage de dessins séparés. En effet, l'information relative à la géométrie et à l'échéancier est véhiculée à travers un même support.

D'après Luiten and Fischer (1995), les modèles 4D sont particulièrement utiles pour fournir une rétroaction sur la conception du bâtiment à partir de la construction. Si le modèle 4D est réalisé dans les premières phases de planification du projet, le planificateur peut étudier les scénarios possibles par rapport aux méthodes de construction les plus efficaces d'un point de vue coût et temps. D'un autre côté, il peut faire une rétroaction sur la conception en réalisant des études de faisabilité et déterminer quelle conception est la plus appropriée à la méthode de construction retenue.

En créant un modèle 4D, les constructeurs peuvent évaluer et vérifier l'échéancier, mais aussi détecter les restrictions de conception qui obligeraient l'échéancier à être séquencé d'une autre manière. Ainsi, le modèle 4D peut être utilisé comme outil de collaboration pour accroître la construction entre les entités de conception et de construction.



Figure 1.4 Coordination BIM

Tiré de Pepper Construction

1.2.2.3 Analyse

La détection de conflits spatio-temporels potentiels dans l'échéancier permet au planificateur de développer un échéancier réaliste. L'analyse peut mettre en évidence les congestions d'espaces de travail qui peuvent affecter la productivité des travailleurs. L'anticipation et la prévention de tels conflits peuvent minimiser des coûts pouvant être élevés durant la réalisation (Wu and Chiu 2010).

Les risques liés à la sécurité sur un chantier figurent parmi les principales causes de coûts additionnels non anticipés. En effet, la faible marge de profit avec laquelle l'entrepreneur travaille peut rapidement diminuer avec un seul accident sur site (Eastman, Teicholz et al. 2011).

Bien que de nombreuses compagnies aient des programmes de prévention pour protéger leurs travailleurs, il peut être difficile pour les gestionnaires de projet d'anticiper toutes les aires dangereuses sur le chantier. Cela est dû au fait que les projets de construction sont uniques par nature et que les accidents se produisent principalement à cause d'erreurs humaines. En visualisant le modèle 4D, les gestionnaires de projet peuvent détecter les aires où les accidents sont susceptibles de survenir et mettre en œuvre des mesures de préventions (signalisations, etc.). Mais surtout pour observer l'instant et la localisation des travailleurs à travers le modèle 4D, les gestionnaires de projet peuvent analyser comment des équipes séparées peuvent s'affecter les unes et les autres et ainsi créer des situations dangereuses. Une fois ces problèmes identifiés, des modifications peuvent être apportées sur l'échéancier en réorganisant les activités concourantes.

L'une des restrictions auxquelles les constructeurs doivent faire face lors de l'allocation de ressources et d'équipements est la disponibilité d'espaces de travail. La plupart de ces derniers sont occupés par de larges équipements, des matériaux, etc. qui peuvent encombrer le chantier et limiter la manœuvrabilité des équipements et des équipes.

La gestion d'espaces de travail devient critique pour des projets en zone urbaine. Dans certains de ces projets, les gestionnaires ne peuvent travailler que sur l'espace que le bâtiment occupera (National Research Council of Canada 2011) . Le BIM 4D peut être utilisé pour gérer ces espaces en incorporant dans le modèle de l'information concernant les structures temporaires, les aires d'assemblages, les routes d'accès, les lieux de stockages de matériels ou d'équipements. Les gestionnaires peuvent voir quand et où l'espace sera disponible et occupé, et administrer le chantier en conséquence.

1.3 Les interférences en construction

1.3.1 Définition

D'après Pena-Mora, Tamaki et al. (2007), un conflit peut être défini comme toute action ou circonstance résultant de besoins incompatibles ou opposés. Une interférence affecte négativement le projet d'un point de vue coût et temps.

La gestion des conflits occupe une place primordiale dans un projet de construction. Pena-Mora, Tamaki et al. (2007) rajoutent qu'il existe une spirale de conflit qui fait qu'un conflit peut potentiellement muer en un plus grand conflit, qui conduira ensuite à des disputes si les partis ne peuvent résoudre le conflit suffisamment tôt.

1.3.2 Les contraintes spatiales sur un chantier

Des projets de construction devenant toujours plus complexes, couplés à un espace souvent limité, engendrent plusieurs problèmes :

- Des composantes de bâtiment condensées dans des espaces restreints : exigent que des efforts doivent être menés au niveau de la coordination entre les partis pour éviter que les différentes composantes interfèrent entre elles;
- La nécessité d'une planification minutieuse : les gestionnaires de projet doivent méticuleusement planifier la séquence d'opération pour s'assurer que les activités se déroulent sans encombre. Sujets à une pression grandissante pour des échéanciers toujours plus serrés, les entrepreneurs généraux doivent augmenter la quantité de travail par unité de temps, en augmentant les ressources utilisées par

les activités et en réalisant plus d'activités en parallèle (Akinci, Fischer et al. 2000). Ces deux stratégies augmentent la demande d'espace par unité de temps. Avec de nombreux équipements et composantes mobiles et l'espace restreint sur de nombreux chantiers, il en résulte des conflits spatio-temporels.

La possibilité d'anticiper et de prévoir ces problèmes avant qu'ils ne surviennent est essentielle pour une gestion de projet efficace.

1.3.3 Les types de conflits

D'après la revue de littérature, les conflits en construction peuvent être rangés en deux catégories :

- **Les conflits spatiotemporels** : qui risquent survenir durant la réalisation du projet, ce sont les conflits du point de vue de la gestion de projet, qui concernent davantage les espaces de travail;
- **Les conflits statiques et dynamiques** : identifiés suite à l'analyse d'un modèle virtuel, qui sont les conflits du point de vue de la CAO et qui concernent davantage les composantes du bâtiment.

1.3.3.1 Les conflits spatio-temporels

Les conflits spatiotemporels ont une dimension temporelle qui implique qu'ils ne surviendront qu'à un moment donné. Pour bien cerner les conflits spatio-temporels, il est nécessaire de définir préalablement les différents types d'espaces rencontrés en construction

Les types d'espaces rencontrés pour les activités en construction

Selon la classification de Akinci, Fischer et al. (2000) les six types d'espaces utilisés pour des activités en construction sont les suivants:

- Espace de composante du bâtiment: l'espace physique occupé par la composante du bâtiment devant être installée ;

- Espace pour structures temporaires: l'espace physique occupé par une structure temporaire (coffrages, échafaudages...);
- Espace d'équipement: l'espace occupé par un équipement supportant les équipes ou une composante durant son installation ;
- Espace de travail: l'espace occupé par les équipes devant installer les composantes ;
- Espace à risque: l'espace généré par une activité créant une situation dangereuse telle que des chutes d'objets, des étincelles, etc.
- Espace protégé: l'espace requis par une composante pour la protéger d'éventuels dommages pour une période de temps donnée.

Ce sont les interférences entre ces différents espaces qui créeront ensuite des conflits. D'après la littérature, les conflits spatiotemporels rencontrés durant un projet de construction peuvent être rangés en 5 catégories (Akinici, Fischer et al. 2000; Wu and Chiu 2010).

Conflit de conception

Survient lorsqu'une composante du bâtiment interfère avec une autre composante de bâtiment. Ce sont donc des conflits qui ne dépendent pas de la réalisation mais plutôt de la conception. D'après la hiérarchie des conflits proposée par Akinici, Fischer et al. (2000), ce type de conflit est classé comme étant le plus important.

Risque de sécurité

Survient lorsqu'un espace à risque généré par une activité interfère avec un espace de travail requis par une autre activité.

Conflit de dommages

Survient lorsqu'un espace de travail, un espace d'équipement, un espace à risque entre en conflit avec un espace protégé requis par une autre activité. Par exemple, un espace

protégé est nécessaire autour de la composante durant la cure du béton ou le séchage de la peinture. Par conséquent, lorsqu'une équipe ou un équipement est assigné au même secteur où l'espace protégé est nécessaire, cela peut endommager la composante à protéger.

Congestion

Survient lorsqu'un espace de travail, ou un espace d'équipement requis par une activité interfère avec un espace pour structure temporaire ou un espace de composante du bâtiment requis par une autre activité. Différents niveaux de congestion peuvent être rencontrés: mineure (crée une perte de productivité minimale sur le chantier, où les deux activités en conflits peuvent être réalisées), moyenne (perte de productivité significative), sévère (problème de constructibilité, aucune des activités en conflit ne peuvent être réalisées).

La Figure 1.5 illustre un exemple de conflit spatiotemporel survenant entre une composante de bâtiment (en bleu) et un équipement mobile (en rose) et la zone de conflit qui en résulte.

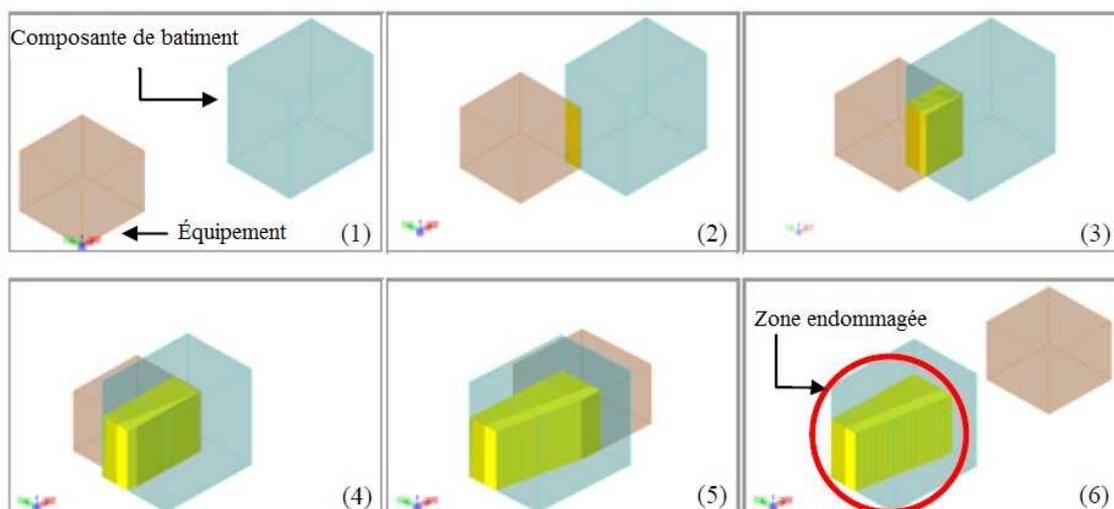


Figure 1.5 Exemple de conflit spatiotemporel, tiré de Wu and Chiu (2010)

D'après, Staub and Fischer (1998), les exigences pour identifier les conflits espace-temps sont:

- Information spatiale : localisation de la composante;
- Information temporelle : date de début et date de fin de l'activité ainsi que sa durée ;
- Information relationnelle : l'information logique incluant les activités prédécesseurs et successeurs, les relations entre les activités et les objets 3D, et les attributs géométriques.

1.3.3.2 Les conflits statiques et dynamiques :

Du point de vue de la CAO, c'est-à-dire des outils de conception et de modélisation, on distingue les conflits statiques et les conflits dynamiques (Akinci, Fischer et al. 2000; Wu and Chiu 2010).

- Les conflits statiques sont ceux identifiés lors de l'analyse d'une maquette virtuelle 3D. Ils correspondent à des interférences entre deux composantes statiques du bâtiment (ex. colonne/conduite).
- Les conflits dynamiques sont ceux identifiés lors de l'analyse d'un modèle 4D, qui réfèrent à des conflits survenant à un certain moment durant la construction. Ils correspondent à une interférence entre une composante statique et une composante dynamique (ex. mur/équipement) ou entre deux composantes dynamiques.

Ces conflits statiques et dynamiques comprennent les sous-catégories suivantes :

- **Conflit Dur (Hard Clash) :** Lorsqu'il y a collision entre deux objets qui occupent le même espace, par exemple une poutre placée par l'ingénieur en structure se trouve sur le chemin que devrait emprunter les unités de conditionnement d'air de l'ingénieur MEP. La **Figure 1.6** montre le cas d'un conduit entrant en collision avec un mur
- **Jeu (Soft clash) :** Survient lorsque deux objets sont trop proches l'un de l'autre et que l'espace est insuffisant pour l'accès, l'isolation, la sécurité, la maintenance, etc.

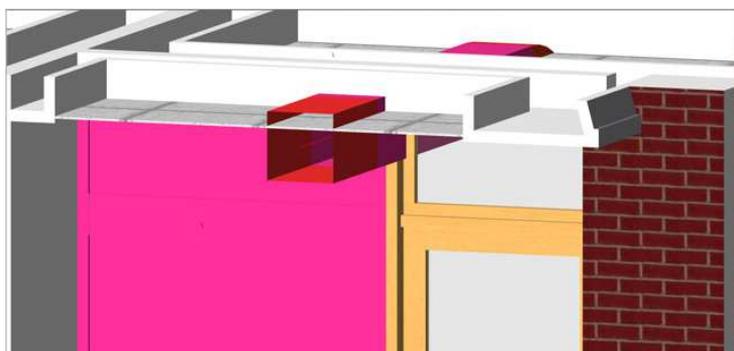


Figure 1.6 Collision détectée par Archicad 14
Tiré de aecmag (2010)

Les conflits présentés précédemment peuvent être catégorisés selon le Tableau 1.1
Récapitulatif des conflits en construction

Tableau 1.1 Récapitulatif des conflits en construction

Conflits		
Conflits du point de vue de la CAO		Conflits du point de vue de la Gestion de projet (conflits spatio-temporels)
Conflits statiques	Conflits dynamiques	
<ul style="list-style-type: none"> • Conflit Dur • Jeu 		<ul style="list-style-type: none"> • Conflit de conception • Risque de sécurité • Dommage • Risque de congestion

1.4 Impacts des interférences en construction

1.4.1 Impacts sur les coûts

Évaluer le coût d'une interférence peut s'avérer complexe en raison des multiples paramètres qui entrent en jeu tels que le coût de la main d'œuvre, la perte économique engendrée par le retard, le coût de la correction, l'impact sur les tâches subséquentes, etc. La quantité importante de conflits survenant durant un projet de construction, qui peut

atteindre des centaines voire des milliers, rend la tâche d'estimer les interférences au cas par cas encore plus fastidieuse. Peu de données évaluant les conséquences économiques des interférences dans le contexte canadien sont disponibles. La quasi-totalité des chiffres recueillis émanent de sources américaines.

Rapporté par vicosoftware (2010), Dan Gonzales, BIM manager chez *Swinerton Builders* a relevé que sur 10 projets majeurs, le coût moyen pour un ordre de changement était de 17 000 \$. Les coûts des conflits ont été mesurés en fonction du nombre total d'ordres de changements reportés sur chantier. Sur un de ses projets, il a identifié plus de 450 ordres de changement qui ont pu être évité à travers le processus de coordination, ce qui représentait plus de 6.7 millions de dollars d'économies pour le client.

De leur côté, Riley and Horman (2001) ont analysés les données de 14 projets de tailles et d'envergures similaires afin de dégager un intervalle de coût pour les conflits. Le coût individuel des conflits variait entre 1 500 et 60 000 \$. La Figure 1.7 montre le coût total des conflits reportés sur plusieurs projets en fonction du mode de réalisation. On veut dégager ici l'impact du degré d'implication des acteurs (plus particulièrement de l'Entrepreneur Général) pendant la phase pré construction.

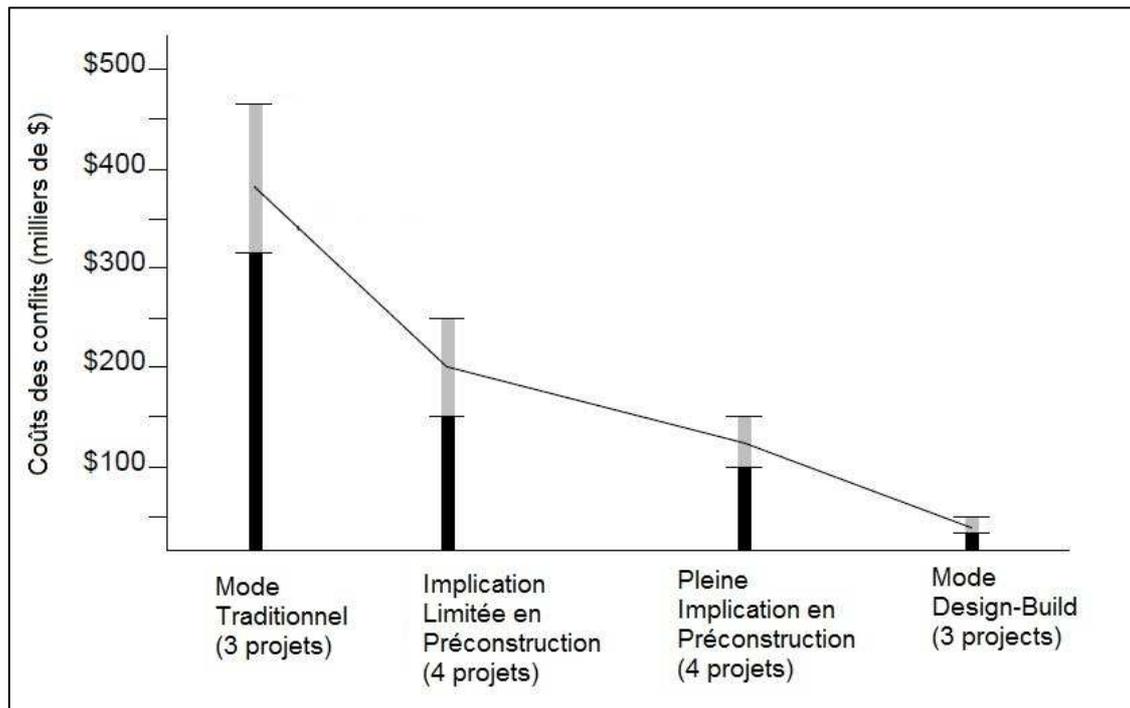


Figure 1.7 Cout total des conflits en fonction du mode de réalisation

Tiré de Riley and Horman (2001)

Cette étude réalisée par Riley and Horman (2001) met en évidence la relation entre le niveau de coordination et la baisse des conflits reportés sur chantier. Le montant total des ordres de changements pour un projet réalisé dans le mode traditionnel (faible coordination) se chiffrait à 450 000 dollars contre 50 000 dollars pour un projet réalisé en Design – Build (étroite coordination).

