

LA MODELISATION 4D DANS UNE APPROCHE BIM : ANALYSE DES USAGES ET DE LA COLLABORATION

MÉMOIRE DE MASTER DESIGN GLOBAL
SPÉCIALITÉ « ARCHITECTURE, MODÉLISATION ET ENVIRONNEMENT »

CLÉMENT LEMAIRE
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANCY
UNIVERSITÉ DE LORRAINE
01/09/2017

Sous la direction de : Annie Guerriero et Sylvain Kubicki

Organisme d'accueil : LIST

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Etienne Goffard, mon camarade de stage, qui m'a aidé et assisté dans de nombreuses tâches durant ces six mois de travail.

Je souhaite aussi remercier l'ensemble des personnes travaillant au LIST, qui ont su m'accueillir et me mettre dans les meilleures dispositions. Plus particulièrement, j'aimerais dire un grand merci à Sylvain Kubicki et Annie Guerriero qui m'ont accompagné et guidé tout au long de ce travail de recherche en me donnant leurs précieux conseils.

Merci aussi à Elie Daher, Fabrice Absil et Lou Schwartz qui ont su m'apporter leur soutien.

Enfin, un merci à l'ensemble de l'équipe du projet de recherche *4DCollab* avec qui j'ai eu l'opportunité de travailler, notamment Veronika Bolschokova et Hugo Carvalho avec qui j'ai pu collaborer et échanger sur de nombreux sujets.

Table des matières

Remerciements	1
Table des matières	3
Table des illustrations	5
Liste des figures	5
Liste des tableaux.....	7
Résumé	8
Abstract	8
1 Introduction	9
1.1 Contexte de recherche.....	9
1.2 Portée du mémoire	12
1.3 Plan du mémoire.....	13
2 Problématique et méthodologie	15
2.1 Intérêt pour le sujet	15
2.2 Délimitation du problème	15
2.3 Hypothèses.....	15
2.4 Méthode de recherche	16
3 Etat de l'art	17
3.1 Les grandes tendances en matière d'innovation dans le secteur de la construction.....	17
3.2 Building Information Modeling (BIM)	19
3.3 LEAN Construction	22
3.4 Planification dans le secteur de la construction.....	24
3.5 Modèle 4D dans les usages BIM	27
3.6 Collaboration dans un projet de construction	29
3.7 Outils 4D.....	31
4 Proposition d'usages de la 4D	33
4.1 Regroupement et définition de 7 usages de la 4D.....	33
4.2 Acteurs clés impliqués dans ces usages.....	36
4.3 Proposition d'intégration des usages au processus LEAN Construction	37
5 Questionnaire d'étude sur les usages de la 4D	41
5.1 Objectifs et cibles.....	41
5.2 Structure du questionnaire	42
5.3 Résultats et discussions	45
6 Session d'expérimentation	53
6.1 Objectifs de l'expérimentation	53
6.2 Hypothèses.....	55
6.3 Dispositif d'interaction permettant de faciliter la collaboration synchrone et colocalisée ..	56
6.4 Cas d'étude	57
6.5 Modélisation 4D	58
6.6 Protocole et scénario de l'expérimentation.....	61

6.7	Résultats.....	64
6.8	Discussion	66
7	Conclusion.....	69
8	Bibliographie	71
Annexes.....		75
	Annexe 1 : Tableau de la fréquence d'utilisation des BIM tiré de (Kreider, Messner, and Dubler 2010) 75	
	Annexe 2 : Tableau recensant les BIM guidelines et leur traitement de l'usage « Phase 4D Modeling »	77
	Annexe 3 : Grandes thématiques abordées par les BIM guidelines au sujet de la 4D.....	78
	Annexe 4 : Descriptif des logiciels de 4D-CAD actuellement sur le marché	80
	Annexe 5 : Fiche de consigne type distribuée aux participants à l'expérimentation.....	82
	Annexe 6 : Questionnaire donné aux participants après l'expérimentation	90
	Annexe 7 : Réponses au questionnaire post-expérimental	92

Table des illustrations

Liste des figures

Figure 1: Les différents sites du LIST	9
Figure 2: Le LIST en quelques chiffres.....	10
Figure 3: Les différents participants au projet de recherche 4DCollab.....	11
Figure 4 : Structure du mémoire et intégration dans le projet de recherche 4DCollab	13
Figure 5 : Schéma de la méthodologie employée dans ce mémoire	16
Figure 6 : Evolution de la productivité dans le secteur de la construction comparée aux autres secteurs aux Etats-Unis	17
Figure 7 : Comparaison du processus de construction Sans et Avec utilisation du BIM, tiré de (Celnik and Lebègue 2014).....	19
Figure 8 : Les usages du BIM tout au long du cycle de vie du bâtiment (organisé en ordre chronologique inversé), tiré de (CIC 2010).....	20
Figure 9 : Schéma de l'implémentation de l'usage "4D Phasing", tiré de (U.S. General Services Administration's Public Buildings Service: Office of the Chief Architect 2009a)	21
Figure 10 : Les familles de gaspillage dans le LEAN	Figure 11 : VA et NVA dans le processus LEAN
22	22
Figure 12 : Les étapes de la méthodes LPS.....	26
Figure 13 : BPMN de l'usage 4D tiré de (The Computer Integrated Construction Research Group The Pennsylvania State University 2011).....	28
Figure 14 : Les intervenants dans un projet de construction tiré de (Guerriero 2009).....	29
Figure 15 : Evolution du contexte de coopération (2003-2006) tiré de (Guerriero 2009)	29
Figure 16 : Matrice Espace / Temps tiré de (David 2001).....	30
Figure 17 : Capture d'écran de l'interface de Synchro	32
Figure 18 : Cartographie des usages 4D.....	35
Figure 19 : Structure du questionnaire	42
Figure 20 : Profession des personnes ayant répondu au questionnaire (plusieurs réponses possibles)	45
Figure 21 : Réponses au questionnaire sur l'expérience des participants (réponse facultative)	46
Figure 22 : Réponses au questionnaire sur la taille de l'entreprise des répondants (réponse facultative)	46
Figure 23 : Réponses du questionnaire sur l'utilisation de la 4D (en pourcentage).....	47
Figure 24 : Réponses collectées sur la connaissance des logiciels 4D (plusieurs réponses possibles)	49
Figure 25 : Réponses collectées sur l'utilisation des logiciels 4D (plusieurs réponses possibles)..	49
Figure 26 : Réponses collectées sur la phase d'application de la 4D pour les « utilisateurs 4D » (plusieurs réponses possibles).....	50

Figure 27 : Réponses collectées sur la phase d'application de la 4D pour les « non-utilisateurs 4D » (plusieurs réponses possibles).....	50
Figure 28 : Photos de la table Meetiim du fabricant Immersion installé dans le laboratoire du LIST	56
Figure 29 : Modèle 3D de la Maison de l'Innovation (réalisé par Etienne Goffard et Justine Guerrin)	57
Figure 30 : Première version du modèle 4D de la Maison de l'Innovation (Navisworks)	58
Figure 31 : Deuxième version du modèle 4D de la Maison de l'Innovation (Synchro).....	59
Figure 32 : Vue de dessus de la table lors d'une session (capture via la régie).....	63
Figure 33 : BPMN de l'utilisation de la modélisation 4D en phase de pré-construction, proposition d'adaptation du BPMN de PennState University	67

Liste des tableaux

Tableau 1 : Acteurs impliqués dans les différents usages proposés	36
Tableau 2 : Usages de la 4D et du LEAN Construction et interactions	39
Tableau 3 : Moyenne de l'utilité perçue pour chaque usage.....	47
Tableau 4 : Fréquence et Intention d'utilisation des usages	48
Tableau 5 : Documents à disposition des participants pour réaliser la tâche du scénario.....	63
Tableau 6 : Principales fonctionnalités des logiciels de 4D-CAD	80

Résumé

Le BIM est aujourd'hui un axe d'innovation majeure dans le secteur de la construction. Il permet, autour de différents usages d'améliorer la communication entre les parties prenantes et donc l'aspect collaboratif d'un projet. Au sein des divers usages du BIM, la modélisation 4D apporte des informations spatio-temporelles très utiles lors de la planification d'un chantier. Mais cette modélisation 4D possède d'autres avantages notamment en termes de logistique ou d'aide à la prise de décision. Ce travail de recherche propose une liste d'usages de la 4D dérivés des guides BIM et de la littérature scientifique puis s'intéresse à la collaboration permise par le modèle BIM/4D. Pour venir appuyer ces propositions, une première étape de validation auprès des professionnels de l'AEC constituée d'un questionnaire d'étude sur les usages proposés est réalisée. Puis, une seconde étape de validation composée d'une session d'expérimentation sur un cas d'étude relayant certains usages définis sera mise en place. Les résultats de ces deux étapes de validation seront présentés, analysés et discutés en conclusion.

Mots-clés: 4D, BIM, LEAN, Planning, Construction, Collaboration, Usages,

Abstract

Nowadays BIM is a major trend of innovation in the Architecture, Engineering and Construction sector. It enables to improve communication between the project's stakeholders and strengthen collaborative work. Within the uses of BIM, 4D modeling provides spatio-temporal information that is very useful for planning and phasing a construction site. 4D modeling also brings other advantages in terms of logistics and aid to decision making. This research first provides a list of 4D/BIM uses derived from BIM guidelines and scientific literature and then addresses collaboration aspect around 4D models. To assess these propositions, a first step of validation with AEC professionals is carried out in the form of a questionnaire on the proposed uses. Second, an experimental session based on a case study addressing some of the defined 4D uses is setup with real practitioners. The results of these two validation steps are presented, analyzed and discussed in conclusion.

Keywords: 4D, BIM, LEAN, Scheduling, Construction, Collaboration, Uses,

1 Introduction

Dans le cadre de mon projet de fin d'étude au sein du Master 2 de Design Global (Spécialité « Architecture Modélisation Environnement ») à l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy (ENSAN), et en partenariat avec l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs des Travaux de la Construction de Metz (ESITC), j'ai effectué un stage d'une durée de 6 mois au Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST), un centre de recherche luxembourgeois. Lors de ce stage, j'ai pu réaliser un travail de recherche qui a abouti à l'écriture de ce mémoire. Il est important de clarifier dans cette introduction le sujet et la portée de celui-ci mais aussi de préciser le cadre et le contexte dans lequel il a été accompli.