Riley, Varadan et al. (2005) ont compilé les données collectées sur plusieurs projets de MEP (Mécanique, Électricité, Plomberie) afin de quantifier et classifier les conflits dus aux problèmes de coordination entre les équipes:

Tableau 1.2 Caractéristiques des conflits identifiés en MEP, tiré de Riley, Varadan et al. (2005)

	Type 1	Type 2	Type 3
Moment de la détection	Déecté et résolu avant que l'installation ne commence	Déecté après que l'équipe 1 ait fini la tâche, l'équipe 2 doit changer de tâche	Déecté après que l'équipe 1 ait fini sa tâche, equipe2 obligé d'attendre que l'equipe1 change de tâche
Sévérité de l'impact	Impact faible, Début de la tâche retardé, changement de conception nécessaire	Impact Modéré, Équipe 2 : perturbé, changement de conception potentiel, changement de fabrication requis	Impact Important. Équipe 1 : perturbé, doit refaire la tâche, changement de conception requis Équipe 2 : Retardé
Intervalle de coût	0 – 1000 \$	2000 – 5000 \$	3000 – 30 000 \$
Pourcentage par rapport au nombre total de conflits	50 %	33 %	17 %
Pourcentage de réalisation du projet où survient typiquement ce type de conflit	5 – 15 %	15 -50 %	60 - 80 %

Les conflits ont été catégorisés selon 3 types en fonction de la sévérité de leur impact. Les conflits de type 1 se produisent tôt dans la réalisation et ont un faible impact économique. A l'inverse, les conflits de type 3 surviennent tardivement dans l'avancement du projet, sont moins nombreux que les conflits de types 1 et 2 mais ont un impact majeur (jusqu'à 30 000\$).

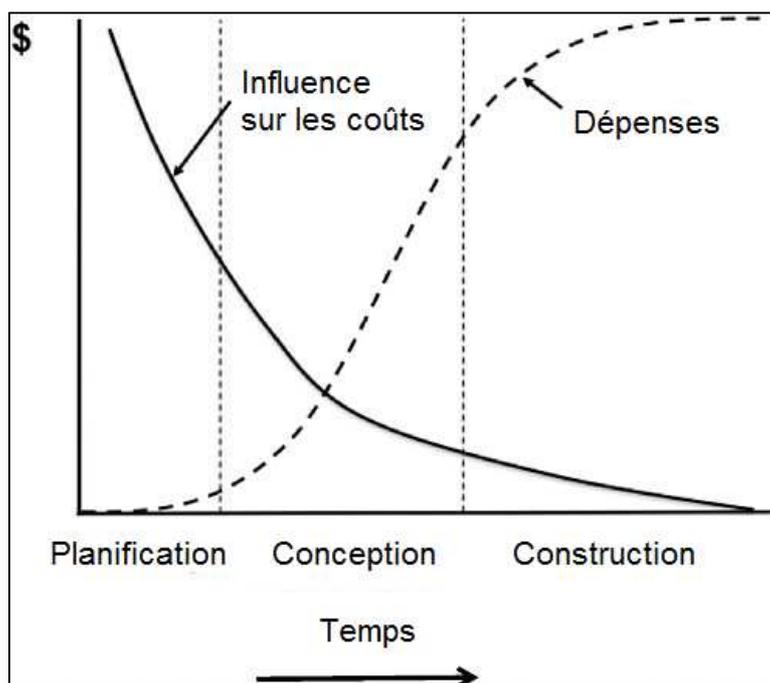


Figure 1.8 Courbe illustrant le cout des changements en fonction des phases d'un projet

Le graphe de la Figure 1.8 recoupe l'information présentée dans le tableau précédent en montrant l'influence sur les coûts par rapport aux dépenses amorcées. On remarque que l'influence sur les coûts est importante durant les premières phases c'est-à-dire les phases de planification et de conception, pour décroître lors de la phase de construction. Les dépenses par contre connaissent une évolution ascendante. Elles progressent rapidement vers la fin de la phase de conception pour atteindre leur pic durant la phase de construction. Les conflits doivent ainsi être identifiées et rectifiées le plus tôt possible

afin d'avoir une incidence minimale sur les coûts du projet. Lorsqu'un conflit survient durant la phase de construction, il est souvent trop tard pour corriger le problème sans pertes économiques. Les mesures correctives prises ne serviront alors qu'à limiter ces dernières.

Les conflits provoquent des disputes qui à leur tour vont engendrer des réclamations. La résolution des poursuites judiciaires aux États-Unis atteint environ 5 milliards par année (Michel 1998).

1.4.2 Impacts sur les délais d'exécution

Les pertes de productivité et les réajustements d'activités consécutifs à une interférence occasionneront souvent des retards sur l'échéancier prévu. Akinci, Fischer et al. (2000) rapportent par exemple comment trois conflits spatiotemporels survenus sur un projet ont prolongé la durée de réalisation prévue de celui-ci de 9 jours. En extrapolant ces résultats sur des projets de plus de grande envergure et des densités de conflits plus élevés on peut aisément conclure les conséquences néfastes que les interférences peuvent avoir sur les délais d'exécution.

1.5 Outils et méthodes de détection

Nous verrons dans cette partie les théories et principes utilisés dans la détection de conflits puis ferons une revue des principaux outils existant présentement sur le marché.

1.5.1 Les approches possibles

La détection d'interférence consiste en l'inspection, l'identification et le rapport d'interférences potentielles dans un plan 2D ou une maquette numérique (3D/4D). A cette fin, différentes approches sont possibles, qui ont connu une nette évolution à travers le temps.

1.5.1.1 Évolution des techniques

Avant la démocratisation des ordinateurs, les dessins papiers 2D étaient utilisés, trouver un conflit de conception était alors impossible. L'utilisation des images de synthèse qui a commencé avec les dessins numériques en 2D, conduit à une meilleure communication, mais trouver des conflits étaient encore quasi-impossible. Ce n'est qu'à partir de l'avènement de la 3D, que les conflits devinrent visibles en pré-construction à travers la visualisation tridimensionnelle au niveau du design. Toutefois, détecter des conflits était encore difficile et chronophage surtout pour des projets complexes.

L'étape suivante a donc été d'automatiser la détection pour accélérer le processus. De nombreuses méthodes et techniques sont utilisées à cette fin. D'après Van den Helm, Böhms et al. (2010), la différence entre ces méthodes tient au rapport vitesse sur précision. Certains s'exécuteront plus rapidement tandis que d'autres seront plus précis. Bien que la précision soit le plus important paramètre dans une détection de conflit, il n'est pas souhaitable d'avoir un algorithme prenant des heures avant de savoir quels objets sont en conflits.

1.5.1.2 La détection d'interférences "à la main"

Aujourd'hui, la détection de conflits réalisée manuellement avec des dessins 2D consiste à utiliser des plans papiers 2D et une table à dessin lumineuse. Elle est généralement réalisée par des professionnels disposant d'une expérience importante. Cette approche est toutefois lente, couteuse, source d'erreurs et dépend de l'utilisation de plans à jour.

1.5.1.3 La détection d'interférences dans un modèle 3D

Une détection d'interférences réalisée sur un simple modèle 3D retournera un nombre important d'interférences vides de sens (par exemple un cube en collision avec une sphère, sans informations sur la nature de ces objets). Si les objets 3D ne sont pas des solides, l'outil de détection ne pourra repérer les interférences entre objets encapsulés dans d'autres objets. Il ne détectera que les interférences entre les surfaces.

1.5.1.4 La détection dans un modèle BIM

Dans un modèle BIM, la détection géométrique d'interférences peut être combinée à la représentation paramétrique pour reporter des conflits structurés et pertinents. Les outils BIM actuels peuvent réaliser des détections d'interférences statiques ou dynamiques. Une détection d'interférence BIM peut utiliser la classification des composantes en différents systèmes (électricité, structure, etc.) pour faire des analyses efficaces de conflits Durs (« hard clash ») ou de Jeux (« soft clashes »). L'automatisation de l'analyse réduit l'erreur due au facteur humain lors de l'inspection.

Une étude menée par Leite, Akinci et al. (2009) a comparé la détection de conflits réalisée manuellement et celle faite utilisant le BIM. Il est ressorti que la détection automatique a identifié un nombre important de conflits que les ingénieurs ont manqué. Toutefois, l'approche manuelle a détecté des conflits qui n'ont pas été identifiés par l'outil BIM car les objets en conflits n'étaient pas représentés dans le modèle. L'étude a également mis en évidence des observations de conflits sur chantier qui n'ont été identifiés ni par l'approche manuelle ni par l'approche automatique.

Il est donc important de compléter la détection automatique avec des avis d'experts afin de minimiser au maximum les interférences sur chantier. Le BIM ne devrait pas être vu, du moins à l'heure actuelle, comme la panacée pour éliminer totalement les problèmes sur chantier mais comme un outil de support pour y parvenir.

1.5.2 Principaux outils

Les outils BIM supportant la conception et la modélisation aux différentes phases d'un projet existent sur le marché depuis plusieurs années et ont évolué pour offrir une vaste gamme de fonctionnalités. Bien que l'environnement des logiciels soit en constante évolution et qu'ils existent aujourd'hui une multitude d'outils, le paragraphe suivant dresse une présentation succincte des outils BIM les plus utilisés en 2012. Une liste d'outils a été dressée d'après la revue de plusieurs documents scientifiques (Associated

Tableau 1.3 Outils de modélisation 3D

Nom	Éditeur	Formats supportés	Description
Revit (Structure, MEP, Architecture, Civil)	Autodesk	DWG, gbXML, IFC, FBX	Conception 3D orientée objet, diverses fonctionnalités selon les versions
Archicad	Graphisoft	IFC, intégration avec la suite Revit	Approche orientée objet, modélisation architecturale, estimation de cout analyse énergétique
Vico Office	Vico Software		
Affinity	Trelligence	Graphisoft, sketchup, autodesk formats	Planification d'espaces et conception schématique
Allplan (architecture ,engineering, cost management ,facility management)	Nemetschek	IFC, DWG, DXF, PDF	Conception 3D orientée objet, web based
Bentley Suite	Bentley	DWG, gbXML, IFC, Adobe 3D PDF, DGN, STEP, SketchUp, Rhino et IGES	Conception et modélisation pour les infrastructures, architecture, structure et MEP

1.5.2.2 Outils BIM 4D

Les outils 4D permettent de monter une simulation 4D à partir de données géométriques et d'informations temporelles.

Tableau 1.4 Outils de modélisation 4D

Nom	Éditeur	Formats supportés	Description
Navisworks	Autodesk	DWF, formats CAD courants	Collaboration, coordination, communication. La version 2012 contient un éditeur de diagramme Gantt intégré
Innovaya Suite	Innovaya	DWG, DXF, DWF, IFC, RVT, MS project, Primavera	4D, 5D et gestion de projet
Vico Office	Vico Software	IFC, revit, tekla, archicad	Intégration d'activités de construction, métré, estimation de coût
Onuma	Onuma Systems	IFC, XML, GoogleEarth, formats autodesk et graphisoft	Interopérabilité, planification. Déploiement web, serveur, SIG
Primavera P3	Milestone/Gehegy Partners/Dassault	Formats de base de donnée courants	Outil Planification de projet. Adapté aux grands projets ou à la gestion de projets multiples
Microsoft Project	Microsoft		Outil de planification de projet

1.5.2.3 Outils de détection d'interférences :

Il y a deux catégories de technologies de détection de conflit disponibles présentement sur le marché :

- **La détection d'interférence à partir des outils de conception CAD/BIM :** la détection à partir d'outil de conception est souvent inefficace en raison des problèmes d'incompatibilités. En effet, l'entrepreneur doit analyser le modèle BIM réalisé durant la phase de conception par les ingénieurs mais peut se heurter au manque d'interopérabilité et à la complexité des objets.
- **La détection d'interférences à partir d'outils d'intégration :** La détection réalisée par ces programmes est plus poussée que celle effectuée par les outils des conceptions et repère un nombre plus important d'interférences. Nous décrirons plus bas les outils d'intégration les plus communément utilisés.

Tableau 1.5 Outils de détection d'interférences

Applications	Editeur	Formats supportés	Atouts- Particularités
Outil de conception			
Revit	Autodesk		Comprend des fonctionnalités basiques de détection d'interférences
Outils d'intégration			
NavisWorks (Manage ou JetStream)	Autodesk	DWG, DXF, IFC	Possède des fonctionnalités d'analyse poussées telles que le clash detective ou le timeliner
Solibri Issue Locator	Solibri	Import 3D building designs from all major BIM tools Importing of several IFC and DWG files into one SMC model	Détection de déficiences : permet d'analyser le modèle pour détecter des composants manquants (structuraux, etc.)
Tekla BIM sight	Tekla	DWG, DXF, DGN, IFC, CNC, DSTV, CIS/2	
Projectwise navigator	Bentley	2D/3D	Revue et analyse de l'information du projet
Vico Office Constructability Manager	Vico		

1.6 Discussion

Les projets réalisés avec le BIM ont affichés des bénéfices importants tirés de l'implémentation de cette technologie innovante, pour ne citer que l'exemple l'Opéra de Sydney (Fischer 2007). L'apport des autres facettes que sont le 4D et la détection d'interférences permettrait d'amplifier les avantages apportés par la seule utilisation du BIM 3D. La possibilité de représenter et simuler numériquement un projet avant sa construction à travers une maquette numérique représente un aspect critique du BIM 4D en permettant d'améliorer la visualisation, l'intégration et l'analyse (Koo and Fischer 1998). De plus, le BIM sert de plate-forme permettant une étroite coordination entre les acteurs de la construction. Comme le soulignent Riley and Horman (2001), une collaboration accrue entraîne une chute dramatique du nombre d'interférences sur chantier. Lorsqu'on sait que le coût moyen d'une interférence est estimée à 17 000 dollars (vicosoftware 2010), une meilleure coordination aura des retombées positives sur le coût final, sur les délais d'exécution et sur la qualité du projet. Une avenue possible serait d'associer le BIM 4D et le clash détection à la dimension 5D, c'est-à-dire l'estimation de coûts, pour faire ressortir les impacts économiques relatifs aux interférences.

L'un des fondements du BIM repose dans la représentation paramétrique et orientée objet (Eastman, Teicholz et al. 2011). Les éléments intelligents constituant un modèle digital BIM poussent l'efficacité de la détection d'interférences au-delà de ce qui existait avec la CAO 3D classique (Van den Helm, Böhms et al. 2010). En effet, les objets ne se limitent plus à un assemblage de solides ou de surfaces vides de sens (ex. : un cube, un cylindre) mais sont paramétriques et classés en familles (exemple : une porte, un mur), chaque famille disposant de règles et d'attributs qui leurs sont propres.

Les interférences dans un projet de construction peuvent être classées en deux catégories. 1) Du point de vue de la CAO (concepteurs), on distingue les conflits statiques et les conflits dynamiques (Akinci, Fischer et al. 2000). 2) Du point de vue de la gestion de projet (constructeurs), Les types d'interférences rencontrés en construction comprennent les conflits

de conception, les risques de sécurités, les risques de dommage et les congestions (Akinci, Fischer et al. 2000; Wu and Chiu 2010). Ces évènements sont qualifiés de spatio-temporels dans la mesure où ils ne se produiront qu'à un moment spécifique et à un endroit donné durant la phase de construction. Le clivage entre ces deux catégories est important dans la mesure où les types de conflits vont varier dans les deux cas. Le type d'interférence « Jeu » par exemple, qui est un concept fondamental en CAO, n'est pas considéré comme conflit à part entière dans la gestion de projet.

Par définition, le BIM 4D est la combinaison de la 3D et du temps. D'un côté l'aspect 3D permet de visualiser l'édifice virtuellement avant même son érection. Et de l'autre côté, la dimension temporelle offre la possibilité de simuler toute la séquence de construction du projet. En théorie, la combinaison de ces deux facteurs permettrait de détecter la quasi-totalité des interférences en construction. Toutefois, comme le soulignent Leite, Akinci et al. (2009) il est important de compléter la détection automatique avec des avis d'experts afin de minimiser au maximum les interférences sur chantier. La place des rencontres de coordination, permettant de rassembler les professionnels autour d'une table, est donc primordiale dans un processus de détection d'interférences et le BIM ne devrait pas être vu, du moins à l'heure actuelle, comme la panacée pour éliminer totalement les problèmes sur chantier mais comme un outil de support pour y parvenir.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Tel qu'énoncé précédemment, le but de cette étude est de proposer un plan pour la détection d'interférences dans un modèle BIM 4D.

2.1 Justification d'une stratégie pour la détection d'interférences

Les possibilités offertes par le Building Information Modelling en termes de centralisation et de traitement de l'information permettent d'envisager une réduction dramatique du nombre d'interférences sur un projet. Toutefois, cette technologie requiert une approche radicalement différente de l'approche traditionnelle, en passant d'un processus linéaire à un processus intégré et itératif. Cette évolution implique d'importants changements au niveau des flux de travail. Ainsi, pour atteindre le plein potentiel du BIM en matière de détection d'interférences, un plan devrait être mis en place pour identifier, corriger et gérer efficacement les conflits potentiels.

Les objectifs concrets qui motivent l'élaboration de ce plan sont de:

- Réduire les conflits sur chantier ;
- Améliorer la productivité sur chantier;
- Réduire les coûts ;
- Réduire l'échéancier.

2.2 Logique de l'étude

La logique suivie pour la recherche est la suivante:

- Effectuer une revue de travaux antérieurs afin d'établir une base de connaissances pour la recherche;

- Modélisation d'un projet 3D sur Revit puis développement d'un échancier et assemblage d'un modèle 4D sur Navisworks;
- Approche empirique basée sur l'analyse et expérimentations du modèle 4D réalisé;
- Développement d'une stratégie pour la gestion et la correction des interférences spatio-temporelles;
- Validation du plan sur un projet réel.

2.3 Structure

Afin d'aborder la problématique des interférences de la façon la plus complète, les trois aspects (technologique, organisation et processus) ont été considérés et la structure adoptée par le National BIM Standards (NBIMS) dans le cadre du *BIM execution plan* a été prise comme base.

Le BIM execution plan est un document de référence destiné à guider les acteurs de la construction à implémenter le BIM au sein de leur organisation ou sur un projet spécifique (BuildingSmart Alliance 2010).

En se basant sur la méthodologie du NBIMS, les composantes du plan de détection d'interférences ont été identifiées, soient :

- **Technologie** : définir l'infrastructure technologique destinée à supporter le processus
- **Organisation** : définition des rôles et des responsabilités des partis impliqués dans le processus
- **Processus** : des processus génériques sont modélisés afin d'offrir un support visuel. Ils comprennent les séquences de tâches à réaliser, les échanges d'information ainsi que les règles technologiques associées. Des outils et des documents sont également proposés pour supporter le processus

CHAPITRE 3

ANALYSE EXPERIMENTALE

La réalisation et les résultats de l'étude du modèle 4D, monté pour des fins d'analyse et d'expérimentation, sont présentés dans ce chapitre.