1.1 Contexte de recherche

1.1.1 Le LIST (Luxembourg Institute of Science and Technology)

Le Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) est né de la volonté de fusionner les Centres de Recherche Publics luxembourgeois Gabriel Lippmann et Henri Tudor, tous deux créés en 1987. L'idée était de rassembler leurs forces et de focaliser leurs efforts sur un nombre de domaines ciblés dans le but de donner à la recherche luxembourgeoise une plus grande visibilité internationale et un nouveau potentiel de développement au pays. L'objectif est aussi de faire évoluer le système pour faciliter l'accès des entreprises à la recherche publique. Le LIST est opérationnel depuis le 1er janvier 2015.

Le LIST est une Organisation pour la Recherche et la Technologie (RTO) dont le siège social est situé au cœur du nouveau campus de recherche et d'innovation luxembourgeois, sur l'ancien site industriel d'Esch-Belval. Il dispose aussi d'une annexe située à Belvaux et de laboratoires à Hautcharage (Cf Figure 1).



Le LIST est actif dans trois domaines majeurs qui structurent son organisation interne en trois pôles majeurs :

- Environmental Research and Innovation (ERIN)

Les thématiques de recherche du groupe ERIN au sein du LIST s'articulent autour des sujets suivants :

- Gestion intégrée des ressources en eau
- Sciences végétales et biotechnologies
- Analyse de la durabilité dans le cycle de vie et évaluation des risques
- Analyse et visualisation de données scientifiques environnementales

- Materials Research and Technology (MRT)

Les thématiques de recherche du groupe MRT au sein du LIST s'articulent autour des sujets suivants :

- Nanomatériaux et nanotechnologies
- Matériaux composites

- Information Technology for Innovative Services (ITIS)

Les thématiques de recherche du groupe ITIS au sein du LIST s'articulent autour des sujets suivants :

- Big Data et prise de décision
- Entreprises en réseau et services de confiance
- Ingénierie de services et nouveaux modèles d'affaires

Pour ma part, j'ai été affecté au département ITIS au cours de ce stage et, plus particulièrement, à l'équipe DBEM (Digital Built Environment Management).



Figure 2: Le LIST en quelques chiffres

1.1.2 Le projet 4DCollab

4DCollab est un projet de recherche scientifique qui traite de la collaboration entre les différents intervenants d'un projet de construction autour de la 4D. Il vise à créer de nouvelles connaissances sur l'impact des technologies de conception assistée par ordinateur 4D (CAO) et de modélisation de l'information sur le bâtiment (BIM) et sur la collaboration mise en œuvre en phase de « pré-construction ». A terme, l'objectif est de spécifier de nouveaux systèmes informatiques interactifs permettant d'aider les activités collaboratives liées autour d'un modèle 4D. Cet objectif principal est abordé de trois points de vue différents : celui de l'Architecture et l'Ingénierie de Construction (conception et construction), celui des Sciences Cognitives (ergonomie cognitive et psychologie cognitive) et celui de l'Informatique (c'est-à-dire les systèmes d'interaction homme-ordinateur).

Le projet a été lancé en février 2017 et s'étendra sur 42 mois. Il est soutenu par 5 partenaires européens :

- Université de Lorraine (PERSEUS, FR),
- Luxembourg Institute of Science and Technologies (LIST, LU),
- UMR CNRS/Culture MAP Modèles pour l'Architecture et le Paysage (CRAI, FR),
- Immersion (FR),
- Félix Giorgetti (LU).

Concernant le financement, le projet est supporté par 2 organismes :

- L'Agence Nationale de Recherche (ANR, France),
- Le Fonds National de Recherche (FNR, Luxembourg).

4Dcollab project partners



Figure 3: Les différents participants au projet de recherche 4DCollab

Le projet de recherche *4DCollab* est défini autour de 4 objectifs majeurs qui seront abordés à différentes étapes de son déroulement :

1. Mesurer la valeur ajoutée des pratiques 4D émergentes en phase de pré-construction

Cet objectif vise à analyser les pratiques collaboratives et les usages des techniques de la 4D pendant la phase de pré-construction et d'évaluer sa contribution aux projets de construction. En effet, pour mesurer une éventuelle valeur ajoutée, il faut déjà comprendre les processus mis en œuvre et déterminer leurs potentiels. Cela passe par la définition des usages de la 4D et une revue des supports numériques à disposition, c'est-à-dire les logiciels de 4D-CAD actuellement disponibles sur le marché.

2. Identifier les pratiques de travail 4D collaboratives avec des dispositifs numériques émergents et une approche ergonomique axée sur l'utilisateur

Le deuxième objectif du projet va permettre de définir comment les utilisateurs interagissent avec les logiciels 4D-CAD existants et de spécifier de nouveaux dispositifs d'interaction multi-utilisateurs. Afin d'atteindre cet objectif, l'expérience du terrain des utilisateurs d'outils 4D-CAD est jugée nécessaire car elle permettra d'évaluer la convivialité des outils existants afin de déduire les pistes d'améliorations possibles.

3. Décrire les usages et les interactions entre les utilisateurs d'outils 4D et développer un outil 4D collaboratif

Le troisième objectif prévoit d'identifier et de définir des usages et des interactions novateurs avec des modèles 4D à l'aide de dispositifs numériques appropriés (table tangible et écran) dans une approche ergonomique prospective. Il repose sur les connaissances accumulées lors des deux précédents objectifs qui vont servir à développer l'outil 4D collaboratif.

4. Valider des usages 4D collaboratifs et mesurer la nouvelle valeur ajoutée pour les équipes de projet en phase de pré-construction

Le quatrième objectif vise à la validation des usages et des interactions innovantes réalisées avec le nouvel outil 4D collaboratif développé dans l'objectif précédent. Il vise également à déployer des dispositifs collaboratifs émergents afin d'améliorer le processus de décision des acteurs d'un projet de construction autour d'un modèle 4D.

1.2 Portée du mémoire

Le sujet du mémoire porte sur l'identification de la valeur ajoutée de l'utilisation de la 4D dans les processus de conception et de construction. Plus particulièrement, le mémoire a pour but d'identifier les usages et la collaboration autour de la 4D lors de la phase de pré-construction. La 4D est un des usages du Building Information Modeling (BIM), un processus de travail qui permet

aux intervenants dans l'acte de construire de collaborer autour d'une maquette numérique 3D enrichie d'informations. Elle permet, grâce à l'association d'un modèle 3D à un planning, une visualisation animée de la construction d'un projet. C'est donc une méthode innovante de planification qui induit une meilleure visualisation et, potentiellement, une meilleure compréhension d'un projet de construction par l'ensemble des intervenants. La Figure 4 montre l'articulation de la recherche synthétisée dans ce mémoire et du projet de recherche 4DCollab.

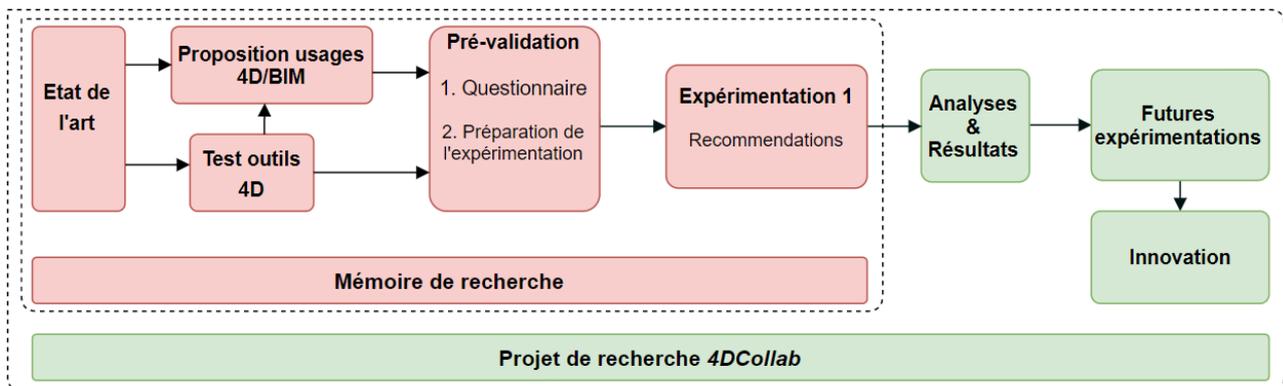


Figure 4 : Structure du mémoire et intégration dans le projet de recherche 4DCollab

Le travail de recherche s'est organisé de la manière suivante. Dans une première temps, un état de l'art sur le BIM, la planification « classique » dans le secteur de la construction et la planification 4D est réalisé. En se basant sur les conclusions, cet état de l'art va permettre d'identifier les pistes de recherche à explorer, et, en particulier mettre au point une liste d'usages que l'on pourrait associer à l'approche 4D. En parallèle, un recensement des logiciels de type « 4D/CAD » est effectué afin de pouvoir en tester les fonctionnalités et permettre de mieux caractériser la liste d'usages. Dans un second temps, il va falloir faire valider ces usages potentiels par des professionnels du secteur de la construction en deux étapes distinctes. Une première étape est constituée de la diffusion d'un questionnaire et l'analyse des résultats de celui-ci. Une seconde étape consiste à mettre en place une série d'expérimentation pour tester ces usages et analyser comment la collaboration s'organise autour de la 4D. Enfin, on discutera des résultats obtenus et de l'orientation des futures recherches à mener dans ce domaine.

1.3 Plan du mémoire

Dans une **première partie**, un état de l'art sera réalisé sur les différentes thématiques du sujet en commençant par les grandes tendances en matière d'innovation dans le secteur de la construction, en abordant ensuite le BIM et la méthode LEAN puis la planification, et pour finir la modélisation 4D et les outils associés. Dans une **deuxième partie**, nous proposerons une liste d'usages 4D/BIM découlant de l'état de l'art. Dans une **troisième partie**, nous présenterons une étude menée auprès des professionnels du domaine et visant à valider les usages préalablement définis. Enfin, dans une **quatrième partie**, nous nous intéresserons à la collaboration autour de la modélisation 4D en menant une série d'expérimentation ayant pour but de valider les hypothèses de départ.

2 Problématique et méthodologie

2.1 Intérêt pour le sujet

Le BIM est un processus collaboratif dont l'application est aujourd'hui documentée via de nombreux guides BIM. Ceux-ci structurent généralement le processus autour d'usages : les BIM Uses. Le guide BIM de l'université de Penn State (The Computer Integrated Construction Research Group The Pennsylvania State University 2011) est un des pionniers dans ce domaine et a identifié 25 BIM uses qui sont recensés en annexe (Annexe 1). Ces usages ont été identifiés grâce à un travail de recherche conséquent, découlant notamment d'entretiens avec les professionnels du BTP, de la mise en œuvre de cas d'études et d'une revue de la littérature scientifique. Dans le prolongement de ce travail, Kreider et al a mené une large enquête sur la fréquence d'utilisation de ces 25 BIM uses spécifiés (Kreider, Messner, and Dubler 2010) (Annexe 1). En analysant cette étude, on se rend compte que l'usage de modélisation 4D n'apparaît pas dans les cinq usages les plus utilisés du BIM. En effet, bien que reconnue dans le processus BIM en tant qu'usage, l'utilisation de la 4D reste encore assez peu développée notamment dans les régions francophones d'Europe que nous avons étudiées et limitée à certains types de projets (grandes entreprises et grands projets) malgré les bénéfices notoires qu'elle procure. De plus, l'aspect collaboratif autour de la 4D est encore très peu documenté bien que le processus BIM soit réputé pour la collaboration autour de la maquette numérique.

2.2 Délimitation du problème

Le travail de recherche de ce mémoire se base sur de précédents travaux scientifiques ayant déjà prouvé l'apport de la 4D. En effet, les bénéfices de l'utilisation d'un modèle 3D lié à un planning de chantier ont déjà été répertoriés dans (Collier and Fischer 1995). Notre recherche vise à étendre l'utilisation de la 4D qui sert aujourd'hui majoritairement à la planification. De la même manière que les guides BIM, des usages de la 4D seront présentés et décryptés avant d'être soumis à validation. Aussi, la suite de ce mémoire s'intéresse à la collaboration autour du modèle 4D/BIM. En se basant sur certains usages (ceux qui auront été validés), une session d'expérimentation tentera de démontrer l'apport de cette technologie pour l'amélioration de la collaboration en phase de pré-construction d'un projet.

2.3 Hypothèses

H1 - L'utilisation de la 4D peut s'étendre à d'autres usages que la planification et le phasage d'un projet de construction.

H2 - La 4D peut être utilisée de manière collaborative, durant les différentes phases du projet.

2.4 Méthode de recherche

Afin d'aborder le sujet de recherche de manière rigoureuse, nous avons mis au point la méthodologie suivante (Figure 5). Concernant l'utilisation de la 4D, une vaste communauté de chercheurs a déjà travaillé sur le sujet et il est donc important de recenser ces travaux pour ne pas les réitérer. De plus, de nombreux guides pour la mise en place du BIM sur les projets ont été publiés dans les dernières années. Ces documents mentionnent des utilisations de modèles 4D, et seront donc utiles à la formalisation de cet état de l'art. La première étape est donc constituée d'un état de l'art sur la 4D, mais pas seulement sur la 4D en tant que telle. L'idée est de remonter aux composants de la 4D : un modèle 3D et un planning de tâches. Afin de mieux comprendre ces composants, un état de l'art sur le BIM et sur la planification dans le domaine de la construction est effectué.

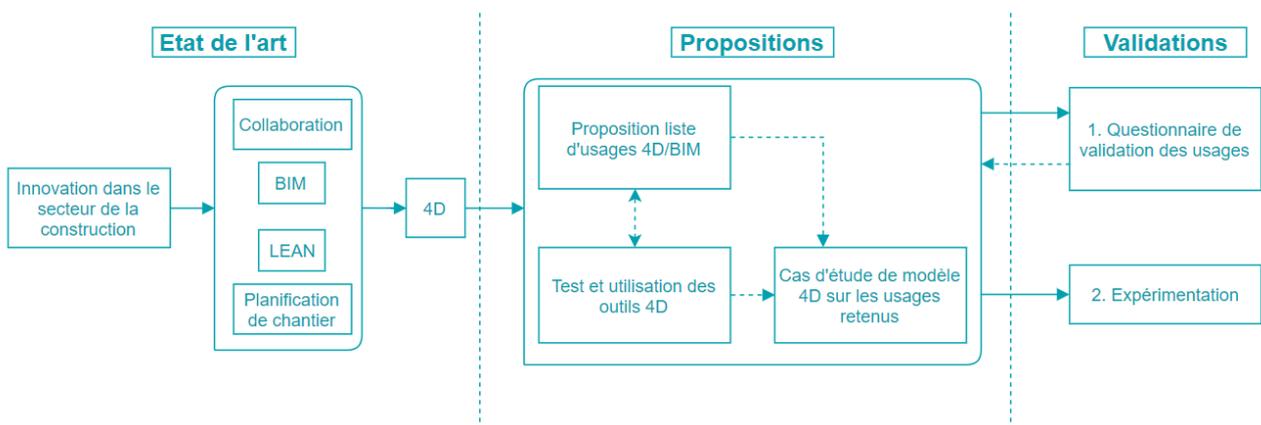


Figure 5 : Schéma de la méthodologie employée dans ce mémoire

Sur la base de cette revue de la littérature scientifique, une formalisation des usages de la 4D est réalisée ainsi qu'une série de tests sur des logiciels 4D (Annexe 4). Ces deux tâches sont complémentaires et permettent d'appréhender la 4D d'un point de vue plus pratique. Ensuite, une étape de validation par les professionnels est nécessaire afin d'affirmer l'intérêt des usages définis préalablement. Cette sollicitation du secteur de la construction est faite via un questionnaire diffusé à l'ensemble de la profession. Sur la base des réponses reçues, un traitement des données et une analyse critique des résultats sont réalisés. Grâce à l'expérience acquise sur les logiciels 4D, il est alors possible de mettre au point un cas d'étude en rapport avec les usages retenus. Enfin, une expérimentation est mise au point ce qui va permettre d'analyser le comportement des utilisateurs et qui constituera une nouvelle étape de validation des résultats obtenus.

3 Etat de l'art

3.1 Les grandes tendances en matière d'innovation dans le secteur de la construction

Le secteur de la construction a longtemps été réfractaire à l'idée de mettre en place des moyens conséquents permettant l'innovation. « *Le problème n'est pas qu'il n'y ait pas eu d'innovation, en effet, les données bibliométriques suggèrent que l'industrie est une source animée de nouvelles idées. Le problème est que le taux d'innovation est à la traîne comparé à la plupart des autres secteurs* » (traduit de (Winch 1998)). Ce taux d'innovation a globalement entraîné une stagnation voire une régression dans l'évolution de la productivité, à l'inverse des autres secteurs qui enregistrent une progression (Philipp Gerbert 2016), comme le montre la Figure 6 en prenant l'exemple des Etats-Unis.

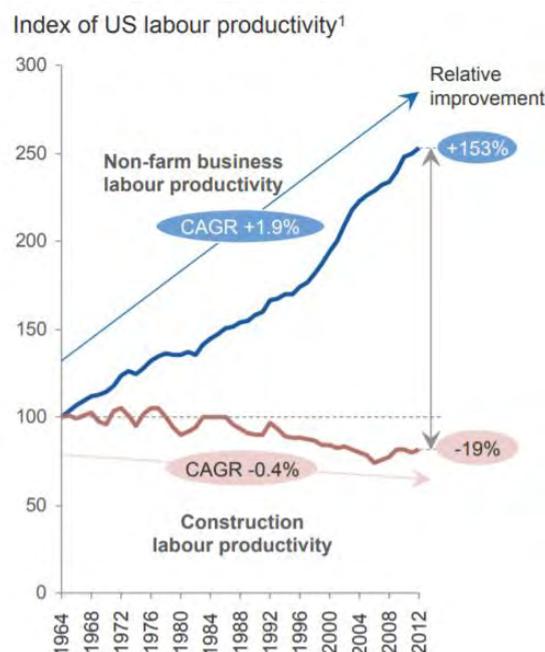


Figure 6 : Evolution de la productivité dans le secteur de la construction comparée aux autres secteurs aux Etats-Unis

En outre, les efforts d'innovation dans l'industrie de la construction se sont pendant longtemps orientés de façon disproportionnée vers l'amélioration du produit plutôt que sur l'amélioration du processus (Winch 1998).

Aujourd'hui, la prise de conscience de ce retard en termes d'innovation a bien eu lieu, et une vaste communauté de chercheurs travaille sur l'évolution des pratiques. Au regard de cette question de productivité des processus, deux axes se distinguent.

D'une part, l'évolution du processus de construction en repensant notamment la chaîne d'approvisionnement (supply chain). Le LEAN Construction permet aujourd'hui d'appliquer certains principes, issus du secteur industriel, visant à améliorer la productivité sur chantier (Diekmann et al. 2005).

D'autre part, l'évolution des technologies de l'information a grandement impacté et facilité l'innovation. Le BIM réunit aujourd'hui l'ensemble des informations nécessaires sur le cycle de vie du bâtiment (de la conception à la maintenance du bâtiment) autour d'une maquette numérique 3D et ne cesse de prendre de l'ampleur dans les projets de constructions internationaux, mais aussi en France (République Française 2017).

Dans les prochaines années, l'innovation dans le secteur tend probablement à se développer autour de certains grands concepts. Nous citerons premièrement, le développement et l'utilisation du Big Data dans les processus de conception et de gestion de la construction (Hashem et al. 2016). Deuxièmement, l'expansion de la fabrication digitale et de la préfabrication notamment grâce à la démocratisation de l'impression 3D (Tay et al. 2017). Enfin, mentionnons l'automatisation du site de construction que ce soit pour le suivi ou la réalisation des tâches (drones, robots) (Sobotka and Pacewicz 2016).