3.1 Modèle expérimental

3.1.1 Objectifs de l'analyse expérimentale

Les objectifs motivants cette analyse expérimentale sont les suivants :

- Comprendre et cartographier la séquence de tâches associées à l'élaboration d'un modèle 4D à travers la modélisation d'une partie d'un projet ;
- Capturer les contraintes et les problèmes pouvant survenir pendant la réalisation d'un modèle 4D et lors de la détection d'interférences ;
- Identifier des possibilités d'amélioration dans ce processus ;

3.1.2 Description du projet étudié

Le projet pris pour modèle est un complexe commercial d'envergure moyenne composé de 3 immeubles de bureaux sis dans la ville d'Antananarivo (Madagascar). Ce projet, qui est actuellement en cours de construction, a débuté en janvier 2012 pour une durée prévue de 18 mois.

Les plans Autocad (.dwg) ainsi que les différents échéanciers du projet (format MS project) ont été fournis par les professionnels au début de la phase de construction. Du fait de l'éloignement géographique, depuis cette date, aucune interaction avec le projet réel n'a jusqu'ici pu être réalisée.



Figure 3.1 Perspective du projet expérimental

Source : COLAS (2009)

3.2 Réalisation du modèle

Le processus suivi pour le montage de la maquette numérique est exposé dans ce qui suit. Dans une démarche de cartographie des flux de travail, les processus relatifs à la 3D et à la 4D ont été décomposés pour en dégager les séquences de tâches.

3.2.1 Outils utilisés

La conception du projet a été réalisée suivant le processus traditionnel c'est-à-dire basé sur des plans 2D. A partir des dessins Autocad et PDF fournis par les professionnels, le projet a été re-modélisé dans un environnement BIM. À cet effet, deux principaux outils ont été utilisés :

- Revit 2013: pour la modélisation tridimensionnelle. Les trois variantes de Revit ont été employées pour chaque discipline concernées (la partie architecturale a été réalisée avec Revit Architecture, la partie structurale avec Revit Structure et la partie mécanique avec Revit MEP);
- Navisworks 2013: pour la modélisation 4D et l'analyse de la maquette numérique.

Ces logiciels ont été retenus pour réaliser l'expérimentation dans la mesure où ils figurent parmi les plus utilisés dans l'industrie de la construction actuellement. Les applications Autodesk sont fermement implantées sur le marché depuis plusieurs années et ont atteint à l'heure actuelle un certain niveau de maturité technologique. Les flux de travail associés à ces outils ont été analysés et utilisés pour le plan de détection d'interférences afin que celui-ci puisse être compréhensible et implémentable par le plus grand nombre d'organisations.

3.2.2 Processus 3D

3.2.2.1 Modélisation 3D

Bien que la modélisation avec Revit soit plus aisée et simplifiée comparée aux outils de CAO antérieurs, le processus de modélisation 3D n'en reste pas moins extrêmement chronophage. C'est la raison pour laquelle seulement une partie du projet a été modélisée pour les fins de l'expérimentation. Cette portion inclue trois niveaux (sous-sol, rez-de-chaussée et premier étage) du Bâtiment A (le complexe comprend quatre bâtiments identiques).

Les composantes du bâtiment modélisées sont les suivantes:

- Composantes structurales : comprenant les poutres, poteaux, voiles et dalles en béton. Le système de fondations sur pieux n'a pas été modélisé
- Composantes architecturales : murs intérieurs, murs rideaux, portes, fenêtres
- Composantes MEP : le système de chauffage, ventilation et climatisation, la plomberie, la protection incendie, les composantes électriques;

Certaines composantes 3D ont dues être divisées pour qu'elles puissent représenter les phases réelles de la construction sur chantier. C'est le cas par exemple des dalles en béton qui n'étaient pas coulées en même temps et qui devaient donc être découpées en plusieurs zones.

3.2.2.2 Détection de conflits à partir de l'outil de conception

Cette étape a été réalisée à la fin de chaque modélisation. Cette analyse intradisciplinaire est la première étape de la détection d'interférences et consiste à identifier les conflits dans chaque discipline en vue d'une combinaison des modèles. Elle est traditionnellement réalisée dans Revit par les concepteurs mais peut également être effectuée dans Navisworks, comme ce fut le cas ici. Les résultats de cette détection intradisciplinaire sont présentés plus loin dans la partie consacrée à cet effet.

3.2.2.3 Assemblage des modèles tridimensionnels dans l'outil d'intégration

Le modèle 4D a été réalisé en concevant des liens à partir de Navisworks vers chacun des modèles 3D Revit. Cette approche a été retenue car elle offre plus de flexibilité pour la revue, la gestion et la correction du modèle 4D dans la mesure où un processus de détection d'interférences entraîne des mises à jour fréquentes au niveau de la géométrie des modèles 3D originaux.

3.2.2.4 Détection de conflits lors de la fusion des modèles

Analyse des conflits statiques

Une fois les modèles assemblés, une seconde série de tests de conflits a été réalisée. Cette étape d'analyse interdisciplinaire s'inscrit dans une démarche de coordination des modèles. Toutes les combinaisons pertinentes entre les disciplines et leurs composantes ont été analysées (Structure/MEP, Structure/Architecture, Architecture/MEP) et, dépendamment des cas, les mesures appropriées sont prises. Pour cela, le « clash detective » de Navisworks a été utilisé. Le « clash detective » est une fonctionnalité intégrée permettant l'inspection, l'identification et le report de conflit dans le modèle.

Inspection

L'inspection dans un environnement 3D vise à dégager les conflits statiques (c'est-à-dire entre des composantes statiques et permanentes, ex : poutres, murs, etc.) du modèle.

Le processus générique de préambule à la détection de conflits statiques comprend les étapes suivantes:

- a. Sélection de combinaisons pertinentes de sets de composantes (statique vs. statique);
- b. Paramétrage de l'outil en fonction du type de conflit à identifier (dur ou jeu);
- c. Établissement de règles pour raffiner la détection;
- d. Définition des paramètres visuels pour faciliter l'identification de problèmes;

Identification

Basés sur les paramètres définis, les résultats des conflits dans le modèle sont recensés et présentés sous formes de listes. La navigation en temps réel dans le modèle permet d'analyser les conflits dans un environnement tridimensionnel.

Rapport

Le rapport de conflit occupe une place centrale dans le processus de gestion de conflit dans la mesure où il véhiculera les informations permettant le traitement et la résolution du conflit. En effet, dans un contexte de détection d'interférences réel, la ressource responsable d'analyser et détecter les conflits est souvent différente de celle qui se chargera de la traiter et d'y apporter une solution. Dans Navisworks, un rapport de conflit comporte, pour chaque conflit identifié, les informations suivantes. 1) Les informations spatiales (x,y,z) définissant l'emplacement du conflit dans le modèle. 2) Une représentation visuelle du conflit, affichant les composantes en interférence, pouvant contenir ou non des annotations. 3) Dans le cas d'une interférence spatio-temporelle, la date à laquelle le conflit survient. 4) Le destinataire ou la personne assignée chargée du traitement.

3.2.3 Processus 4D

Ce n'est pas l'importation dans Navisworks qui enclenche le processus 4D. Celui-ci ne commence réellement que lorsque la dimension temporelle est apportée c'est-à-dire à partir de l'intégration de l'échéancier.

3.2.3.1 Montage du modèle 4D

Échéanciers utilisés

Les échéanciers ont été fournis par l'entrepreneur général et par les divers sous-traitants sous la forme de fichiers MS project. La combinaison de ces données a permis la compréhension de la planification du projet de manière détaillée, incluant plusieurs centaines d'activités dont les activités majeures et la majorité les sous-activités.

Incorporation de l'échéancier dans le modèle virtuel

Le « Timeliner » est la fonctionnalité qui prend en charge toute la dimension temporelle dans Navisworks et qui permet de créer les simulations 4D. Via cet outil l'échéancier du projet a été directement importé le modèle. La possibilité de lier les tâches du Timeliner à des logiciels de planification externes permet de garder la simulation synchronisée avec le statut actuel du projet. Par ailleurs, Navisworks dispose d'un outil de planification intégré permettant de rajouter ou d'éditer les tâches de l'échéancier ce qui rend la tâche de mettre à jour le modèle 4D plus aisée.

Le modèle 4D a par la suite été réalisé en attachant chaque composante aux activités correspondantes de l'échéancier disposant d'une date de début et une date de fin.

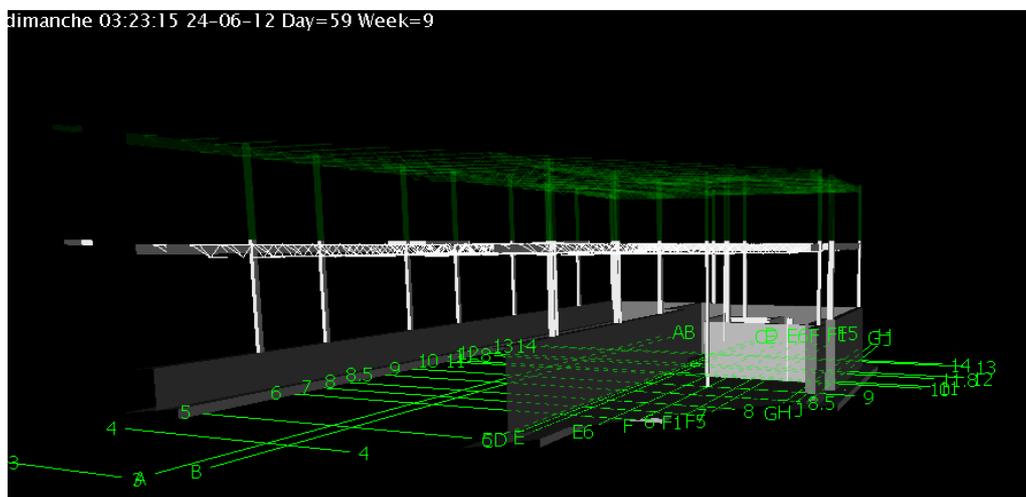


Figure 3.2 Simulation 4D du modèle expérimental

Composantes temporaires

Dans le but d'obtenir un modèle 4D précis qui reflètera le plus fidèlement possible la séquence de construction de la portion de l'édifice étudiée, des structures temporaires ont été modélisés. Ces objets ont été insérés dans l'outil d'intégration puis programmés pour apparaître à certains moments dans la séquence de construction.

Ces composantes comprennent les échafaudages, les étaitements et les équipements (grues, camions toupies). Les échafaudages et les étaitements ont été incorporés davantage pour l'animation et la visualisation pour aider à identifier les problèmes que pour la détection d'interférences en elle-même (c'est-à-dire pour analyser des collisions entre ces éléments et les composantes du bâtiment).

3.2.3.2 Simulation 4D

Tel qu'énoncé lors de la revue de littérature, le modèle 4D est un puissant outil de visualisation, d'analyse, d'intégration

Analyse des conflits dynamiques

Dans Navisworks, les conflits dynamiques (c'est-à-dire entre des objets dynamiques ou entre des objets statiques et dynamiques) sont analysés en liant le Clash Detective et le Timeliner. Les composantes sont dans un premier temps sélectionnées dans le clash détective puis une simulation temporelle est lancée. Cette détection de conflits dynamiques est accomplie par Navisworks en avançant par palier en fonction de l'incrément fixé dans le Timeliner, puis à sonder le modèle pour chacune de ces incréments. La procédure est similaire à la détection de conflit statique (décrite précédemment) en y rajoutant l'aspect temporel, soit la séquence suivante :

- a. Création de scripts pour activer et/ou animer les composantes dynamiques;
- b. Sélection de combinaisons pertinentes de sets de composantes (dynamique vs. statique, dynamique vs. dynamique);
- c. Paramétrage de l'outil en fonction du type de conflit à identifier (dur ou jeu);
- d. Définition du facteur d'incrément de la simulation ;
- e. Établissement de règles pour raffiner la détection;
- f. Définition des paramètres visuels pour faciliter l'identification de problèmes;

Les composantes dynamiques dans le modèle comprenaient les engins de chantier. Dans ce cas, l'analyse dynamique a été surtout réalisée pour expérimentation car la portion du bâtiment étudié n'impliquait pas d'importants flux et mouvements d'objets.

Coordination spatiale

Les conflits spatio-temporels tels que présentés dans le chapitre 1 (risque de sécurité, risque de dommage, congestion) ne sont pas pris en compte par Navisworks de manière automatique mais doivent être identifiés visuellement.

En raison de ce manque de fonctionnalités d'analyse d'espaces, une alternative a été développée pour identifier les conflits d'espaces de travail. Tel que décrit lors de la revue de

littérature, il existe différents types d'espaces en construction (composantes de bâtiment, temporaires, sécurité, équipement, etc.). Navisworks n'est pas un outil de conception, mais uniquement un outil d'analyse et de visualisation. Pour définir de tels espaces, il faut par conséquent les modéliser dans Revit. Les volumes qu'ils occupent peuvent être représentés par des cubes, des cylindres ou sphères délimitant par exemple l'espace requis par une équipe de travail ou un espace jugé dangereux. Afin de faciliter la visualisation dans Navisworks, ces volumes devraient être semi-transparents et un code couleur devrait être assigné pour identifier chaque type d'espace. Une fois intégré dans le modèle 4D, chaque volume est lié à une tâche de l'échéancier puis simulé temporellement en suivant le processus générique décrit plus haut. Des animations peuvent également être rajoutées aux cubes pour représenter les espaces dynamiques (ex. équipements mobiles). Si Navisworks détecte des conflits entre ces cubes, cela signifie qu'on est en présence d'un conflit spatiotemporel. Le type de conflit va dépendre des espaces impliqués. Les conflits d'espaces ainsi identifiés nécessiteront une correction telle qu'un ajustement au niveau de l'échéancier.

Cette approche est toutefois jugée très chronophage pour pouvoir être utilisée sur un projet de grande envergure

Autres problèmes dans le modèle

Il existe également d'autres problèmes qui peuvent être mis en évidence grâce à la simulation 4D, qui ne sont pas des interférences par définition, mais qui peuvent engendrer des problèmes et des perturbations durant la construction s'ils ne sont pas traités:

- **Problèmes de logique** : Lorsque la séquence entre 2 objets n'est pas réaliste (par exemple une fenêtre construite avant le mur) reflétant une erreur dans l'échéancier;
- **Oubli** : Des tâches peuvent avoir été oubliées dans l'échéancier.

Ces cas nécessitent une inspection et analyse visuelle du modèle 4D.

3.2.4 Approches de détection

Le recense les différents types de conflits présentés précédemment et l'approche avec laquelle ils ont été analysés dans le modèle. On distingue les interférences qui sont détectées automatiquement par le clash detective et ceux qui requiert une analyse visuelle.

Tableau 3.1 Approches de détection selon les types de problèmes dans un modèle 4D

		Conflits entre composantes du bâtiment		Conflits au niveau des espaces de travail
		Détection des Conflits dynamiques	Détection des Conflits Statiques	Détection des conflits spatio-temporels
Conflit de conception	Dur	Automatique	Automatique	-
	Jeu	Automatique	Automatique	-
	Logique/oubli dans l'échéancier	Visuelle	Visuelle	-
Congestion		-	-	Visuelle
Sécurité		-	-	Visuelle
Domage		-	-	Visuelle

On peut constater à partir de ce tableau que, d'une part, il existe une importante quantité de problèmes potentiels dans un modèle 4D et que, d'autre part, la majorité de ces problèmes nécessitent une analyse visuelle de la part de l'utilisateur, ce qui peut augmenter les risques d'oubli et d'erreurs liés au facteur humain.

3.3 Résultats

Après avoir exposé le processus suivi pour la réalisation du modèle expérimental, les résultats collectés au cours de ce processus sont présentés dans ce qui suit. Ces résultats concernent, d'une part, les données relatives aux interférences dans le modèle et, d'autre part, les problèmes et les contraintes rencontrés lors de la modélisation.

3.3.1 Résultats de l'analyse du modèle

Les résultats collectés après les séries d'analyses menées sur le modèle sont compilés dans le Tableau 3.2.

Tableau 3.2 Sommaire des problèmes identifiés

		Détection des Conflits dynamiques	Détection des Conflits Statiques	Détection des conflits spatio-temporels
Conflit de conception	Dur	0	4	-
	Jeu	0	1	-
	Logique/oubli dans l'échéancier	0	1	-
Congestion		-	-	2
Sécurité		-	-	0
Dommage		-	-	0

Les détails relatifs à ces problèmes ainsi que le cheminement qui a permis d'y aboutir sont exposés dans les paragraphes suivants.

3.3.1.1 Configuration de l'outil d'intégration

Les configurations suivantes ont été utilisées pour analyser le modèle :

- **Paramétrages du clash détectif et du Timeliner:** Les paramètres par défaut ont été employés pour déceler les conflits dans la maquette et pour la simulation, soient :
 - Tolérance de la détection (sensibilité de l'analyse) = 0.001 m
 - Incrément de la simulation = 0.10 s
- **Configuration visuelle :** Comme le montre le Tableau 3.1 sur les approches détections, l'inspection visuelle occupe une place prépondérante pour analyser une simulation 4D. Cette visualisation est facilitée par le jeu de couleur prédéfini dans Navisworks pour catégoriser les types de tâches : les composantes à construire (vert), les composantes à démolir (Rouge), les structures temporaires (Jaune).

3.3.1.2 Interférences détectées

Le processus de détection, de tri et de classification entrepris sur le modèle a permis d'identifier plusieurs conflits critiques. Les résultats (bruts et après analyse) au niveau de chaque discipline et pour différents types de conflits recherchés sont présentés dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Tableau 3.3 Volume de conflits dans le modèle

Disciplines	Combinaisons	Types de conflit	Volumes bruts de conflits recensés	Nombre de conflits pertinents après analyse
Intradisciplinaire				
Structure	-	Dur	35	0
Architecture	-	Dur	214	0
MEP	-	Dur	120	1
Interdisciplinaire				
Structure	poutre/murs colonne/murs	Dur	352	0
Architecture		Jeu	65	0
MEP	plomberie/poutre plomberie/colonne HVAC/poutre HVAC/colonne	Dur	92	3
Structure		Jeu	34	1
Architecture	plomberie/murs HVAC/murs	Dur	546	1
MEP		Jeu	115	0

Les résultats présentés dans le tableau 3.3 montrent une quantité importante de conflits relevés aussi bien pour l'analyse interdisciplinaire que l'intradisciplinaire. Les conflits touchent surtout la partie architecture, les MEP et enfin la structure. Cela peut s'expliquer par la complexité et par le nombre important de composantes architecturales. Les combinaisons générant le plus de conflits sont par conséquent architecture/MEP puis architecture/structure. Toutefois, ces chiffres se basent sur des volumes bruts retournés par navisworks qui comprennent majoritairement des conflits liés à la modélisation (plus de 90%). Après le processus d'analyse, de tri et de classification réalisé sur ces conflits, on ne peut en dégager

qu'une poignée qui peut réellement représenter une menace pour le bon déroulement du projet.