3.2 Building Information Modeling (BIM)

Le Building Information Modeling (BIM) ou Modélisation de l'Information sur le Bâtiment est un ensemble de processus et de technologies interactives permettant de générer une « *méthodologie pour gérer la conception du bâtiment et les données du projet en format numérique tout au long du cycle de vie du bâtiment* » (traduit de (Succar 2009)). Cette gestion de la conception et des données du projet au format numérique se fait par l'utilisation d'une maquette 3D (appelée « maquette numérique », parfois abrégée MN), centrale dans le processus BIM, à laquelle sont reliées des informations nécessaires à l'intégralité du cycle de vie de l'ouvrage. Tous les intervenants d'un projet de construction sont concernés par le BIM : architectes, ingénieurs, maîtres d'ouvrage, exploitants et propriétaires (Architecture, Engineering, Construction and Operations souvent regroupés avec les sigles AECO dans la littérature). Ce processus de travail vise donc à simplifier la collaboration entre ces acteurs, qui est généralement chaotique car composée d'un grand nombre d'échanges, comme le montre la Figure 7.

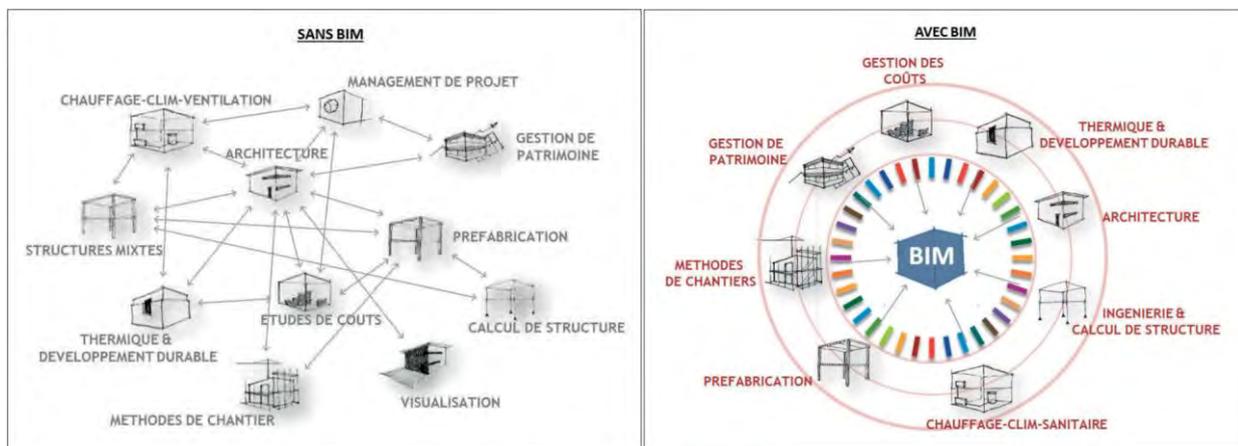


Figure 7 : Comparaison du processus de construction Sans et Avec utilisation du BIM, tiré de (Celnik and Lebègue 2014).

Le BIM est souvent défini à deux échelles bien distinctes (Denis 2015). D'une part, d'un point de vue macro, le BIM est vu comme un processus dans lequel les différents acteurs travaillent ensemble, échangent des informations (données et géométrie) et collaborent pour fournir un processus de construction plus efficace (exemples : moins d'erreurs, construction plus rapide), mais aussi des bâtiments plus efficaces qui produisent moins de déchets, sont moins chers et plus facile à utiliser. Avec cette vision, la clé n'est pas la modélisation tridimensionnelle elle-même, mais l'information développée, gérée et partagée. D'autre part, à une échelle plus technique, le BIM peut également être considéré comme une plate-forme logicielle permettant de coordonner (ou de combiner) le travail des différentes parties prenantes. En l'occurrence, ce travail se présente sous la forme d'une représentation tridimensionnelle (3D) du bâtiment dans laquelle tous les éléments qui composent le bâtiment sont considérés comme des « objets » reliés entre eux. Chaque objet a un identifiant unique et rapporte des informations sur sa géométrie et ses propriétés. Cette approche axée sur l'objet permet d'organiser le modèle virtuel, de développer

différents comportements ou interactions selon le type d'objets et de stocker de l'information sur chaque objet.

Pour mettre en place le processus BIM, de nombreuses directives se sont développées sous forme de guides du BIM (les BIM guidelines). Ces guides du BIM (souvent rédigés au niveau national) sont en quelques sortes des préconisations pour le déploiement du BIM. L'un des documents pionnier, et de référence, dans ce domaine est le guide du BIM mis au point par l'Université de PennState : « BIM Execution Planning Guide » (CIC 2010). Dans ces guides, des usages du BIM sont définis, on parle de « BIM uses ». Ils associent des processus d'échanges d'information, centralisés autour des maquettes numériques, et caractérisés par « l'objectif métier » visé (Kreider, Messner, and Dubler 2010). Ces usages modèlent l'ensemble du cycle de vie du bâtiment comme le montre la Figure 8, de la Programmation jusqu'à la Maintenance en passant par la Conception et la Construction (Plan, Design, Construct, Operate).

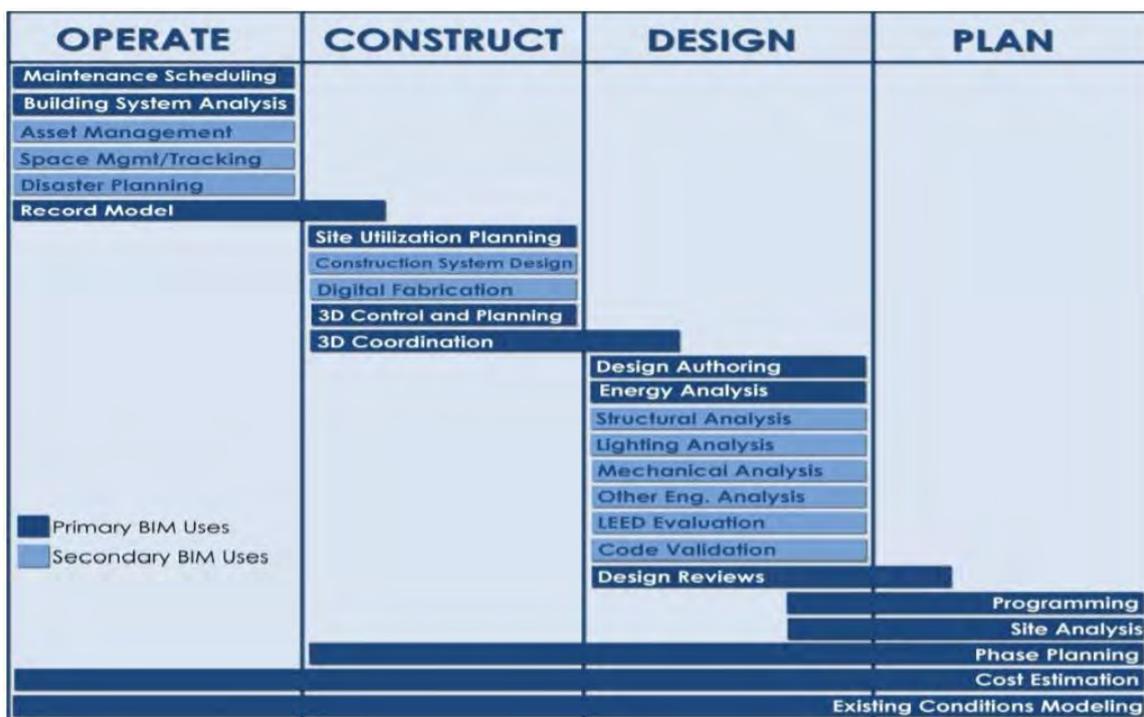


Figure 8 : Les usages du BIM tout au long du cycle de vie du bâtiment (organisé en ordre chronologique inversé), tiré de (CIC 2010)

Dans le cadre de ce mémoire, l'étude de la phase de pré-construction nous limite à certains « BIM Uses », notamment celui de « Phase 4D Modeling » qui revient fréquemment. L'Annexe 2 présente un tableau listant un certain nombre de guides du BIM en mentionnant s'ils traitent ou non de la problématique de la 4D. Sur les 17 guides BIM recensés dans ce tableau, 12 mentionnent et explicitent l'usage d'un modèle 4D dans le processus (70% d'entre eux) avec plus ou moins de détails.

La Figure 9 présente un schéma d'implémentation de l'usage de « 4D Phasing ». On peut y découvrir des thématiques de réflexion qui sont récurrentes et les liens entre celles-ci. Trois grands thèmes sont abordés ici : la technologie 4D, l'équipe projet et le budget. Le lien entre l'équipe projet et la technologie est primordial car il va permettre de définir le processus d'échange d'information. Pour mettre en place ce processus, il est important de s'intéresser au budget alloué à cette technologie en définissant les services de phasage 4D à contractualiser. Enfin, le lien entre le budget et l'équipe projet qui permet de déterminer le moment opportun pour modéliser le projet en 4D.

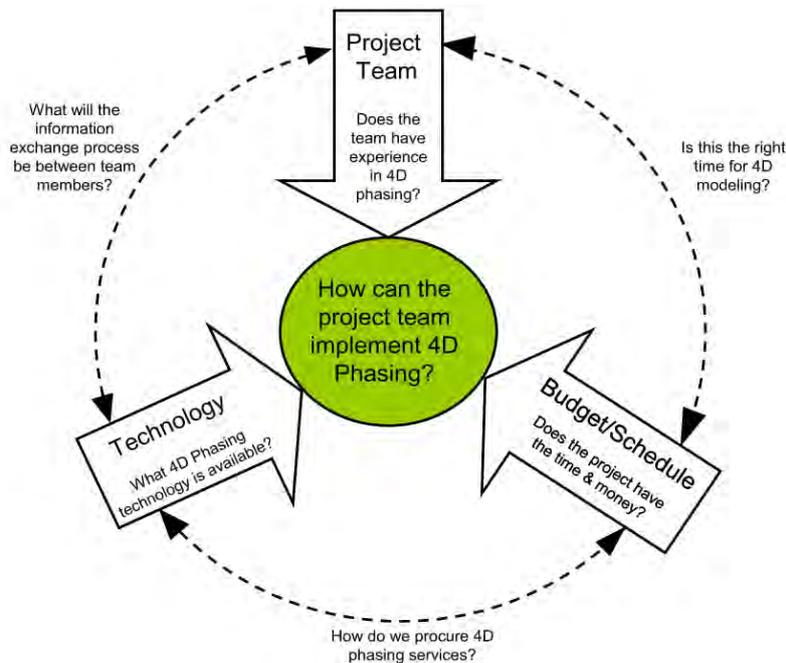


Figure 9 : Schéma de l'implémentation de l'usage "4D Phasing", tiré de (U.S. General Services Administration's Public Buildings Service: Office of the Chief Architect 2009a)

3.3 LEAN Construction

Le LEAN est une méthode de management de la production qui prône la diminution du gaspillage, sous quelque forme que ce soit (littéralement « lean » signifie « maigre », « sans gras »). La méthode LEAN est principalement un dérivé des méthodes de production dans les usines Toyota au Japon dans les années 1950. *The Machine That Changed the World* (Womack, Jones, and Roos 1990) publié en 1990 est l'ouvrage de référence qui a consacré le LEAN et lui a donné une renommée internationale. L'objectif principal de la méthode LEAN est d'augmenter la qualité des produits tout en réduisant les coûts et les temps de fabrication en se concentrant systématiquement sur l'identification et l'élimination de ce qui n'apporte rien au processus de fabrication. Le LEAN distingue d'ailleurs 8 familles de gaspillages qui sont présentées sur la Figure 9. Ces gaspillages font partie de la NVA (Non-Valeur ajoutée) définie comme « ce qui n'apporte pas de valeur aux yeux du client », la partie immergée de l'iceberg (Figure 10). En opposition, la VA (Valeur ajoutée) est définie comme « ce qui modifie les caractéristiques du produit conformément aux souhaits du client », la partie émergée de l'iceberg (Figure 11) (Bettina et al. 1997).

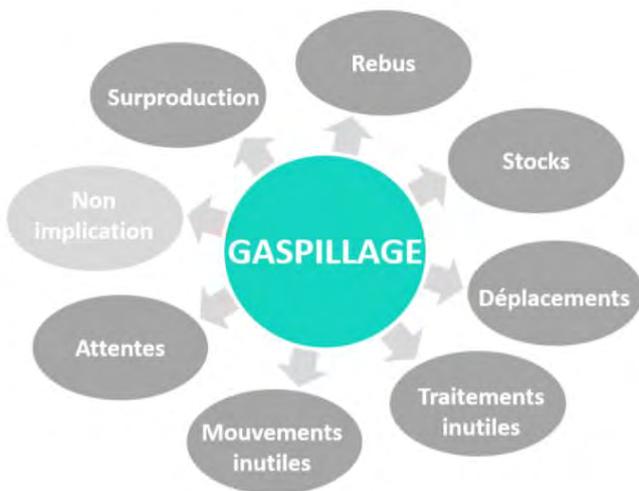


Figure 10 : Les familles de gaspillage dans le LEAN



Figure 11 : VA et NVA dans le processus LEAN

Cette méthode est également basée sur l'amélioration continue, appelée « Kaizen » en japonais, qui peut être traduit plus simplement par « analyser pour rendre meilleur », et inspiré lui-même par Deming et le principe d'amélioration continue (PDCA). Avant d'être une méthode de gestion de la qualité, il s'agit d'abord d'un état d'esprit à faire adopter aux travailleurs. Par exemple, en invitant à une réflexion commune portant sur les tâches réalisées et leur enchaînement.

Cette philosophie peut s'appuyer sur quelques outils pour être correctement appliquée :

- La Règle des 5S¹ : « débarrasser », « mettre en ordre », « nettoyer », « maintenir propre » et « éduquer ». Elle vise à améliorer les conditions de travail du personnel en réduisant les risques d'accidents et les dépenses tout en améliorant la qualité et la gestion de la production ;
- Le VSM² qui sert à avoir une vision simplifiée de toutes les étapes d'un projet et à visualiser rapidement les flux de matières et d'informations afin de se rendre compte des pertes de temps ;
- Le SMED³, une méthode d'organisation qui cherche à réduire le temps de changement de série avec un objectif quantifié, c'est-à-dire réduire le temps passé à changer d'outillage sur une ligne de production.

Les principes de la méthode LEAN ont ensuite peu à peu été adaptés au secteur de la construction, créant le terme de LEAN Construction. En effet, les outils du LEAN qui mesurent la VA/NVA, le VSM, les 5S, le SMED et le Kanban peuvent être appliqués aux chantiers de construction. De nombreuses études ont mesuré les gaspillages actuels sur les chantiers qui représentent entre 55% et 65% de l'effort de production total (Diekmann et al. 2005). Les gaspillages les plus référencés dans ces études sont les déplacements, l'attente ou la recherche de matériel, la manipulation multiple de matériel, les accidents et les pertes. Ces opérations inutiles peuvent représenter jusqu'à 10% du coût total de construction d'un bâtiment, en excluant les coûts liés à la conception (Bertelsen and Nielsen 1997).

¹ Les 5S correspondent en Japonais à *Seri, Seiton, Seiso, Seikestu et Shitsuke* dont la traduction est présentée dans le texte.

² VSM est l'abréviation de l'anglais *Value Stream Mapping*, littéralement « cartographie des chaînes de valeurs ».

³ SMED est l'abréviation de l'anglais *single-minute exchange of die(s)*, littéralement « changement de matrice(s) en une seule minute ».

3.4 Planification dans le secteur de la construction

En examinant la littérature scientifique, il apparaît huit grandes familles de méthodes de planification dans le secteur de la construction qui sont présentées dans cette section.

3.4.1 Gantt Chart

Le diagramme de Gantt (ou Gantt Chart) est la méthode de planification la plus utilisée aujourd'hui dans le secteur de la construction. Inventée dans les années 1910's par Henry Gantt, elle consiste à visualiser un planning sous forme de graphique à barres. Chaque barre est affectée à une tâche et la longueur de la barre définit la durée de la tâche, ce qui permet de représenter également la structure de répartition du travail (chaque ensemble de barres pouvant regrouper une activité). De plus, les diagrammes de Gantt plus modernes montrent également les relations de dépendances entre les tâches, éliminant un des défauts qui lui était imputé (Cole 1991). L'autre avantage du diagramme de Gantt est qu'il permet de suivre l'avancement, en comparant le planning prévisionnel au réel. Cependant, cette méthode a été souvent critiquée pour la manière confuse et ambiguë avec laquelle elle présente les relations entre les tâches (Benjaoran and Bhokha 2009).

3.4.2 Critical Path Method

La méthode CPM (Critical Path Method ou chemin critique) est une méthode de planification qui a été inventée à la fin des années 1950 dans le domaine aérospatial. Elle fut peu à peu adaptée au domaine de la construction et consiste à mettre en évidence le chemin critique, c'est-à-dire l'ensemble des tâches continues qui ne doivent accuser aucun retard sous peine de retarder le projet dans son ensemble. Grâce au CPM, les responsables de projets de construction ont pu mieux planifier leurs ressources, suivre les retards, adapter leur planning et coordonner leurs sous-traitants (Ali Jaafari 1984). Cependant, la méthode CPM a été largement critiquée pour son incapacité à faire face à la fragmentation de projets compliqués en multiples sous tâches (Pultar 1991) (rendant parfois confus le planning) et à la visualisation complexe engendrée par ce type de planification (Hyun et al. 1999).

3.4.3 Line Of Balance

La méthode LOB (ou planning Chemin de Fer en français) est un outil puissant qui permet de planifier un projet de construction impliquant des séquences (ou tâches) répétitives telles que les IGH (Immeubles de Grande Hauteurs), les routes ou encore les tunnels. Elle consiste à déterminer graphiquement les ressources requises à chaque étape du projet afin de ne pas entraver les étapes suivantes (Arditi, Sikangwan, and Tokdemir 2002). La limite de ce type de planification réside dans la visualisation graphique qui reste très confuse lors de projets complexes car il est

difficile d'y montrer toutes les informations. Aussi, les projets de constructions avec des tâches non répétitives représentent une part non-négligeable du marché de la construction et ne sont pas concernés par cette méthode.

3.4.4 Méthode de simulation de la construction

Depuis les années 1960, la simulation de la construction a été développée pour optimiser les ressources et améliorer la productivité. Des exemples d'outils populaires sont CYCLONE (Sawhney, Abourizk, and Halpin 1998) et STROBOSCOPE (Halpin and Martinez 1999). Cependant, les types d'opérations qui peuvent être simulés doivent être cycliques ou répétitifs et l'industrie de la construction a également été réticente à l'idée d'adopter cette méthode de planification (Fischer and Aalami 1994).

3.4.5 KBES et AI (Knowledge Based Expert System et Artificial Intelligence)

Développée dans les années 80, cette méthode vise à automatiser la création de planning avec la méthode CPM. Cependant, un inconvénient majeur de cette méthode est qu'elle implique une bonne connaissance de l'informatique pour pouvoir coder l'automatisation du processus. De plus, elle ne tient pas rigueur des incertitudes et aléas liés à la phase de construction. Les nouvelles techniques de traitement des données massives ainsi que d'intelligence artificielle permettent aujourd'hui de repenser ces approches. Des outils innovants commencent à voir le jour, comme des algorithmes permettant d'optimiser un planning de construction⁴.

3.4.6 Méthode de visualisation de la construction

Au milieu des années 1990, les chercheurs ont commencé à utiliser les progrès dans les technologies de visualisation pour améliorer la capacité à communiquer les plans de construction et les plannings. Pour ce faire, deux approches majeures ont été développées. D'une part la visualisation 4D (3D + temps), dont le laboratoire CIFE de l'Université de Stanford est l'un des inventeurs (Collier and Fischer 1995), sera largement développée dans ce rapport. D'autre part, la Réalité Virtuelle (Virtual Reality), qui permet une immersion dans le processus de construction ((K. McKinney and Fischer 1998), (Kähkönen 2003)) fait l'objet d'attention récemment. Toutefois, ces méthodes ne permettent pas encore d'automatiser le processus de planification et ne sont généralement utilisées que pour visualiser un projet déjà planifié.