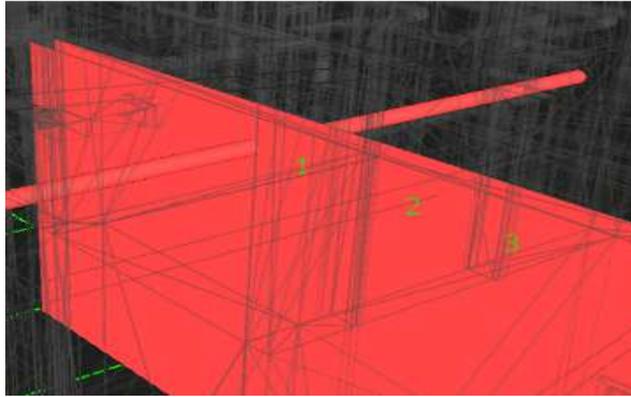


Figure 3.3 Collision entre un mur porteur et un conduit

Les conflits pertinents identifiés sur la portion du bâtiment étudiée sont les suivants :

- Conflit de conception critique entre un mur porteur et un conduit au niveau du RDC;
- Conflit de conception au niveau de la plomberie : entre deux tuyaux suffisamment larges pour pouvoir représenter un conflit significatif sur chantier, localisés au sous-sol;
- Conflit de conception entre le fond d'une conduite de ventilation et les conduits de protection incendie au Rez-de-Chaussée;
- Possibilité de conflit spatiotemporel de type congestion lors de la mise en place des AHU (air handling unit) et des appareils électriques au niveau du sous-sol. Des changements au niveau de l'échéancier sont nécessaires pour ré-ordonner les activités des sous-traitants;

3.3.2 Problèmes et contraintes relevés

Après les résultats de l'analyse interne du modèle, cette partie va concerner davantage les paramètres externes c'est-à-dire ceux relatifs au processus. En effet, lors de l'analyse expérimentale de nombreuses contraintes ont été identifiées, touchant aussi bien les aspects 3D/4D que la détection d'interférences

3.3.2.1 Contraintes liées au projet

Analyse réalisée sur des plans datés

Comme le projet est en cours de réalisation, un feedback devrait être effectué par rapport à la survenue ou non des interférences précédemment identifiées. Toutefois, la documentation liée au projet a été obtenue au début de la phase de construction (début d'année 2012). En raison de la nature dynamique des projets de construction, les plans et l'échéancier ont sûrement évolués depuis cette date. L'éloignement géographique a empêché le suivi du projet et l'approvisionnement au niveau des plans. Ces facteurs font en sorte que les problèmes soulignés peuvent avoir été identifiés et corrigés en cours de route.

Cette situation souligne l'importance de réaliser des détections d'interférences et des analyses basés sur les dernières versions des plans afin que les problèmes reportés soient pertinents pour l'équipe du projet.

3.3.2.2 Problèmes liés aux aspects 3D/4D

Niveaux de détails hétérogènes

Lors de l'analyse du modèle expérimental, plusieurs problèmes liés aux niveaux de détail ont été décelés. Deux cas peuvent survenir :

- « **Sur-modélisation** » : causés par une modélisation trop poussée de certains éléments, par exemple, en rajoutant inutilement des détails au niveau des façades alors que cela n'est pas nécessaire pour l'usage désiré du modèle. Cette sur-modélisation consomme pourtant un temps précieux du modelleur;
- « **Sous-modélisation** » : causés par un niveau de détail insuffisant faisant en sorte que les résultats du sondage de la maquette sont incomplets. En effet, l'outil d'intégration ne peut pas détecter les interférences liées à des objets absents ou manquants de détail.

Limitations liées à l'analyse d'un modèle 4D

L'analyse visuelle d'un modèle 4D nécessite un effort d'attention important de la part de l'observateur pour en dégager les problèmes éventuels. De plus, il doit disposer d'une expertise suffisante au niveau de la mise en œuvre des composantes, des processus de construction et du fonctionnement du projet. Par ailleurs, le recours au facteur humain fait courir le risque d'oubli, d'inattention ou d'erreurs d'appréciation.

Manque de références pour la modélisation

Les processus de modélisation 3D, 4D puis de détection d'interférences sont extrêmement fastidieux et longs. Un volume important de tâches complexes a dû être réalisé entre le début du processus, c'est-à-dire la réception des plans 2D des professionnels, et l'identification de conflits critiques pour le projet. Le besoin de documents et d'une structure de références pour accompagner et guider dans ce cheminement a ainsi été perçu.

3.3.2.3 Problèmes liés à la détection d'interférences

Risques liés au traitement des conflits

Plusieurs milliers de conflits ont été reportés sur la maquette numérique étudiée qui ne représente pourtant qu'une partie d'un projet de faible envergure. Le traitement d'un tel volume de données fait courir le risque de passer à côté de conflits importants. Chaque conflit doit en effet être analysé, trié et corrigé individuellement ce qui augmente les probabilités d'erreurs liées au traitement manuel.

Problèmes de modélisation

Comme le soulignent les résultats du

Tableau 3., une détection automatique d'interférences retourne souvent une quantité importante de conflits relevant de problèmes de modélisation. Ces « faux conflits » sont dus à une représentation des composantes dans le modèle de telle manière que Navisworks les affiche dans ses résultats de tests. Ces cas sont bénins mais lorsqu'ils sont trop nombreux, peuvent noyer et masquer les « vrais » conflits c'est-à-dire ceux qui vont réellement poser un problème durant la construction. Un exemple de faux conflit souvent rencontré dans le modèle impliquait les garde-corps, où les composantes en interférences étaient les montants et les barres transversales. Ce conflit n'en est pas réellement un puisque dans la réalité ces éléments seront assemblés de cette manière. La modélisation aurait pu prendre en compte cet aspect et l'ensemble des composantes du garde-corps (montants, main courant, poteau, barres transversales) aurait par exemple pu être fusionnés en un seul objet. Cet unique problème va occasionner plusieurs dizaines de conflits non pertinents.

Faire le tri entre les « vrais » et « faux » conflits peut être extrêmement chronophage particulièrement sur des projets de grandes envergures et complexes impliquant plusieurs dizaines de milliers de conflits. Des méthodes de modélisation pourraient être développées pour réduire ces volumes.

Limite des rapports générés

Bien que les rapports de conflit de Navisworks contiennent des informations complètes sur chaque conflit (localisation spatiale, composantes en conflits, appui visuel) les données qu'ils contiennent sont brutes et non valorisées du fait du manque de fonctions d'analyse. Des nouveaux formats pour véhiculer les problèmes dans le modèle devraient donc être pensés pour communiquer l'information plus efficacement entre les intervenants.

3.3.3 Analyse des flux de travail

La rétrospective du processus suivi et la considération des problèmes rencontrés permet de se rendre compte que la détection d'interférences ne devrait pas être vue comme un évènement ponctuel dans le temps. En d'autres termes, la modélisation et la détection d'interférences ne devraient pas être perçus comme deux processus indépendants et déconnectés. Idéalement,

on devrait donc inclure une phase de « pré-détection », qui commencerait dès le montage du modèle 3D et qui consisterait à préparer la détection d'interférences à venir.

Par ailleurs, une importante quantité d'informations est générée durant le processus de modélisation et de détection. Il serait intéressant de capturer et stocker cette information après que la détection d'interférences ait été complétée, ce qui permet d'identifier une troisième phase, la phase de « post détection ».

Les flux de travail selon ce phasage ont été conceptualisés et modélisés (voir Annexe I : phases de modélisation).

3.4 Discussion

La réalisation du modèle 4D a permis d'effectuer une revue d'ensemble du processus suivi pour l'élaboration d'une maquette BIM et ainsi d'aborder la problématique des interférences de manière complète et globale. Les analyses et expérimentations menées sur le modèle ont permis de décomposer les séquences d'activités, de mettre en évidence les différents types de conflits et d'évaluer concrètement les avantages et les limites de la détection d'interférences avec le BIM. Plusieurs problèmes ont été relevés mais le but de cette analyse expérimentale consistait davantage à cartographier le processus de détection d'interférences et d'en dégager les problèmes dans le but de monter une méthodologie, plutôt que de détecter et reporter les conflits dans les plans.

Il est ressorti de cette analyse qu'on pourrait diviser la détection d'interférences en trois phases distinctes :

- Phase de pré-détection : la détection d'interférences se prépare dès la conception du modèle BIM et qu'une modélisation structurée devrait être entreprise;
- Phase de détection : une approche méthodique doit être développée pour identifier, gérer et corriger efficacement les interférences dans le modèle;
- Phase de post-détection : le processus se poursuit après que les conflits aient été corrigés.

CHAPITRE 4

PLAN DE DÉTECTION D'INTERFÉRENCES

Dans ce chapitre, la méthodologie développée pour la détection d'interférences est exposée. Elle a été conçue pour répondre aux problèmes et aux contraintes qui ont été soulignées lors de l'analyse expérimentale. Le plan met en avant les points essentiels relatifs à la détection d'interférences qui devraient être pris en compte durant un projet.

4.1 Points saillants du plan de détection d'interférences

Le plan est articulé autour des paramètres T-O-P afin d'analyser et traiter le sujet de manière systématique :

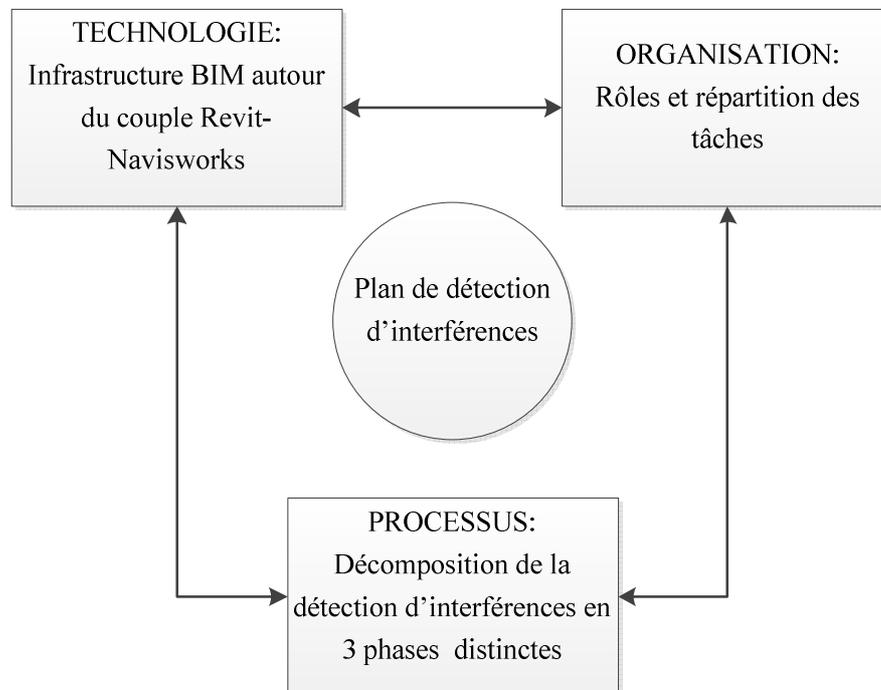


Figure 4.1 Composantes du plan de détection d'interférences

La détection d'interférence ne devrait pas uniquement se focaliser sur l'aspect procédural. Il faut en outre considérer l'aspect organisationnel qui consiste à répartir les rôles et les tâches dans l'environnement multidisciplinaire de la construction. L'infrastructure de support, c'est-à-dire le volet technologique, doit également être pris en compte. Ces paramètres sont intrinsèquement liés entre eux, c'est la raison pour laquelle ils ont été incorporés dans le plan. Leur contenu sera développé plus en détail dans les paragraphes suivants.

4.2 Technologie

L'aspect technologique du plan développé s'appuie sur les flux de travail du couple Revit-Navisworks qui couvre la totalité des processus 3D, 4D et détection d'interférences. Le détail de ces outils et leurs principales fonctionnalités ont été exposé dans le chapitre 3.

De nombreux bugs ont été rencontrés lors de l'utilisation des éditions 2013 de ces logiciels, qui venaient alors de paraître sur le marché. D'après les expériences passées, il est recommandé de n'acheter les outils qu'après le premier SP1 ou attendre de déployer la technologie 6 ou 12 mois après leur introduction sur le marché.

Pour une organisation donnée, le choix de solutions pour la modélisation et la détection d'interférences peut également se porter vers d'autres outils, dont les principaux sont présentés dans la revue de littérature. Les critères de choix dépendent des besoins spécifiques de l'organisation et de son niveau de maturité technologique. Par ailleurs, il est préférable de déployer des technologies matures, reconnues sur le marché, requérant une customisation minimale et qui peuvent être utilisés de manière productive au sein de l'organisation.

4.3 Organisation

L'objet de cette partie est de montrer comment les intervenants devraient s'organiser autour de la détection d'interférences. La Figure 4.2 montre comment les tâches relatives au BIM sont traditionnellement réparties entre les intervenants.

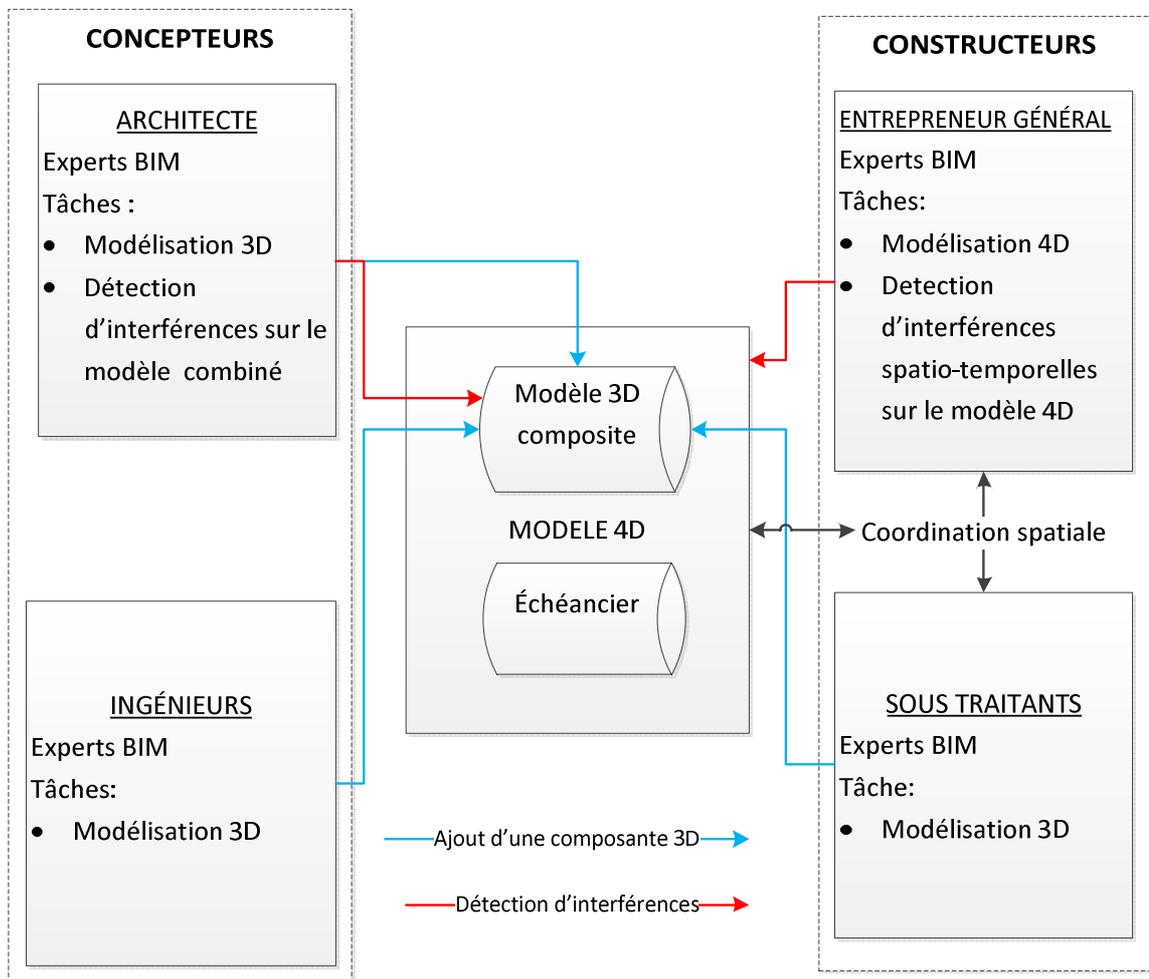


Figure 4.2 Responsabilités et Relations entre les différents intervenants

Bien que cette répartition des rôles puisse varier d'un projet à l'autre, dépendamment des modes de réalisation ou des ententes entre les partis, l'objectif de ce schéma est de comprendre comment les tâches relatives à détection d'interférences sont réalisées.

Habituellement, la tâche de réaliser le modèle 4D est attribuée à l'Entrepreneur Général ou au Gérant de construction, lorsque la 3D est prise en charge par l'Architecte. La détection d'interférences spatiotemporelle est surtout réalisée par l'entrepreneur ou les sous-traitants dans la mesure où il prendra en charges la réalisation des travaux. Tout problème pouvant survenir durant cette phase se répercutera en effet sur son échéancier. Pour une description

plus détaillée de l'assignation des tâches de modélisation en fonction des composantes du bâtiment (basée sur la norme Unifomat 2) se référer au Tableau-A IV-1 en Annexes.

4.4 Processus

La figure suivante décrit les étapes identifiées dans la cadre de la méthodologie de détection.