3.4.7 Méthode de la chaîne critique

La méthode de la chaîne critique (Critical Chain Sheduling) est une application de la théorie des contraintes (TOC) à la gestion de projet. C'est une méthode dérivée du CPM qui encourage la

⁴ Notamment chez Alice Technologies <http://www.alicetechnologies.com/> (accédé le 28/08/2017)

réduction des imprévus grâce à une estimation optimiste de la durée de chaque tâche (Herroelen and Leus 2001).

3.4.8 Méthode du Last Planner® System (LPS)

Basée sur le LEAN Construction et mise au point par le *Lean Construction Institute* (Lean Construction Institute 2015), la méthode LPS⁵ vise à planifier des projets de construction de manière participative. Elle permet de déconstruire le projet de construction en s'intéressant d'abord aux dernières tâches à réaliser. Les « derniers planificateurs » correspondent aux personnes qui réalisent le travail et qui sont donc les mieux placées pour en assurer l'exécution, la planification et le suivi.

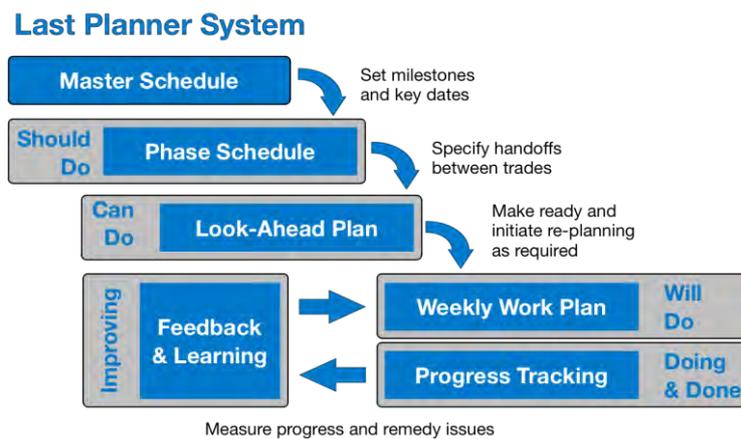


Figure 12 : Les étapes de la méthode LPS

La Figure 12 présente les 5 grandes étapes de la méthode LPS qui constituent 5 niveaux de détails du planning au fil du temps :

- Le Master Schedule (ou planning enveloppe) qui permet de planifier les grandes étapes de la construction.
- Le Phase Schedule (ou planning par phase) qui s'intéresse avec tous les participants aux séquences et à la compression du planning pour les 3 ou 4 mois à venir.
- Le Look-Ahead Plan qui sert à planifier les 6 à 12 prochaines semaines avec l'équipe concernée en identifiant les contraintes.
- Le Weekly Work Plan, un planning détaillé de la construction sur une semaine durant lequel les « derniers planificateurs » s'engagent à réaliser leurs tâches sans contraintes ni barrières.
- Le suivi du processus qui permet de vérifier le « pourcentage de promesses tenues » (PPC⁶) et d'alimenter le processus d'amélioration continue en analysant les causes des erreurs commises.

⁵ Last Planner System signifie littéralement « système du dernier planificateur ».

⁶ PPC est l'abréviation de Percentage of Promises Completed littéralement « pourcentage de promesses tenues »

3.5 Modèle 4D dans les usages BIM

« *Conceptuellement la 4D représente un type de simulation graphique d'un processus* » (traduit de (Kathleen McKinney et al. 1996)). Dans la construction, la 4D permet aux utilisateurs de modéliser un projet en 3D et de le visualiser au fil du temps, en reliant les objets (du modèle 3D) à un planning de tâches, afin de simuler l'érection d'un bâtiment. Il vise à éliminer le flou dans le processus de construction et à aider toutes les parties prenantes à mieux comprendre le projet dans son ensemble. Grâce au développement des modèles 4D, les utilisateurs peuvent créer et visualiser facilement des séquences de construction d'un projet et choisir parmi les différentes alternatives celles qui se révèlent être les plus optimisées.

La 4D fait partie intégrante du processus BIM en étant un des usages habituellement référencés. De ce fait, la plupart des guides BIM définissent et traitent de la 4D, souvent avec l'appellation de « Phase 4D Modeling⁷ » ou « 4D Phasing⁸ ».

Le guide de PennState décrit la 4D comme « un processus dans lequel un modèle 4D (modèle 3D avec la dimension de temps supplémentaire) est utilisé pour planifier l'occupation par étapes dans une réhabilitation, une rénovation, un ajout ou pour montrer la séquence de construction et les exigences d'espace sur un chantier » (The Computer Integrated Construction Research Group The Pennsylvania State University 2011). GSA⁹ dans son guide BIM sur le 4D Phasing (U.S. General Services Administration's Public Buildings Service: Office of the Chief Architect 2009b) précise que « la modélisation 4D est l'intégration d'un modèle 3D (ou BIM) avec un calendrier de construction afin de visualiser la séquence de construction ». Le CRC Construction and Innovation (CRC Construction Innovation 2009) suggère une utilisation de la 4D surtout pour les « grands projets complexes ». Les guides BIM VA (U.S. Department of Veterans Affairs 2010) et NATSPEC (NATSPEC 2011) recommandent quant à eux l'utilisation des modèles BIM/4D dans la planification et la communication avec les sous-traitants afin de mieux comprendre l'impact sur le planning de construction des changements pendant la durée du projet.

Seul le guide BIM de l'université de PennState (The Computer Integrated Construction Research Group The Pennsylvania State University 2011) détaille les exigences de la 4D en termes de compétences, en spécifiant notamment la connaissance de l'ordonnancement et du processus général de construction, la notion de manipulation, de navigation et d'examen d'un modèle 3D et la connaissance du logiciel 4D : géométrie d'importation, gestion des liens vers le planning, production et contrôle des animations. Il s'intéresse également au processus de chaque usage du BIM en répertoriant des schémas de gestion des processus métiers sous forme de BPMN (Figure 13).

⁷ Modélisation en phase 4D

⁸ Phasage 4D

⁹ GSA est l'abréviation de General Service Administration

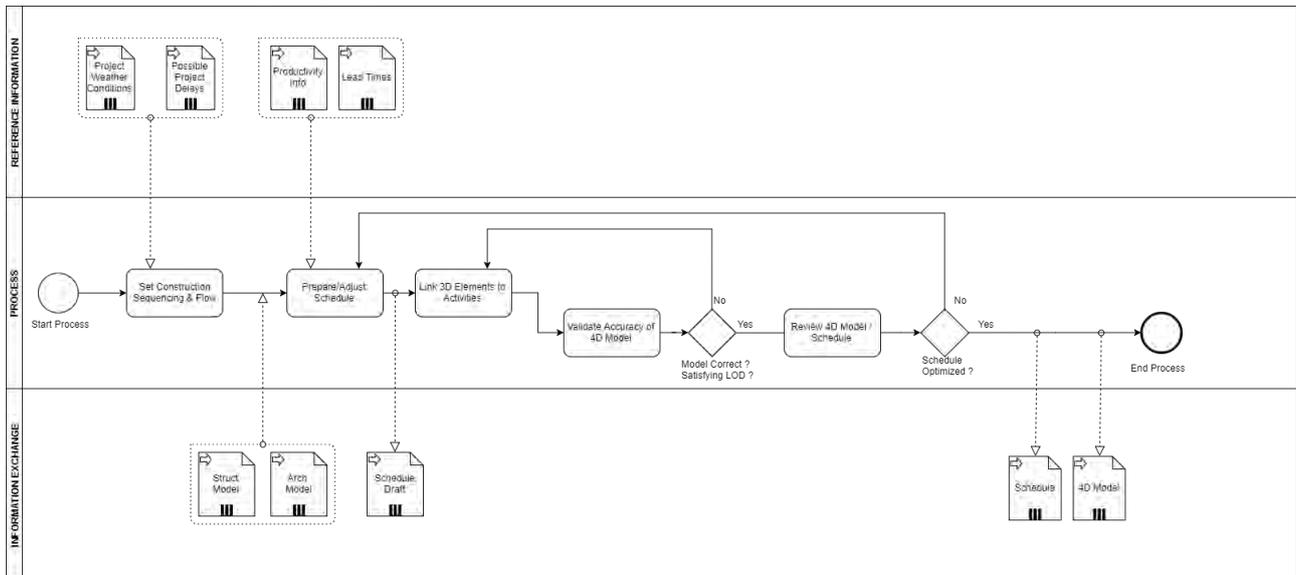


Figure 13 : BPMN de l'usage 4D tiré de (The Computer Integrated Construction Research Group The Pennsylvania State University 2011).

En considérant ces processus métier, on se rend compte de l'importance du niveau de détail. Comme pour d'autres usages BIM dont la finalité repose sur un partage d'informations entre acteurs, il est nécessaire de spécifier ce qui est attendu pour pouvoir réaliser chaque tâche. Pour l'instant ce sujet est traité de manière globale dans la mise en place du BIM, mais a aussi fait l'objet de recherches spécifiques (Botton, Kubicki, and Halin 2015a).

Dans les activités de planification de chantier, notamment en phase de pré-construction d'un bâtiment, les documents issus et coordonnés à partir d'un modèle BIM/4D permettent d'améliorer la transmission de l'information dans l'équipe projet et la capacité du groupe à détecter les erreurs et les incohérences du modèle BIM/4D tant au niveau structurel (mode constructif) qu'organisationnel (logistique de chantier). Ainsi, c'est en centralisant les informations cruciales et en les distribuant à l'ensemble des participants, mais aussi en mettant en avant les erreurs, que l'approche BIM favorise l'émergence de la collaboration. Ce constat s'étend aux activités de préparation et gestion de chantier, lorsque le BIM intègre un modèle 4D.

3.6 Collaboration dans un projet de construction

Le BIM est un processus qui vise à améliorer la collaboration entre les acteurs d'un projet de construction. Pour mieux comprendre et interpréter comment cet outil peut bonifier l'aspect collaboratif d'un projet, il est nécessaire de bien intégrer les principes de la collaboration ainsi que les intervenants clés de ce type de projet. La Figure 14 présente les différents acteurs d'un projet de construction en précisant les liens contractuels et opérationnels entre chaque. Bien que cette structure organisationnelle soit variable d'un projet à l'autre, on peut constater que le nombre de liaisons contractuelles est très important et qu'elles sont centralisés vers un acteur clé : le Maître d'Ouvrage (le représentant du client).

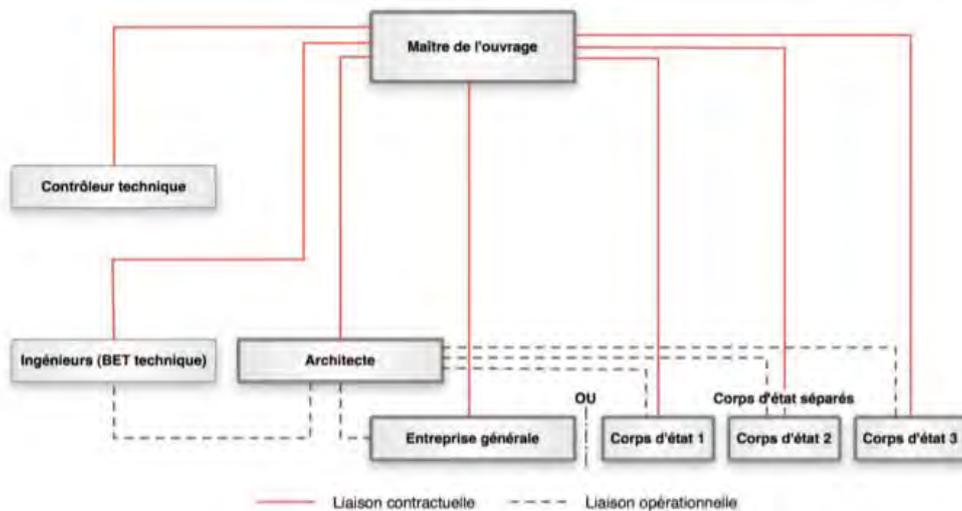


Figure 14 : Les intervenants dans un projet de construction tiré de (Guerriero 2009)

Dans ce contexte, Guerriero s'est intéressée à la modélisation de l'activité de coopération dans le domaine de la construction (Guerriero 2009). Elle se base notamment sur des travaux préalables visant à déterminer des méta-modèles de l'activité de coopération dont l'évolution est présentée dans la Figure 15.

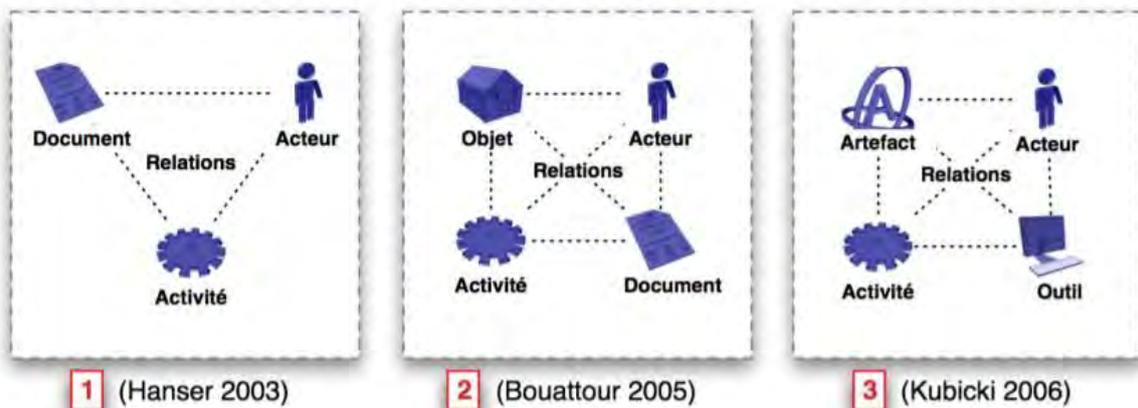


Figure 15 : Evolution du contexte de coopération (2003-2006) tiré de (Guerriero 2009)

La **collaboration** est un processus par lequel deux ou plusieurs personnes ou organisations s'associent pour effectuer un travail intellectuel suivant des objectifs communs¹⁰. Il est important de distinguer la coopération de la collaboration. Lors de la collaboration, les opérateurs ont le même but général et sont impliqués dans la même tâche. Dans la coopération, les opérateurs possèdent des sous-buts immédiats différents mais partagent un même but global (Savoyant, 1992). Cette collaboration peut s'organiser de différentes manières, comme le montre la Figure 16.

	Même instant	Instants différents
Même lieu	AIDE A LA REUNION Rétro-projection d'écran PC Tableaux électroniques Salles de conférences	AIDE MEMOIRE ELECTRONIQUE Filtrage de messages Partage de fichiers Kiosque électronique
Lieux différents	REUNION VIRTUELLE Audioconférences Vidéoconférences Téléréunions	COORDINATION PERMANENTE Messagerie vocale Agendas partagées Workflow

Figure 16 : Matrice Espace / Temps tiré de (David 2001)

3.6.1 Typologie basée sur le temps : Synchrones vs Asynchrone

Deux typologies basées sur le temps sont référencées dans la littérature. Il faut « distinguer le travail synchrone mené simultanément par les différents participants du travail asynchrone permettant à chacun de travailler quand il en a la possibilité. » (David 2001). La collaboration synchrone peut s'effectuer en réunion (virtuelle ou non) est nécessite le travail de plusieurs personnes en même temps. A l'inverse, la collaboration asynchrone ne peut se faire que par des échanges successifs (ex : e-mail) à des moments différents.

3.6.2 Typologie basée sur l'espace : Colocalisation vs Présence virtuelle

Deux types de typologies basées sur l'espace sont référencés dans la littérature. On peut travailler dans le même lieu ou à distance (David 2001). On parle alors respectivement de colocalisation ou de présence virtuelle. Pour donner un exemple, lors d'une réunion de travail, on peut parler de colocalisation (si tous les individus sont dans la même pièce) ou de présence virtuelle (dans le cas d'une visio-conférence).

¹⁰ Définition globale qu'on peut retrouver sur le site <https://fr.wikipedia.org/wiki/Collaboration> (accédé le 30/08/2017)

3.7 Outils 4D

Une vaste communauté de recherche travaille depuis des années sur l'utilisation de l'informatique dans la construction. Le développement de la CAO et les recherches en matière de conception et de construction virtuelles ont permis la modélisation de la géométrie (2D puis 3D) puis la modélisation de l'information sur le bâtiment (BIM). Grâce à cette modélisation de l'information, de nouveaux usages sont apparus au fil du temps dont la 4D. Les logiciels de 4D-CAD (Computer Aided Design) permettent d'associer une tâche d'un planning de tâches à un composant 3D (ou un ensemble de composants d'un modèle 3D). Cela permet d'accéder à un modèle 4D, qui donne des informations spatio-temporelles qui sont utiles dans un projet de construction.

Les logiciels 4D-CAD peuvent supporter différents types de planification dans la construction telle que GANTT (*Synchro*, *Navisworks*), Line Of Balance (*Vico*) et même CPM (*Vico*, *Synchro*). Au-delà de la visualisation liée au temps, des recherches antérieures ont souligné l'importance de la visualisation 4D en tant que "vues multiples coordonnées" (Boton, Halin, and Kubicki 2012). Ces « vues multiples coordonnées » doivent être développées selon les usages attendus de la visualisation 4D (Boton, Kubicki, and Halin 2013). Fischer et al. (Kathleen McKinney et al. 1996) a défini deux générations de logiciels 4D : « Visual 4D » et « Collaborative 4D ». Quand la première prétend améliorer la communication entre toutes les parties prenantes d'un projet, la seconde vise à aider les utilisateurs à interagir autour du modèle 4D et à collaborer afin de formuler les meilleures options pour la construction.

Avec le développement large et rapide de l'approche BIM, le développement de modèles 4D dans les projets BIM a été largement simplifié (Hu and Zhang 2011). Les applications 4D/BIM sont multiples et des applications innovantes ont été introduites afin de mesurer la progression de la construction (Kim, Kim, and Son 2013) ou "l'analyse des conflits et de la sécurité structurale" (Hu and Zhang 2011). Certains travaux dépassent même la portée de la gestion du temps lors de la phase de construction, par exemple l'utilisation du BIM pour la gestion de projet et la surveillance des risques dans [24].

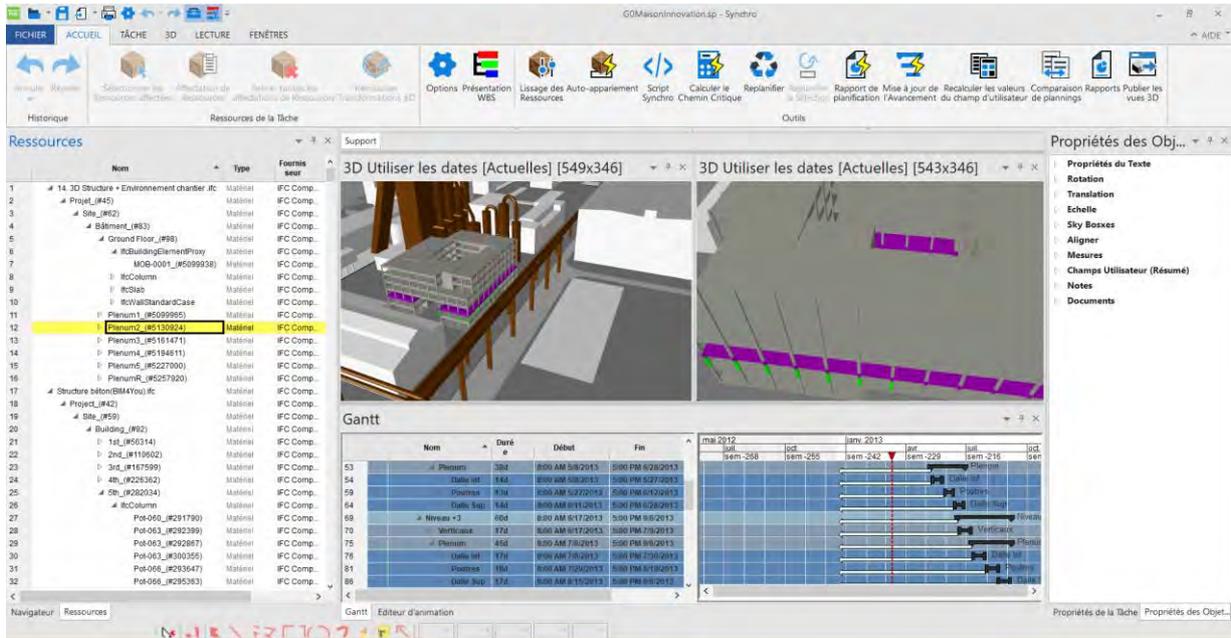


Figure 17 : Capture d'écran de l'interface de Synchro

La Figure 17 présente l'interface de Synchro un des logiciels de 4D-CAD. Afin de mieux comprendre l'utilisation et les usages possibles de la 4D, il est intéressant de regarder les fonctionnalités des logiciels aujourd'hui à disposition sur le marché. L'Annexe 4 mentionne une liste non-exhaustive de fonctionnalités des logiciels de 4D-CAD disponibles en spécifiant leurs caractéristiques, notamment en import de planning et de modèle 3D (les deux constituant du modèle 4D) et en export de vidéo (animation 4D).