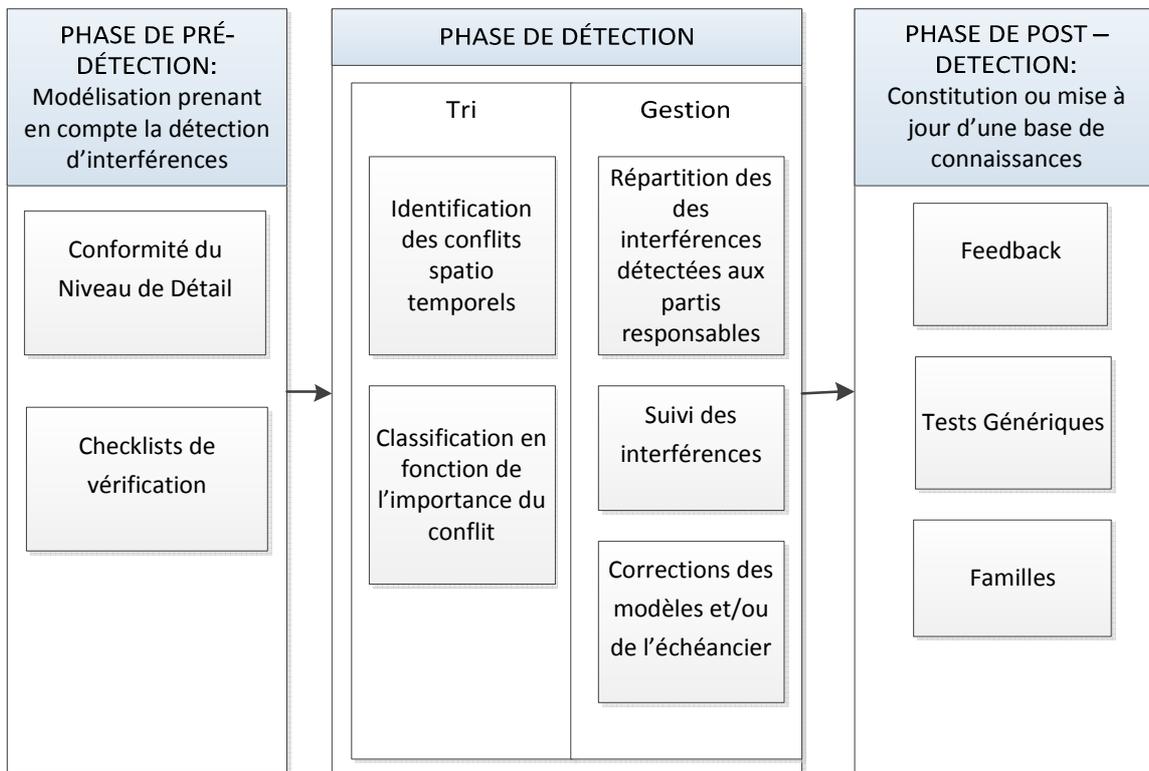


Figure 4.3 Étapes identifiées pour réaliser efficacement une détection d'interférences sur un modèle 4D

Le processus de détection d'interférences a été divisé en trois phases distinctes tel qu'il est ressorti de l'étude du modèle expérimental. Chacun des points constitutifs de ces phases vise à adresser spécifiquement un problème ou une contrainte relevée lors de l'analyse empirique. Chaque point sera expliqué plus en profondeur dans les paragraphes suivants.

4.4.1 Phase de Pré détection : Modélisation en vue de la détection d'interférences

Cette phase consiste à définir une approche de modélisation structurée et méthodique permettant d'éviter ou minimiser les problèmes liés à la modélisation. Pour cela, plusieurs points ont été identifiés.

4.4.1.1 Conformité au Niveau de détail

Problèmes adressés :

- Hétérogénéité des composantes du modèle 3D
- Manque de consistance par rapport à l'usage qui en est attendu

Afin de prendre en compte le niveau de détail, les documents suivants peuvent servir de guides et de références lors de la modélisation :

- La description des niveaux de détail (voir

- Tableau 4.1): pour fournir des références en fonction des phases du projet
- La progression du modèle (voir Tableau-A IV-1 en Annexes): Basé sur la structure de classification Unifomat II, ce tableau fournit une description précise du détail requis pour chaque composante du bâtiment.

Tableau 4.1 Description des niveaux de Détails
Tiré de Bedrick (2008) et American Institute of Architects (2008)

Niveau de détail	100	200	300	400	500
Contenu de la composante du modèle					
Conception et coordination	Données non-géométriques, surfaces, etc	Éléments génériques représentés en 3D : Taille maximale But	Éléments spécifiques, 3D définitive Géométrie des objets Dimensions Capacités Connections	Dessins de fabrication :	Tel que construit
Usages					
Planification 4D	Durée totale de construction du projet Phasage des éléments majeurs	Time-scaled, Apparition ordonnée des activités principales	Time-scaled, Apparition ordonnée des ensembles détaillés	Détails de fabrication et d'assemblages incluant les moyens et méthodes de construction (grues, étaielements,...)	

Niveau de détail du modèle tridimensionnel

Le niveau d'abstraction du modèle va dépendre en grande partie de la phase du projet et du niveau de détail requis pour le modèle pour les fins d'analyse. Il y a plusieurs niveaux de détails qui définissent l'évolution d'un modèle BIM. D'après Bedrick (2008), ces niveaux varient de 100 à 500 et comprennent les étapes: conceptuelle, géométrie approximative, géométrie précise, Fabrication, Tel que construit. Le niveau de détail va ainsi se raffiner à mesure que la quantité d'informations disponible sur la conception et la construction augmente. La définition de ce critère est primordiale pour permettre aux membres de l'équipe de savoir à quel niveau de détail ils doivent travailler. La réalisation et la fréquence des

détections d'interférences vont dépendre de la progression du niveau de détail dans la mesure où un LOD élevé traduit une complexité accrue du modèle.

L'Erreur ! Source du renvoi introuvable., tiré Autodesk (2008), décrit les séquences d'activités et leur répartition entre les différents intervenants en fonction de plusieurs modes de réalisation de projet (traditionnelle, design-Build et Integrated Project Delivery). Par exemple, dans un IPD la détection d'interférences s'effectue à partir de la conception détaillée (detailed design) soit à partir de LOD 300.

Le niveau de détail doit être uniforme c'est-à-dire qu'il doit être atteint par les sous-traitants ou les autres équipes responsables de la conception des systèmes.

Niveau de détail de l'échéancier

Outre le fait d'établir un niveau de détail suffisant dans le modèle 3D sur lequel sera basé le modèle 4D, il est également crucial d'avoir un échéancier complet et détaillé. Ceci afin d'inclure, simuler et analyser la totalité des activités requises. La pertinence du modèle 4D qui en résulte pour les fins d'analyse et de visualisation en dépend.

4.4.1.2 Checklists de modélisation

Problème adressé : manque de références et de structure claire pour la modélisation

Le modeleur de la maquette BIM occupe un rôle important dans le processus de détection d'interférences. Il serait préférable qu'il dispose d'une base de connaissances en construction, plus particulièrement au niveau de la mise en œuvre des éléments sur site. En effet, d'après l'analyse expérimentale réalisée, des conflits potentiels pouvant résulter d'une mauvaise représentation des composantes ont été identifiés dans le modèle. Par exemple, un modeleur non averti pourrait représenter un mur s'étalant sur deux niveaux par un seul bloc de mur, ce qui est erroné puisque le mur va s'arrêter à chaque niveau. Ce n'est donc pas un

mur qui devrait être modélisé mais deux murs distincts. Pourtant, cette lacune risque de masquer des conflits si jamais un élément venait à interférer avec ce mur.

Le modelleur pourrait aussi détecter des interférences et des problèmes dès la modélisation et éviter le temps perdu à les trier, les reporter et les corriger lors de la phase d'analyse de conflits.

Pour remédier à l'éventuelle inexpérience du modelleur et pour garantir la qualité du modèle, la solution avancée serait de développer des checklists de vérification. Un tel outil permettrait de s'assurer de la conformité d'un modèle en vue de l'analyse d'interférences. Ce document comprendrait une liste de points à vérifier, tels que des interférences récurrentes qui surviennent souvent mais qui peuvent être négligée (par exemple, la modélisation des conduits). Des extraits de tels checklists sont présentés en ANNEXE II.

Ces données relatives aux connaissances pourraient être intégrées directement dans les outils de conception. Les informations et les connaissances internes de l'entreprise seraient directement accessibles au modelleur. Cette approche est expliquée plus en détail dans la phase de post-détection.

4.4.2 Phase de détection : Identification, tri et gestion des conflits

Après la phase de modélisation 3D réalisée, l'étape suivante consiste à analyser la maquette numérique pour y déceler les interférences puis à s'assurer qu'ils soient éliminés.

4.4.2.1 Classification des conflits

Problème adressé : manque de tri et de raffinement des résultats de tests dans Navisworks

Les données brutes délivrées par les rapports de Navisworks font qu'un processus de tri doit être amorcé pour raffiner et classifier les problèmes et ainsi dégager ceux qui représentent un risque réel pour le projet.

Les niveaux d'importance suivants ont été identifiés pour être affectés à chaque conflit:

- **Majeur** : pouvant occasionner un impact élevé sur le projet (baisse de productivité et pertes économiques importantes engendrées par le conflit);
- **Moyen** : pouvant occasionner un impact moyen (baisse de productivité et pertes économiques moyennes engendrées par le conflit)
- **Faible** : Ne représentant aucun risque pour le projet (dû à la modélisation ou mineur)

4.4.2.2 Gestion et résolution des conflits

La gestion de conflits va consister à réaliser un suivi des conflits détectés et à s'assurer qu'ils soient tous corrigés. Navisworks est équipé de nombreux outils pour effectuer cette gestion.

Traitement des conflits

Problème adressé : Information brute et non valorisée par les rapports de Navisworks

Les rapports générés automatiquement par Navisworks ne contiennent pas de l'information valorisée. Il serait intéressant de compiler les conflits selon la classification proposée précédemment afin de dégager rapidement les conflits majeurs.

Un nouveau format de rapport a été pensé pour véhiculer rapidement les résultats d'une détection de conflit, contenant :

- Un sommaire montrant :
 - Le type d'analyse réalisé (intra ou inter disciplinaire)
 - Les fichiers utilisés avec leurs dates de dernière mise à jour
 - Le volume total de conflits critiques identifiés
 - Les conflits importants (majeurs et moyens)

- Une présentation détaillée des conflits selon la classification proposée (majeur, moyen et mineur). Les conflits de même nature (ex. maçonnerie/plomberie) devraient être agrégés pour faciliter la lecture du rapport. Il importe de présenter les conflits jugés mineurs à la fin du rapport car l'appréciation de leur gravité peut varier d'une personne à une autre.

Le contenu des rapports peut être enrichi grâce aux fonctionnalités suivantes :

- Redlining : des marquages et commentaires peuvent être insérés au niveau de la zone conflictuelle pour véhiculer l'information entre les acteurs impliqués;
- Outil de Mesure : pour obtenir des informations plus précises sur les dimensions et les distances

Le cheminement suivi pour traiter un conflit est décrit à l'annexe I : Processus de détection.

Correction du modèle 3D

En fonction des conflits identifiés, une correction dans le modèle Revit peut être nécessaire.

Pour cet aspect, on peut classer les conflits selon deux catégories :

- Ceux de faible importance (les faux conflits), qui peuvent être ignorés ou directement rectifiés dans le modèle original. ;
- Ceux de moyenne et haute importances, requérant une revue et une approbation des partis concernés, qui vont probablement nécessiter des modifications au niveau du design, puis une mise à jour du modèle.

Le processus de tri qui s'effectue est décrit dans l'annexe 1.

Puisque Navisworks est uniquement un outil d'analyse et de visualisation, et ne dispose pas de fonctions de modélisation, la correction doit se faire dans l'outil de conception, c'est-à-dire Revit. Faire des allers et retours entre les deux outils pour identifier et chercher individuellement chaque composante concernée par une modification peut s'avérer laborieux. Des extensions peuvent être installées dans Navisworks pour aider faciliter ce processus.

4.4.3 Phase de Post détection : Constitution d'une base de connaissances

Cette partie du plan est le fruit d'une réflexion par rapport à l'usage possible de l'importante quantité d'information qui a été générée pendant les phases de pré-détection et de post-détection. Elle vise également à créer des liens entre la détection d'interférences virtuelle et les interférences réelles sur chantier.

4.4.3.1 Feedback

Un feedback devrait être réalisé pour évaluer et mesurer l'efficacité du processus de détection réalisé sur un projet. Le but est de tirer des leçons si des erreurs ou des lacunes ont été commises.

Il est important de se constituer une base de connaissances interne suite à la détection d'interférences réalisée durant un projet et ce aussi bien du côté des concepteurs que des constructeurs :

- Pour les concepteurs (architectes – ingénieurs) : collecter les leçons apprises lors de la réalisation du modèle 3D : constitution ou enrichissement de gammes de familles d'objets internes et développement ou amélioration de protocoles de modélisation et de détections internes.
- Pour les constructeurs (entrepreneur général, sous-traitants) : développement de processus internes pour la modélisation 4D et la détection de conflits spatio temporels.

Une telle base de connaissances peut améliorer substantiellement la qualité des détections sur des projets similaires dans le futur et peut également permettre de réaliser des gains de coûts, notamment grâce aux économies sur les heures de travail consacrées à la modélisation.

Cette base de connaissance et les données qui la constituent pourraient être intégrées directement dans les outils de conception afin de faciliter leur accès par les utilisateurs. Cette approche consistant à utiliser le BIM comme une base de connaissances a été avancée dans plusieurs études (Fruchter, Schrotenboer et al. 2009; Meadati and Irizarry 2010). Revit dispose de fonctionnalités pour permettre un tel stockage à travers l'utilisation des « paramètres » comme illustré sur la Figure 4.4 et la Figure 4.5. Il s'agit plus particulièrement des « shared parameters » qui peuvent être partagées entre plusieurs projets et qui peuvent contenir de l'information textuelle ou des liens vers des documents externes associés à des objets, vues ou nomenclatures.

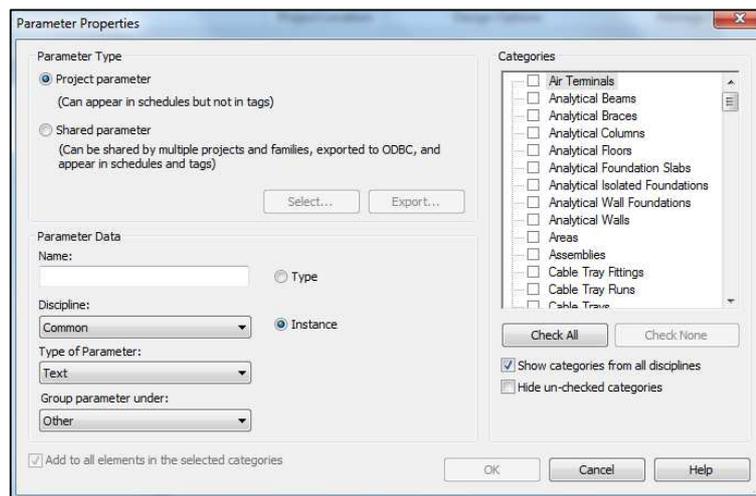


Figure 4.4 Addition d'un nouveau paramètre dans Revit

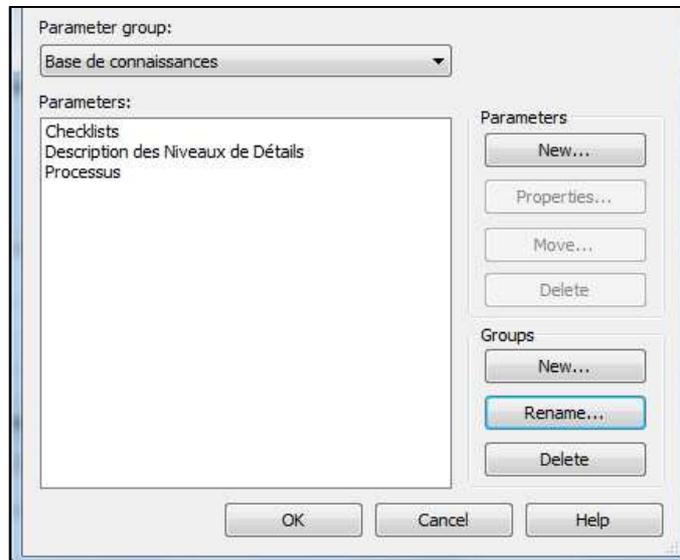


Figure 4.5 Base de connaissances rajoutée au projet

4.4.3.2 Stockage des tests répétitifs

Navisworks offre la possibilité de sauvegarder les tests réalisés sur un modèle 4D. Ces tests peuvent être stockés pour qu'ils puissent être réutilisés sur d'autres projets, plus particulièrement les tests répétitifs. Par exemple, il serait recommandé de sauvegarder un test qui détecte toutes les interférences entre les tuyaux d'un diamètre donné avec le modèle si un Entrepreneur donné rencontre souvent des conflits entre ces composantes.

4.4.3.3 Familles d'objets

Il serait intéressant de tirer profit des possibilités de la représentation paramétrique inhérente au BIM pour faciliter et améliorer la détection de conflits. Il serait ainsi judicieux de créer ses propres familles d'objets dans la mesure où l'efficacité d'une détection d'interférences va en grande partie dépendre de la qualité de la modélisation des éléments. Disposer d'une gamme de familles d'objets préétablie va faciliter cette modélisation. Les assemblages et les objets aux formes géométriques complexes devraient prioritairement être rajoutés.

4.4.3.4 Enrichir les checklists de modélisation

A partir de faux conflits et des conflits récurrents relevés, des instructions pour la modélisation peuvent être développés sous forme de checklists. Si de tels documents existent déjà, ils peuvent être enrichis par de nouvelles informations collectées lors des phases de pré-détection et/ou de détection.

4.4.3.5 Conflits non détectés survenus sur chantier

Des conflits qui n'ont pas été détectés par les outils d'analyse peuvent survenir sur chantier. De tels conflits devraient être documentés et stockés afin qu'ils puissent être pris en compte et rectifiés dans des projets similaires futurs.

A supposer que ces conflits n'ont pas été trouvés en raison d'un manque de modélisation (par exemple en raison d'un détail insuffisant, ou d'un élément manquant dans le modèle, etc.), ils peuvent apporter des informations pour savoir ce qui devrait être amélioré dans la modélisation de la maquette BIM.

CHAPITRE 5 VALIDATION

5.1 Objectifs

Les objectifs motivant cette phase de l'étude sont les suivants :

- **Valider les résultats de l'analyse expérimentale sur un projet réel** : cette étude constitue une occasion de participer au processus de détection d'interférences d'un projet réel.
- **Calibrer et ajuster le plan pour répondre aux contraintes existantes dans l'industrie** : le modèle expérimental et le plan de détection ont été réalisés en silo c'est-à-dire sans interactions actives avec les intervenants du projet. D'où l'importance d'étudier un projet réel pour capturer les contraintes et les problèmes pouvant survenir dans l'industrie, et ce afin d'enrichir le plan développé.

5.2 Cas étudié

5.2.1 Description du projet

Le modèle étudié est une maquette numérique d'un édifice multi-résidentiel à 6 étages entrant dans le cadre d'un projet pilote. Ce projet, qui est actuellement en cours de construction, a débuté en mai 2012 pour une livraison prévue en décembre 2012, soit une durée de 8 mois. Le site est localisé dans la banlieue de Montréal, à Longueuil.



Figure 5.1 Perspective du projet

Source : TLA Architectes 2012

5.2.2 Contexte du projet

La firme 3L innogénie a développé une technique innovante de construction pour des édifices élevés appelé Upbrella. L'étude menée par le laboratoire GRIDD de l'ÉTS, qui s'inscrit dans le cadre du présent projet pilote initié par 3L innogénie, se fixe deux objectifs distincts. D'une part, analyser les performances en termes de productivité entre la méthode de construction Upbrella et la construction dite traditionnelle, en se référant à des gabarits de mesure issus de la construction LEAN. Et d'autre part, développer une structure pour l'implémentation du BIM, à travers ses dimensions 3D et 4D, pour des fins de gestion de chantier. A cette fin, un modèle BIM du projet a été modélisé.

- **Le GRIDD :** Le GRIDD (Laboratoire de Recherche en Intégration et Développement Durable en Environnement Bâti) est composé de chercheurs et d'étudiants à l'ÉTS en génie de la construction et à l'Université de Colombie-Britannique, en génie civil. Sa mission est de transformer la façon de pratiquer et d'enseigner la construction au Québec pour un cadre bâti durable.
- **3L innogénie :** est une PME québécoise spécialisée dans la gestion de la propriété intellectuelle et dans le développement de solutions technologiques et de processus

innovants. Le système « Upbrella » est le résultat du partenariat entre le groupe PACO, les produits Fraco et Global Tardif Elevator Manufacturing Group.

Le système Upbrella

Upbrella est un concept de construction verticale progressive, au rythme de la demande, qui promet de réduire les risques associés à la construction en hauteur (gratte-ciel, tours). 3L INNOGENIE propose d'utiliser des équipements et une technique conçus spécifiquement pour permettre de construire à l'abri et permettre l'occupation progressive. La méthode Upbrella permet ainsi d'éviter de supporter financièrement des étages vides et de construire de façon responsable, en limitant l'impact urbain et en réduisant les accidents de travail. Les composantes du système sont illustrées sur la Figure 5.2.

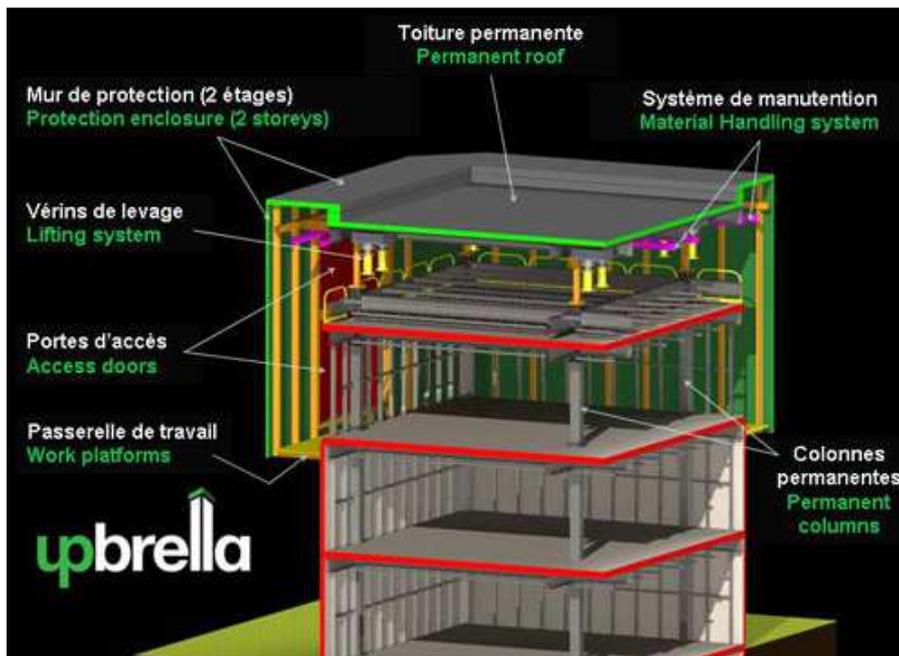


Figure 5.2 Système Upbrella
Source: 3L-innogénie (2012)

Dans le but de démontrer l'efficacité du système Upbrella, il a été décidé que les 4 premiers niveaux de ce projet pilote seraient construits avec les techniques de construction traditionnelles tandis que les derniers niveaux seraient montés avec ce système novateur.

Intérêts du BIM4D et de la détection d'interférences dans ce contexte

- Le BIM 4D et la détection d'interférences ont été identifiés comme étant des facettes du BIM pouvant apporter une plus-value importante pour un projet réalisé avec Upbrella en améliorant la planification et la visualisation des activités dans le système;
- Une simulation 4D pourrait mettre en évidence les problèmes de flux (matériaux, main d'œuvre et équipements) prenant place dans l'environnement confiné créé, d'une part, par le système Upbrella, et, d'autre part, par les dimensions restreintes du bâtiment étudié;
- La détection d'interférences dynamiques jouerait un rôle important pour identifier les conflits potentiels entre les composantes mobiles du système Upbrella (système de levage, transporteur, ascenseur) et les composantes du bâtiment ou les espaces de travail.

5.2.3 Processus de modélisation

Le processus emprunté pour la modélisation présente de nombreuses similitudes avec celui de l'analyse expérimentale.

La conception du projet a été réalisée suivant la méthode traditionnelle c'est-à-dire basée entièrement sur des plans 2D. A partir des dessins Autocad et PDF fournis par les professionnels, le projet a été re-modélisé dans un environnement BIM. La partie architecturale a été réalisée avec Revit Architecture 2013, la partie structurale avec Revit Structure 2013 et la partie mécanique avec Revit MEP 2013.

Les modèles 3D ont ensuite été combinés par le biais de l'outil d'intégration Navisworks Manage 2013. Puis l'échéancier MS Project a été incorporé pour monter la maquette 4D.

5.2.3.1 Modèles 3D

Comme la conception de l'édifice n'est pas encore totalement achevée à l'heure actuelle, le processus de montage de la maquette virtuelle est encore en cours et certaines parties ne sont pas encore complètement modélisées.

Les pourcentages de modélisation des disciplines ainsi que les composantes représentées sont les suivants :

- Architecture : complété à 100%, comprenant les murs intérieurs, murs rideaux, portes, fenêtres
- Structure : complété à 100%, comprenant fondations, murs de fondations, structure d'acier (poteaux, poutres), platelage métallique, dalles de béton.
- MEP : complété à 15% (seul le premier niveau a été modélisé pour le moment), comprenant l'électricité, la plomberie et le système de chauffage, ventilation et climatisation

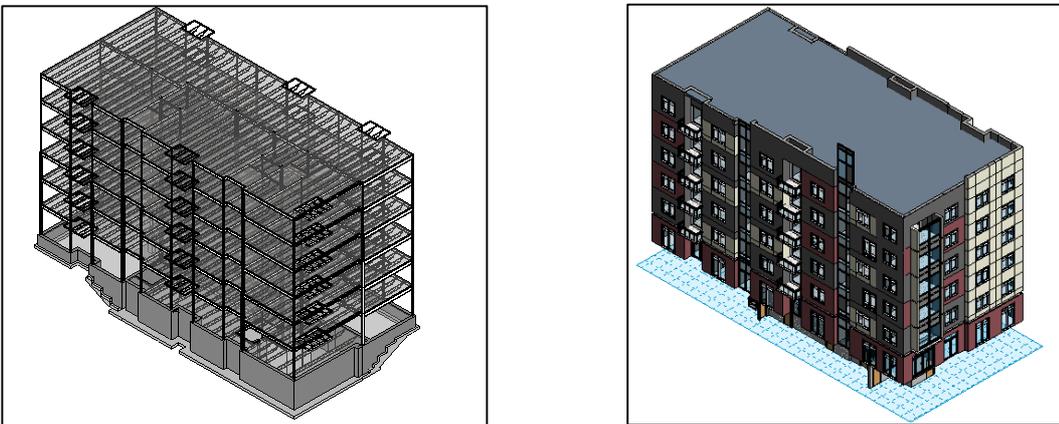


Figure 5.3 Modèles structure et architecture du projet Upbrella

5.2.3.2 Modèle 4D

Échéancier

L'échéancier original du projet a été fourni sous la forme d'un fichier MS Project. Il comptait 150 activités incluant les activités principales liées aux différentes disciplines et au montage du système Upbrella. Cette planification comprenait un nombre limité de sous-activités.

Simulation 4D

Une simulation de la construction du bâtiment a été montée à partir de l'échéancier fourni. Bien que celui-ci manquait de détails, le modèle 4D était davantage destiné à des fins de démonstration de simulation virtuelle après des professionnels, que pour constituer un véritable outil pour la planification des travaux. Dans ce dernier cas, il aurait été nécessaire que l'échéancier soit détaillé.

En revanche, il est prévu de réaliser une simulation plus poussée dans l'environnement Upbrella dans l'optique de préparer les intervenants du projet à cette méthode inédite de construction. Pour monter une telle simulation, des informations plus précises sont requises :

- Les plans d'installation et de montage complets du système Upbrella sont nécessaires afin de connaître les dimensions exactes et les configurations des composantes;
- Des données détaillées concernant les planifications journalières c'est-à-dire relatives aux flux de main d'œuvre et de matériaux pendant l'utilisation du système.

5.3 Processus de détection

5.3.1 Approche de détection

Les processus génériques développés ont été utilisés pour faire ressortir les différents problèmes dans le modèle 4D.

La première étape a consisté à détecter les conflits statiques « durs ». Une analyse interdisciplinaire entre l'architecture et la structure a été réalisée. La complétion du modèle MEP est attendue pour pouvoir mener des combinaisons de détections avec cette discipline. La seconde étape va consister à analyser les conflits dynamiques après la modélisation du système Upbrella.

5.3.2 Résultats

A l'heure où sont écrites ces lignes, aucun conflit majeur n'a encore été identifié. Cela est dû à l'absence d'analyse interdisciplinaire avec le modèle MEP. Pourtant, comme l'a montré l'étude du modèle expérimental, c'est avec cette discipline que les conflits les plus pertinents sont recensés.

5.4 Problèmes et contraintes rencontrés

Bien que les résultats concernant la détection d'interférences n'aient pas été concluant, ce projet pilote aura permis de dégager plusieurs contraintes et problèmes touchants au développement d'une maquette BIM dans un contexte réel. Certains de ces problèmes ont été identifiés lors de l'analyse expérimentale et ont donc été confirmés dans un cadre réel.

Contraintes liées au projet

- **Difficultés de cohabitation entre la recherche et l'industrie** : ce cas de validation a été entrepris dans le cadre d'une coopération entre la recherche et l'industrie. Cette coopération n'est pas toujours fluide car les professionnels ont parfois des préjugés par rapport au monde académique. Les motivations de la recherche effectuée n'étaient parfois pas comprises et obtenir de l'information pertinente et à jour pour l'étude auprès des ressources concernées n'était pas toujours chose aisée;
- **Résistance au changement** : Certains professionnels ont clairement exprimé leur volonté de conserver leurs pratiques actuelles de travail et leur rejet des nouvelles

technologies. Malgré les bénéfices évidents du BIM, son adoption se heurte parfois à une barrière psychologique, principalement de la part des professionnels expérimentés.

Contraintes liées à la détection d'interférences

- **Implication tardive** : L'implication tardive dans le projet a limité la validation complète du plan d'interférences proposé. Les recommandations touchant la phase pré-détection n'ont par exemple pas pu être testées. De plus, étant donné que la détection d'interférences a été réalisée uniquement pour des fins de démonstration dans le cadre d'un partenariat entre l'industrie et la recherche, la réalisation de la phase de post détection, consistant en la mise en place d'une base de connaissances, n'était pas réellement justifiée et n'a donc pas été entamée.
- **Envergure du projet** : L'envergure restreinte du projet, en termes de complexité et de dimensions, limite son intérêt comme cas d'étude pour la détection d'interférences.

Contraintes liées au développement du modèle 3D

- **Difficultés à maintenir un modèle à jour**. En raison de la nature dynamique des plans du fait que la conception est encore en cours, les plans parvenant au modeleur étaient parfois datés. Bien qu'une ressource du GRIDD présente sur le chantier fût chargée de faire la liaison entre les professionnels et le modeleur en assurant l'approvisionnement régulière en plans, des difficultés ont été éprouvées pour maintenir le modèle à jour. Par ailleurs, cette tâche de mettre à jour le modèle est fastidieuse car elle doit se faire de manière continue. Cette situation fait en sorte que des conflits identifiés et rapportés peuvent ne plus être d'actualité si leurs causes ont été corrigées dans les dernières versions des plans.
- **Manque de détails ou incohérence des plans** : les plans PDF et DWG fournis par les professionnels montraient parfois de l'information manquante ou contradictoire

laissant au modelleur le choix de les interpréter. Chercher ou confirmer cette information auprès de la personne responsable était parfois difficile. Par conséquent, le modèle généré ne reflète pas totalement la réalité;

Contraintes liées au développement du modèle 4D

- **Manque de détail de l'échéancier** : l'échéancier fourni ne disposait pas d'un niveau de détail suffisant qui permettrait de monter une simulation 4D reflétant le processus de construction réel du bâtiment.

5.5 Ajustements du Plan de détection

Les contraintes identifiées lors de l'étude du projet Upbrella vont permettre d'apporter des ajustements au niveau du plan de détection d'interférence.

Considération du facteur humain dans l'aspect organisationnel

La prise en compte du facteur humain est primordiale dans toute implémentation d'une nouvelle technologie. Dans le cas d'un projet utilisant la détection d'interférences dans un environnement BIM par exemple, des stratégies doivent être dressées pour motiver, d'une part, les personnes à effectuer la transition vers ces nouvelles pratiques et, d'autre part, à maintenir ces pratiques si elles ont déjà été adoptées.

Mettre à disposition du modelleur de l'information à jour

Les difficultés pour avoir un modèle à jour ont été rencontrées à la fois lors de l'étude expérimentale et lors de la validation. Bien que l'organisation et les intervenants varient en fonction des projets, ces problèmes peuvent être adressés en intégrant adéquatement le modelleur dans le processus de conception. Ainsi, lors de la phase de pré-détection, des moyens doivent être mis en place pour assurer la disponibilité de l'information auprès des

ressources chargées de maintenir la maquette numérique (fournir au modéleur les contacts des personnes-clés, motiver la coopération des concepteurs, etc.)

Besoin d'homogénéité entre les niveaux de détail de l'échéancier et du modèle 3D

Il est nécessaire d'uniformiser les niveaux de détail entre l'échéancier et le modèle 3D en fixant dès le début de la modélisation 3D les objectifs attendus de la 4D. Ceci afin de garantir que toutes les activités dans l'échéancier correspondent à une composante du modèle 3D et vice versa.

Les problèmes qui ont été confirmés sur ce projet, c'est-à-dire ceux relatifs au niveau de détail et à la mise à jour du modèle, devraient être classifiés comme étant critiques dans le plan de détection d'interférences dans la mesure où ce sont des problèmes récurrents, qui risquent de survenir sur d'autres projets.

5.6 Discussion

L'étude du projet Upbrella a permis une validation partielle du Plan proposé, principalement au niveau des problèmes dans le développement du modèle touchant aux phases de pré-détection et de détection. Elle n'a pas été riche en termes de cas d'interférences mais a permis de constater les contraintes relatives à l'utilisation du BIM dans un contexte réel avec les problèmes organisationnels et humains qui en découle.

Des ajustements ont ainsi pu être apportés au Plan de détection d'interférences. Ce processus de compilation de problèmes et d'ajustement devrait être continu au sein d'une organisation donnée. Par conséquent, la structure de détection devrait évoluer et être enrichie au fur et à mesure des projets.

CONCLUSION

Accomplir un projet avec zéro interférence semble utopique en raison de l'environnement restreint en construction couplé à la densité des équipes sur le terrain et à la complexité croissante des composantes et des systèmes des bâtiments. Néanmoins, une approche structurée de détection d'interférences axée autour du BIM 4D, un nouvel outil de visualisation, d'intégration et d'analyse, permettrait de réduire considérablement les conflits sur chantier, d'améliorer la coordination entre les partis, d'accroître la productivité des équipes, et ultimement de réduire le coût final du projet et l'échéancier. La revue de la documentation relative à des projets antérieurs a permis d'évaluer l'impact financier des interférences. En moyenne, un conflit de conception sur chantier se chiffre à 17 000 \$ et un intervalle plus large situe ce coût entre 1500 et 60 000\$. Ces montants comprennent la perte de productivité découlant du conflit, le coût de la correction et l'impact sur les tâches subséquentes. Pouvoir simuler une maquette « intelligente » virtuellement dans l'espace et dans le temps constitue une grande avancée pour résoudre le problème récurrent et coûteux des interférences.

La revue de littérature a permis de répertorier et classifier les interférences susceptibles de survenir dans un projet de construction. Une interférence du point de vue d'un gestionnaire de projet impliquera davantage des espaces (congestion des équipes de travail, risques de sécurité, etc.) alors qu'une interférence du point de vue des outils de CAO mettra en jeu des collisions entre des composantes du bâtiment (par exemple une poutre interférant avec un conduit).

L'objectif de ce projet d'application était de développer un plan pour l'analyse, la détection et la correction des interférences dans un environnement 4D.

Le développement et l'étude d'un modèle expérimental a permis de dégager les flux de travail associés aux BIM 3D et 4D. De nombreux problèmes et contraintes ont été identifiés

et les solutions trouvées pour y remédier ont permis de jeter les bases d'une structure méthodologique pour la détection d'interférences.

Le plan proposé est fondé sur la structure du *BIM execution plan* du NBIMS un document de référence qui définit une stratégie d'implémentation du BIM au sein d'une organisation ou sur un projet. L'approche du *BIM execution plan* abordant les aspects Technologie, Organisation et Processus a été adaptée pour standardiser et formaliser la détection d'interférences. Des processus génériques de travail basés sur le tandem Revit-Navisworks ont été développés afin de visualiser les séquences d'activités, les échanges d'informations et les répartitions des rôles et des responsabilités. Des documents de support ont également été proposés afin de soutenir ces processus. Le plan a été développé de manière à faire partie intégrante d'une stratégie globale d'entreprise concernant le BIM.

Les professionnels de la construction ont parfois une mauvaise représentation de la détection d'interférences en ce sens qu'ils la limite à simplement appuyer sur un bouton qui leur génèrera une liste de conflits identifiés dans leur modèle. Cependant, pour traiter efficacement ce problème et pour tirer pleinement partie des avantages offerts par le BIM, la détection d'interférences devrait être abordée méthodiquement. Suite à l'approche empirique adoptée, le processus a été subdivisé en trois phases distinctes:

- Phase de pré-détection : Il est ressorti que la détection d'interférences se prépare dès la conception du modèle BIM et qu'une modélisation structurée devrait être entreprise. La problématique des niveaux de détails est particulièrement critique à ce stade;
- Phase de détection : Une approche de gestion et de correction a été présentée afin d'identifier, trier et classifier les multiples types d'interférences puis de s'assurer qu'ils soient pris en compte efficacement et qu'ils soient totalement éliminés du modèle;
- Phase de post-détection : Une importante quantité d'information est générée pendant les deux premières phases. Cette phase vise à capturer, traiter et stocker ces données

de manière à se constituer ou à mettre à jour une base de connaissances relative aux différents aspects du BIM touchés lors de l'analyse d'interférences.