4 Proposition d'usages de la 4D

L'état de l'art a permis de mettre en lumière le traitement actuel de la 4D, notamment au sein des BIM Guidelines. Dans un premier temps, cette section s'appuie sur la littérature évoquée précédemment en regroupant les informations et en proposant une définition de 7 grandes familles d'usages de la 4D. Dans un second temps, une proposition d'intégration de ces usages nouvellement définis au processus LEAN Construction sera présentée.

4.1 Regroupement et définition de 7 usages de la 4D

Bien que les usages du BIM (BIM Uses) soient bien documentés et signalés, il existe encore un manque de littérature définissant les usages propres à la 4D. Quelques directives BIM (Penn State (CIC 2010), GSA (U.S. General Services Administration's Public Buildings Service: Office of the Chief Architect 2009b), VA (U.S. Department of Veterans Affairs 2010), NATSPEC (NATSPEC 2011) et CRC (CRC Construction Innovation 2009)) décrivent ce qu'est la 4D et définissent la valeur potentielle qu'elle apporte dans le processus. Certaines décrivent également les ressources et les compétences requises pour le déploiement d'une telle technologie dans un projet BIM (CIC 2010). Dans la littérature scientifique, les chercheurs se sont concentrés sur l'identification des avantages et les entraves de la mise en œuvre de la 4D (Dawood and Sikka 2006). Basu et al. définissent les processus de planification dans lesquels la 4D vaut la peine d'être utilisée, en se concentrant sur les aspects de communication et de planification. Certaines autres publications se concentrent également sur des aspects spécifiques de la 4D tels que la sécurité (Benjaoran and Bhokha 2010) ou la gestion de la logistique du site (Ma, Shen, and Zhang 2005).

Cette section vise à affiner ces usages, actuels et futurs, de la 4D en les classant dans 7 catégories présentées ci-dessous.

4.1.1 U1 : Communication visuelle

L'utilisation centrale d'un modèle 4D est de visualiser un processus de construction. Il permet également une meilleure compréhension de l'ensemble du projet par les parties prenantes telles que les gestionnaires de la construction, les clients, les concepteurs et les sous-traitants. Cela permet notamment aux personnes « non-expertes » de visualiser de manière simplifiée le processus de construction du bâtiment et aux personnes « expertes » d'être sûres qu'elles parlent bien de la même chose. En outre, cela peut aider les concepteurs à saisir des informations décisives provenant des clients et des propriétaires qui peuvent affecter la construction. En effet, la visualisation 4D permet aux non-experts de comprendre facilement les problèmes liés à l'espace et au temps.

4.1.2 U2 : Planification 4D

C'est l'usage principal et celui pour lequel a été créé la 4D initialement. Grâce à la simulation 4D, les planificateurs sont en mesure de prévoir les phases de construction et le séquençage des tâches. Ils peuvent tester leurs prédictions avec d'autres alternatives afin d'optimiser le calendrier général de construction (Basu and Psp 2007). Il peut également être utile de déterminer et d'affiner plus précisément la durée de chaque tâche.

4.1.3 U3 : Gestion de la sécurité

La 4D permet également de mieux anticiper et détecter les problèmes de sécurité potentiels sur un chantier. D'une part, en modélisant les équipements de sécurité nécessaires dans le modèle 4D (Sulankivi and Kähkönen 2010). Cela permet d'anticiper les emplacements où les équipements de sécurité sont nécessaires et de mieux prévoir leurs nombres et leurs réutilisations (rotation d'équipements) à chaque étage de la construction en visant une optimisation de l'utilisation des équipements. D'autre part, en assurant la sécurité structurale du bâtiment au cours de sa construction, en fournissant, par exemple, une visualisation de la résistance de la structure du béton par rapport. Cela permet aux concepteurs de visualiser les durées de tâches minimales de réalisation des éléments porteurs de la structure durant lesquelles la sécurité structurale n'est pas mise en danger.

4.1.4 U4 : Gestion du Plan d'Installation de Chantier (PIC)

La 4D peut aussi être utilisée pour visualiser une gestion du site de construction au fil du temps. En effet, le Plan d'Installation de Chantier (PIC) est majoritairement employé sur les chantiers de manière statique (plan 2D). La 4D permettrait une visualisation dynamique du PIC aidant ainsi les responsables de la construction à définir les zones de stockage changeantes, les positions des grues et les accès au chantier pendant l'ensemble du projet (Ma, Shen, and Zhang 2005). Il contribue également à la prévision des conflits d'espace de travail sur place et des conflits environnementaux tels que la circulation et les flux piétonniers proches du site.

4.1.5 U5 : Détection de conflits spatio-temporels

La détection de conflits 3D est déjà l'une des principales utilisations du BIM (Clash Detection). Mais au-delà de cette utilisation 3D, la détection de conflits 4D fournit une résolution spatio-temporelle à des conflits. En effet, en ajoutant la dimension temporelle à la détection des conflits, on pourrait éviter et visualiser des conflits qui peuvent se produire à un instant et à une localisation spécifique. Aussi, on pourrait visualiser des conflits qui peuvent être statiques et dynamiques et se produire pendant la construction (Heesom and Mahdjoubi 2004).

4.1.6 U6 : Définition de la méthode de construction

En mettant en œuvre un modèle 4D, les utilisateurs ont les moyens de concevoir des travaux temporaires (échafaudages etc.), de tester différentes alternatives de construction et d'optimiser les interfaces entre les sous-traitants (Mahalingam, Kashyap, and Mahajan 2010). Ces aspects se révèlent essentiels pendant la phase de conception et de pré-construction. De plus, grâce aux logiciels 4D, il est possible d'animer un modèle 4D avec deux hypothèses de construction différentes, avec des ressources et des coûts potentiellement différents afin de choisir la solution la plus optimisée.

4.1.7 U7 : Suivi de chantier

Le modèle 4D peut également prendre en charge une fonction de suivi de chantier en fournissant aux utilisateurs un enregistrement de la progression de la construction du bâtiment. Les responsables de la construction sont en mesure de comparer la "version prévue" par rapport à la "version réelle" (Mani, Feniosky, and Savarese 2009). Cela permet d'évaluer la planification quotidienne par rapport à l'avancement réel quotidien afin d'effectuer les ajustements nécessaires et de fournir d'éventuels retours pour les projets futurs.

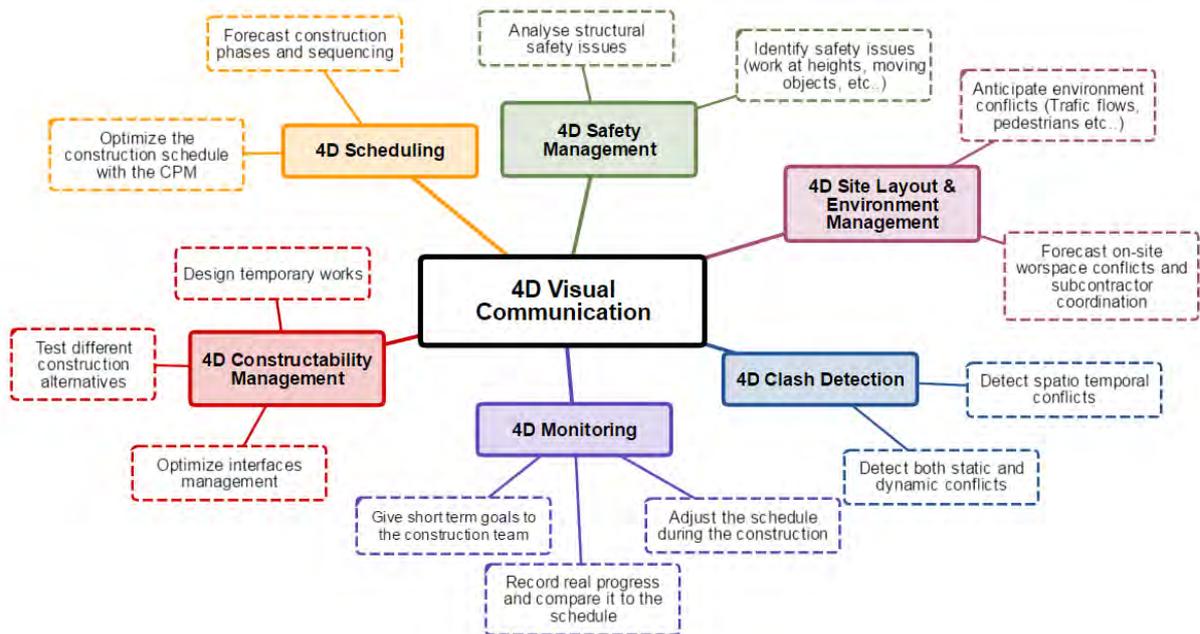


Figure 18 : Cartographie des usages 4D

La Figure 18 présente une cartographie des usages de la 4D proposés dans cette section. L'usage de "communication visuelle" est considéré comme central et transverse, étant lié à toutes les autres usages 4D. En effet, les utilisateurs s'appuient sur la visualisation 4D pour choisir les meilleures options, simuler et communiquer avec toutes les parties prenantes. En raffinant les usages, on se rend compte qu'il est, de fait, inclus de manière commune à tous les usages et qu'il est par