L'étude d'un projet pilote a permis une validation partielle de la structure proposée, principalement au niveau phases de pré-détection et de détection touchant les aspects relatifs au développement du modèle et à l'identification de problèmes. Elle n'a pas été riche en termes de cas d'interférences mais a permis de constater les contraintes relatives à l'utilisation du BIM dans un contexte réel avec les problèmes organisationnels et humains qui en découle. Le modèle expérimental a en effet été réalisé en silo, sans interactions avec les professionnels et l'industrie.

Des ajustements ont ainsi pu être apportés au Plan de détection d'interférences. Ce processus de compilation de problèmes et d'ajustement devrait être continu au sein d'une organisation donnée. Par conséquent, la structure de détection devrait évoluer et être enrichie au fur et à mesure des projets.

RECOMMANDATIONS

En raison des contraintes de temps dans lesquelles cette étude a été menée, seulement une portion du projet retenu pour l'analyse expérimental a été modélisée et les niveaux de détail des systèmes du bâtiment n'ont pas pu être poussés en profondeur. Par ailleurs, le processus de validation sur un projet réel n'a pas pu être complété dans sa totalité. Ainsi, des analyses supplémentaires et des calibrages sur des projets de plus grands envergures, plus complexes et plus détaillés permettraient de raffiner l'étude et d'aboutir à un plan plus complet.

Sur le projet utilisé pour validation, les processus BIM « traditionnel » consistant en différents professionnels travaillant de concert sur la conception d'un modèle unique, suivi d'un processus de détection d'interférence intégré impliquant la coordination entre ces intervenants n'ont pas été suivis. La prise en charge de ces tâches a été effectuée en interne au sein du GRIDD. Peu de données sur cet composante organisationnelle de la détection d'interférences, c'est-à-dire sur les contraintes de communication ou coordination entre les différents intervenants pour résoudre les conflits, n'a donc pu être analysée. Cet aspect du Plan pourrait être étoffé et faire l'objet d'études futures.

Dans le cadre de cette étude, les seuls outils BIM employés se sont limités aux trois versions de Revit et à Navisworks Manage, qui sont tous édités par la firme Autodesk. La raison ayant motivé ce choix étant que Revit et Navisworks sont les logiciels les plus populaires dans l'industrie à l'heure actuelle, en occupant une grande part du marché. Toutefois, un comparatif de la détection d'interférences réalisée avec d'autres outils tels que ProjectWise Navigator pourrait être fait. Ceci afin d'évaluer les points faibles et les points forts des uns par rapport aux autres mais surtout pour adapter le plan de détection aux flux de travail spécifiques de ces outils existants.

Les tests effectués avec Navisworks ont permis de se rendre compte que l'intelligence artificielle à l'œuvre pour l'analyse des interférences pourrait être largement améliorée. Cet outil de détection pourrait avoir des facultés d'analyse plus poussées afin de rendre la

détection d'interférences plus efficace. Par exemple, un filtre devrait être appliqué pour supprimer automatiquement des résultats les conflits de faible importance. Ce tri doit encore être effectué manuellement ce qui augmente le risque d'erreurs et d'oubli lié au facteur humain. Le recours à des connaissances et des raisonnements pour le traitement des conflits apporterait également des améliorations considérables. Dans le même registre, les outils 4D devraient détecter automatiquement les problèmes dans l'échéancier et être plus intelligents. Ils pourraient utiliser la sémantique dans la maquette BIM pour raisonner et détecter des omissions.

Les fonctionnalités d'analyse de conflits d'espaces (sécurité, congestion, etc.) demeurent inexistantes dans les outils BIM actuels. Des études et recherches antérieures ont pourtant conduit à l'élaboration de tels outils (Akinici, Staub et al. 1997; Koo and Fischer 1998; Wu and Chiu 2010) mais leur intégration dans une application BIM n'a pas encore été amorcée.

L'analyse des coûts associés aux interférences pourraient également être automatisée. Lors d'un conflit spatio-temporel, l'application pourrait par exemple identifier les espaces en conflit, analyser la gravité et durée de l'interférence puis faire ressortir les coûts associés en consultant une base de données de coûts.

ANNEXE I

PROCESSUS GÉNÉRIQUES

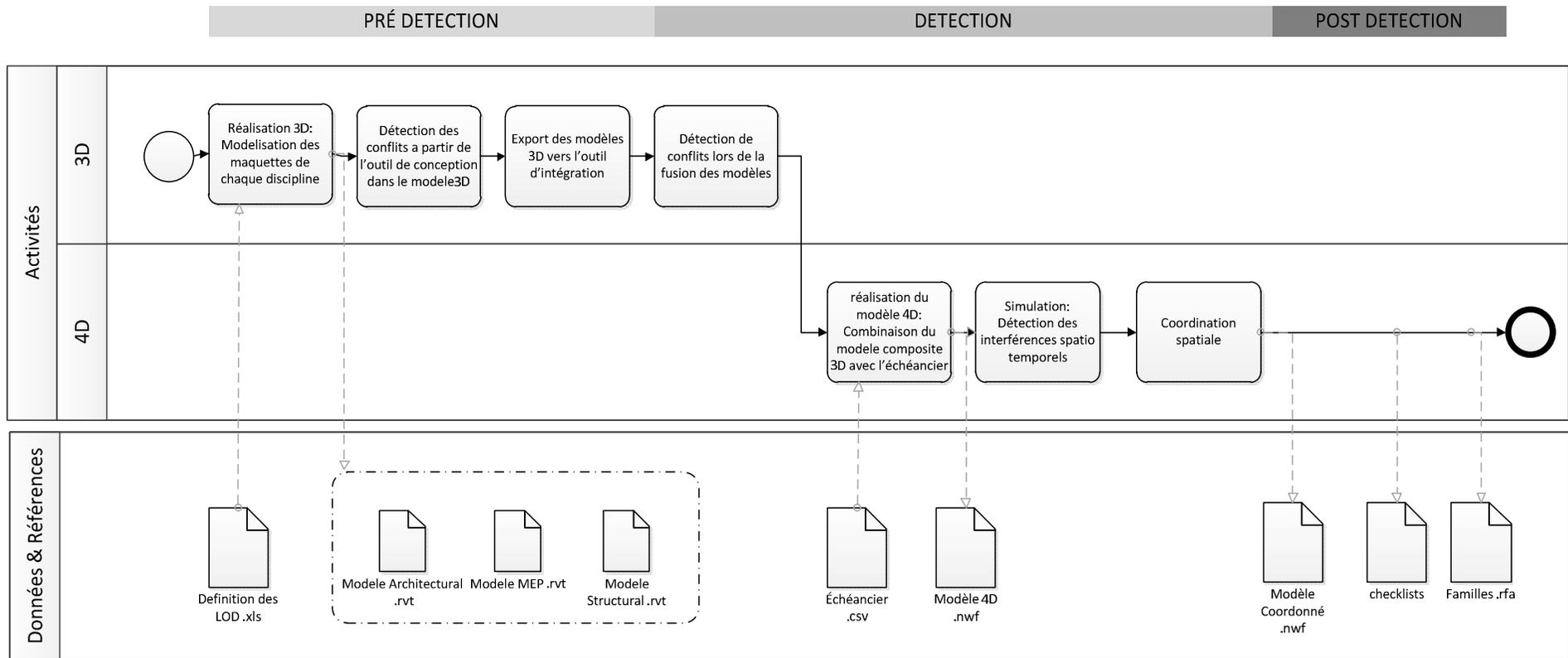


Figure-A I.1 Phases de modélisation

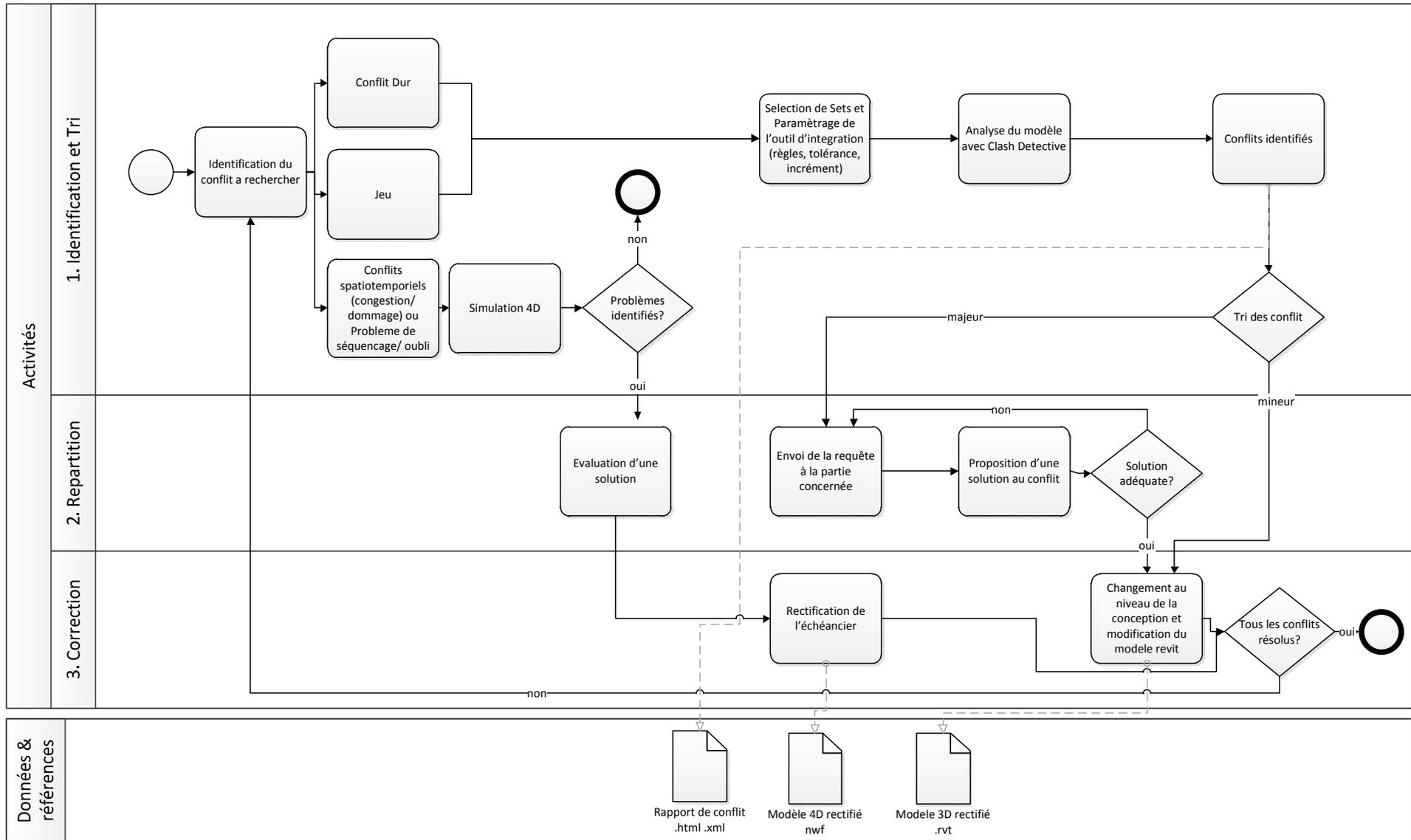


Figure-A I.2 Processus de détection

ANNEXE II

CHECKLISTS

Tableau-A II-1 Extrait de checklist de vérification

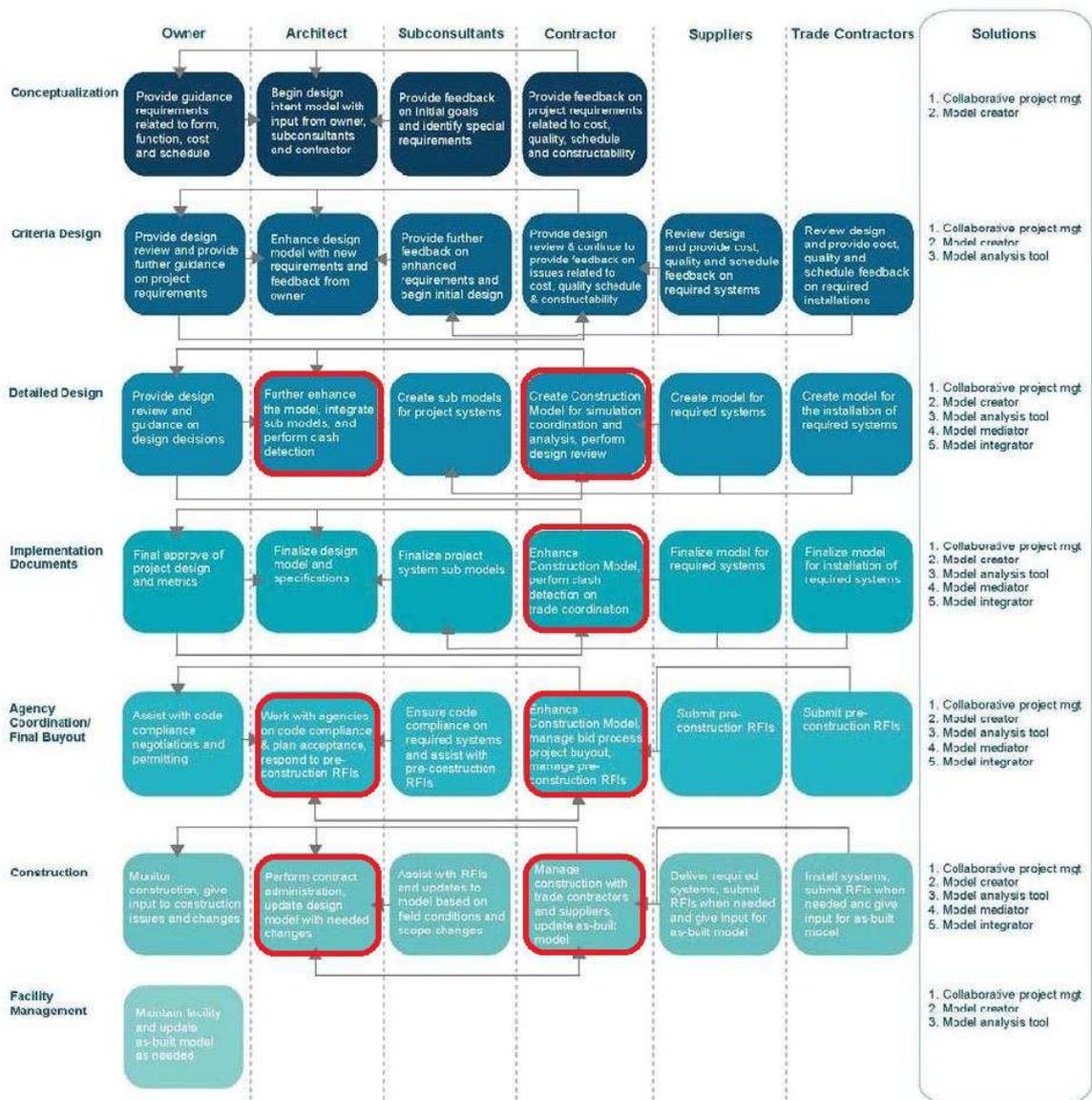
ETAPES	DEFINITION	VÉRIFICATIONS	X
3D			
Vérification visuelle	Effectuer une revue d'ensemble du modèle	<ul style="list-style-type: none"> • Les axes et les niveaux sont-ils correctement placés? ... 	
Verification de la qualité du modele	S'assurer que la conception a été respectée et qu'il n'y a pas d'éléments imprévus dans le modèle	<ul style="list-style-type: none"> • Le niveau de détail est-il adéquat? • Les composantes du bâtiment sont-elles correctement modélisées? Correspondent-elles à la réalité sur chantier? • Les composantes sont-elles toutes correctement liées les unes aux autres? • Tous les espaces sont-ils clos? • Les doublons dans le modèle ont-ils tous été analysés et éliminés? ... 	
Vérification des interférences	Détecter les problèmes dans le modèle impliquant des conflits entre éléments ou pouvant générer des interférences	<ul style="list-style-type: none"> • Vérifier les interférences avec les murs porteurs • Vérifier si l'espace autour des tuyaux est suffisant pour pouvoir y installer l'isolation ... 	

ETAPES	DEFINITION	VÉRIFICATIONS	X
4D			
Vérification de la qualité du modèle	S'assurer que la conception a été respectée et qu'il n'y a pas d'éléments imprévus dans le modèle	Les activités sont-elles séquencées logiquement?	
Vérification des interférences	Détecter les problèmes dans le modèle impliquant des conflits entre éléments ou pouvant générer des interférences	<ul style="list-style-type: none"> • Tous les types d'interférences ont-ils été analysés • Toutes les combinaisons de sets ont-elles été analysées? 	

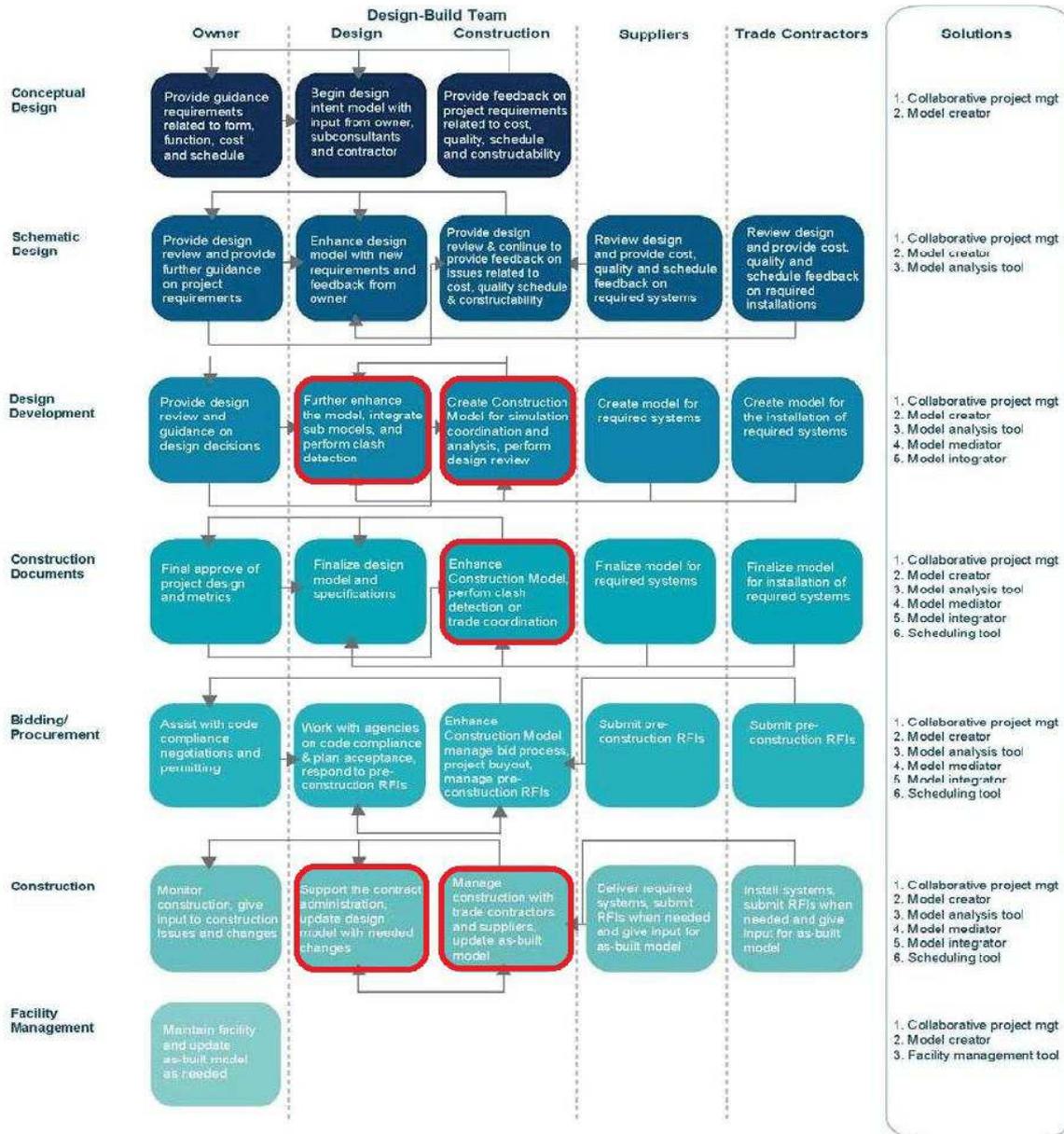
ANNEXE III

LA DÉTECTION D'INTERFÉRENCES DANS DIFFÉRENTS MODES DE RÉALISATION

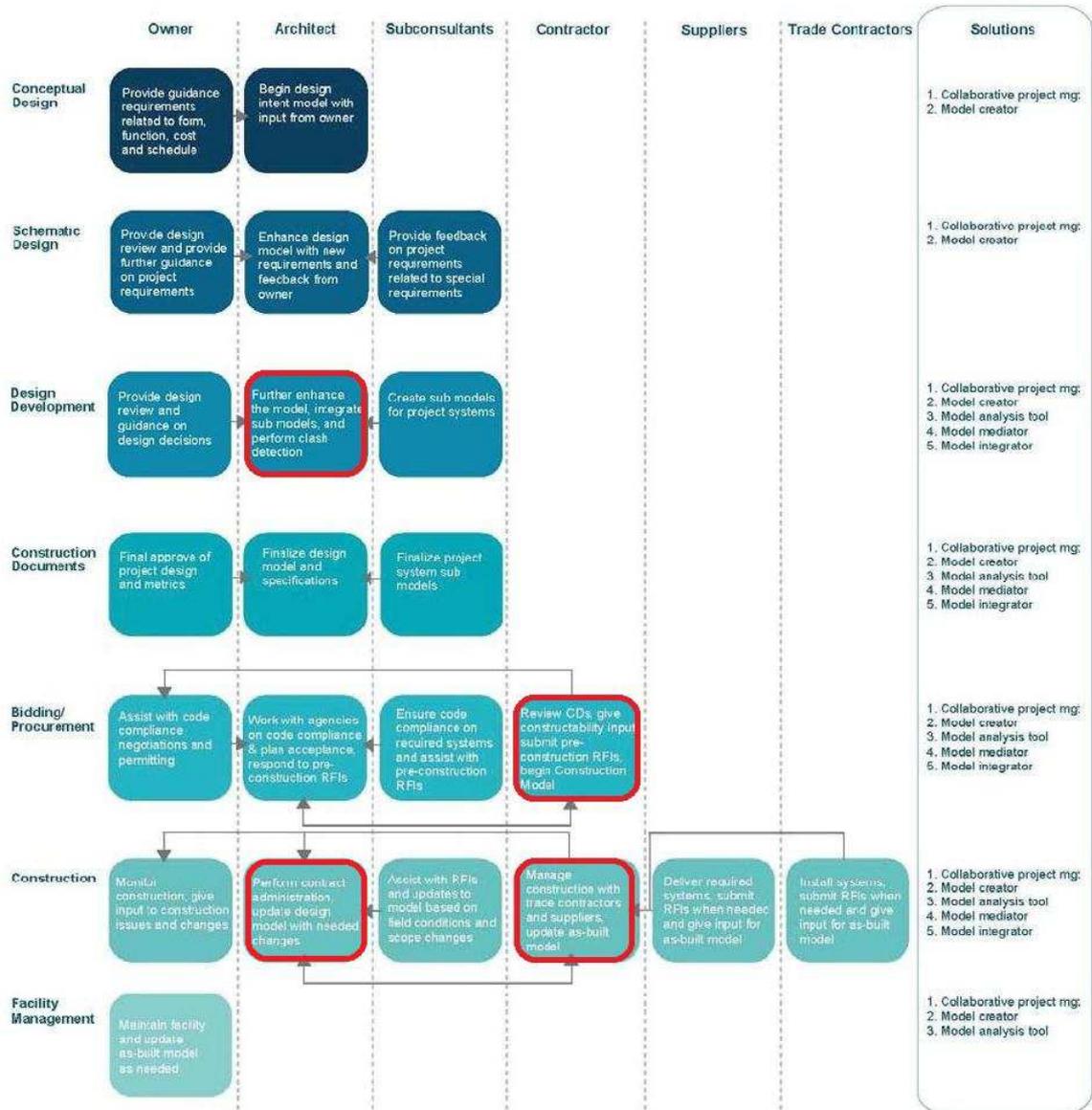
Integrated Project Delivery (Autodesk 2008)



Design-Build (Autodesk 2008)



Mode Traditionnel (Design- Bid- Build)



ANNEXE IV

PROGRESSION DU NIVEAU DE DÉTAIL POUR CHAQUE COMPOSANTE DU BÂTIMENT

(PD: Prime Designer; DC: Design Consultant; PC: Prime Constructor; TC: Trade Contractors; S: Suppliers)

Tableau-A IV-1 Spécification des niveaux de détail , tiré de American Institute of Architects (2008)

Element (ASTM Uniformat II Classification)					Level of Detail (LOD) and Model Component Author (MCA)								
					Conceptual-ization		Criteria Design		Detailed Design		Implemen-tation Docs		
					LOD	MCA	LOD	MCA	LOD	MCA	LOD	MCA	
A	SUBSTRUCTURE	A10	Foundations	A1010	Standard Foundations	100	PD	200	DC	300	TC	400	TC
				A1020	Special Foundations	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC
				A1030	Slab on Grade	100	PD	200	DC	300	TC	400	TC
		A20	Basement Construction	A2010	Basement Excavation	100	PD	200	DC	300	TC	300	TC
				A2020	Basement Walls	100	PD	200	DC	300	TC	400	TC
B	SHELL	B10	Superstructure	B1010	Floor Construction	100	PD	200	PD	300	PD	300	PC
				B1020	Roof Construction	100	PD	200	PD	300	PD	300	PC
		B20	Exterior Enclosure	B2010	Exterior Walls	100	PD	200	PD	300	TC	400	TC
				B2020	Exterior Windows	100	PD	200	PD	300	TC	400	TC
				B2030	Exterior Doors	100	PD	200	PD	300	TC	400	TC
		B30	Roofing	B3010	Roof Coverings	100	PD	200	PD	300	TC	300	TC
				B3020	Roof Openings	100	PD	200	PD	300	TC	300	TC
C	INTERIORS	C10	Interior Construction	C1010	Partitions	100	PD	200	PD	300	PD	400	TC
				C1020	Interior Doors	100	PD	200	PD	300	PD	400	TC
				C1030	Fittings	100	PD	100	PD	300	PD	400	TC
		C20	Stairs	C2010	Stair Construction	100	PD	200	PD	300	TC	400	TC

Element (ASTM Uniformat II Classification)				Level of Detail (LOD) and Model Component Author (MCA)									
				Conceptual-ization		Criteria Design		Detailed Design		Implemen-tation Docs			
		C2020	Stair Finishes	100	PD	100	PD	100	TC	100	TC		
	C30	Interior Finishes	C3010	Wall Finishes	100	PD	100	PD	100	PD	100	TC	
			C3020	Floor Finishes	100	PD	100	PD	100	PD	100	TC	
			C3030	Ceiling Finishes	100	PD	100	PD	100	PD	100	TC	
D	SERVICES	D10	Conveying	D1010	Elevators & Lifts	100	PD	200	PD	300	DC	400	TC
				D1020	Escalators & Moving Walks	100	PD	200	PD	300	DC	400	TC
				D1030	Other Conveying Systems	100	PD	200	PD	300	DC	400	TC
		D20	Plumbing	D2010	Plumbing Fixtures	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC
				D2020	Domestic Water Distribution	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC
				D2030	Sanitary Waste	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC
				D2040	Rain Water Drainage	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC
				D2090	Other Plumbing Systems	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC
		D30	HVAC	D3010	Energy Supply	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC
				D3020	Heat Generating Systems	100	PD	200	DC	300	TC	400	TC
				D3030	Cooling Generating Systems	100	PD	200	DC	300	TC	400	TC
				D3040	Distribution Systems	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC
				D3050	Terminal & Package Units	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC
				D3060	Controls & Instrumentation	100	PD	100	DC	100	TC	100	TC
				D3070	Systems Testing & Balancing	100	PD	100	DC	100	TC	100	TC
			D3090	Other HVAC Systems	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC	

Element (ASTM Uniformat II Classification)				Level of Detail (LOD) and Model Component Author (MCA)									
				Conceptual-ization		Criteria Design		Detailed Design		Implemen-tation Docs			
			& Equipment										
	D40	Fire Protection	D4010	Sprinklers	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC	
			D4020	Standpipes	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC	
			D4030	Fire Protection Specialties	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC	
			D4090	Other Fire Protection Systems	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC	
	D50	Electrical	D5010	Electrical Service & Distribution	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC	
			D5020	Lighting and Branch Wiring	100	PD	100	DC	300/100*	TC	400/100*	TC	
			D5030	Communications & Security	100	PD	100	DC	100	TC	100	TC	
			D5090	Other Electrical Systems	100	PD	100	DC	100	TC	100	TC	
E	EQUIPMENT & FURNISHINGS	E10	Equipment	E1010	Commercial Equipment	100	PD	100	PD	300	TC	400	TC
				E1020	Institutional Equipment	100	PD	100	PD	300	TC	400	TC
				E1030	Vehicular Equipment	100	PD	100	PD	300	TC	400	TC
				E1090	Other Equipment	100	PD	100	PD	300	TC	400	TC
		E20	Furnishings	E2010	Fixed Furnishings	100	PD	100	PD	300	PD	400	PD
				E2020	Movable Furnishings	100	PD	100	PD	100	PD	100	PD
F	SPECIAL CONSTR. & DEMO	F10	Special Construction	F1010	Special Structures	100	PD	200	PD	300	PD	400	PD
				F1020	Integrated Construction	100	PD	100	PD	300	PD	400	PD
				F1030	Special Construction Systems	100	PD	100	PD	300	PD	400	PD
				F1040	Special Facilities	100	PD	100	PD	300	PD	400	PD
				F1050	Special Controls &	100	PD	100	PD	100	PD	100	PD

Element (ASTM Uniformat II Classification)					Level of Detail (LOD) and Model Component Author (MCA)									
					Conceptual-ization		Criteria Design		Detailed Design		Implemen-tation Docs			
				Instrumentation										
	F20	Selective Bldg Demo	F2010	Building Elements Demolition	100	PD	200	PD	300	PD	400	TC		
			F2020	Hazardous Components Abatement	100	PD	100	PD	100	PD	100	TC		
G	BUILDING SITEWORK	G10	Site Preparation	G1010	Site Clearing	100	PD	100	PD	100	PD	100	TC	
				G1020	Site Demolition & Relocations	100	PD	200	PD	300	PD	300	TC	
				G1030	Site Earthwork	100	PD	200	PD	300	PD	300	TC	
				G1040	Hazardous Waste Remediation	100	PD	100	PD	100	PD	100	TC	
		G20	Site Improvements	G2010	Roadways	100	PD	200	PD	300	PD	300	TC	
				G2020	Parking Lots	100	PD	100	PD	300	PD	300	TC	
				G2030	Pedestrian Paving	100	PD	100	PD	300	PD	300	TC	
				G2040	Site Development	100	PD	100	PD	300	PD	300	TC	
				G2050	Landscaping	100	PD	100	PD	300	PD	300	TC	
		G30	Site Civil/Mech Utilities	G3010	Water Supply & Distribution Systems	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC	
				G3020	Sanitary Sewer Systems	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC	
				G3030	Storm Sewer Systems	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC	
				G3040	Heating Distribution	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC	
				G3050	Cooling Distribution	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC	
				G3060	Fuel Distribution	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC	
				G3090	Other Civil/Mechanical Utilities	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC	
			G40	Site Electrical Utilities	G4010	Electrical Distribution	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC
					G4020	Site Lighting	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC

Element (ASTM Uniformat II Classification)				Level of Detail (LOD) and Model Component Author (MCA)							
				Conceptual-ization		Criteria Design		Detailed Design		Implemen-tation Docs	
		G4030	Site Communications & Security	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC
		G4090	Other Electrical Utilities	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC
G50	Other Site Construction	G5010	Service Tunnels	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC
		G5090	Other Site Systems & Equipment	100	PD	100	DC	300	TC	400	TC

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- aecmag (2010). Graphisoft ArchiCAD 14.
- Akinci, B., M. Fischer, et al. (2000). "Formalization and automation of time-space conflict analysis."
- Akinci, B., S. Staub, et al. (1997) "Productivity and Cost Analysis Based on 4D model."
- American Institute of Architects (2008) "AIA E202 - 2008: Building Information Modeling Protocol Exhibit."
- Associated General Contractors of America (2010). Contractor's Guide to BIM.
- Autodesk (2008). "Autodesk BIM communication specification".
- Bedrick, J. (2008). "Organizing the Development of a Building Information Model." from <http://www.aecbytes.com/feature/2008/MPSforBIM.html>.
- BuildingSmart Alliance (2010). BIM project execution planning guide.
- Collier, E. and M. Fischer (1995). Four-Dimensional Modeling in Design and Construction.
- CRC (2009). National Guideling For Digital Modelling.
- Dossick, C. S., G. Neff, et al. (2009). The realities of building information modeling for collaboration in the aec industry. 2009 Construction Research Congress - Building a Sustainable Future, April 5, 2009 - April 7, 2009, Seattle, WA, United states, American Society of Civil Engineers.
- Eastman, C., P. Teicholz, et al. (2011). BIM Handbook: a guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors, Wiley.
- Elvin, G. (2007). Integrated Practice in Architecture: : mastering design-build, fast-track, and building information modeling.
- Fischer, M. (2007). "Adopting BIM for facilities management, solutions for managing the Sydney Opera House."
- Fruchter, R., T. Schrottenboer, et al. (2009). From building information model to building knowledge model. 2009 ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering, June 24, 2009 - June 27, 2009, Austin, TX, United states, American Society of Civil Engineers.
- Gallaher, M., A. O'Connor, et al. (2004). Cost Analysis of Inadequate Interoperability in the U . S . Capital Facilities Industry, National Institute of Standards & Technology.
- Hastings, J., J. Kibiloski, et al. (2003). "Four-Dimensional Modeling to Support Construction Planning of the Stata Center Project." Leadership and Management in Engineering 3(2): 86-90.
- Koo, B. and M. Fischer (1998). Feasibility Study of 4D CAD in Commercial Construction.
- Kunz, J. and M. Fischer (2005). Virtual Design and Construction: Themes, Case Studies and Implementation Suggestions.
- Kymmell, W. (2008). Building Information Modeling: Planning and Managing Construction Projects With 4D CAD and Simulations, McGraw Hill.
- Leite, F., B. Akinci, et al. (2009). Identification of Data Items Needed for Automatic Clash Detection in MEP Design Coordination, ASCE.
- Leite, F., B. Akinci, et al. (2009). "Identification of date items needed for automatic clash detection in MEP design coordination." ASCE.
- Little, C. (2012). "BIM Through The Eyes Of A Mechanical Contractor."

- Luiten, G. T. and M. Fischer (1995). Opportunities for Computer-Aided Design for Construction.
- Meadati, P. and J. Irizarry (2010). "BIM – A Knowledge Repository."
- Michel, H. L. (1998). "FEATURE---The Next 25 Years: The Future of the Construction Industry." Journal of Management in Engineering **14**(5): 26-31.
- National Research Council of Canada (2011). Environmental Scan of BIM tools and Standards. I. o. B. i. Canada.
- Pena-Mora, F., T. Tamaki, et al. (2007). "Dynamic Conflict Management in Large-Scale Design and Construction Projects." Journal of Management in Engineering **23**(2): 52-66.
- Riley, D. and M. Horman (2001). "The Effects of Design Coordination on Project Uncertainty."
- Riley, D. R., P. Varadan, et al. (2005). "Benefit-Cost Metrics for Design Coordination of Mechanical, Electrical, and Plumbing Systems in Multistory Buildings." Journal of Construction Engineering and Management **131**(8): 877-889.
- Sabole, L. (2007) "Technology, Change and the Building Industry." Brochure, design+construction strategies **36**.
- Staub, S. and M. Fischer (1998). "Constructability reasoning based on a 4D facility model."
- Taylor, J. and R. Levitt (2004). Bridging the Innovation Gap in Project-Based Industries: 2003-2004 CIFE Seed Project Report.
- Teicholz, P. (2004). Labor Productivity Declines in the Construction Industry: Causes and Remedies, Center for Integrated Facility Engineering (CIFE) , Stanford University.
- Van den Helm, P., M. Böhms, et al. (2010). "IFC-based clash detection for the open-source BIMserver."
- vicosoftware. (2010). "Vico Office Constructability Manager."
- Wu, I.-C. and Y.-C. Chiu (2010). 4D workspace conflict detection and analysis system. 10th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality.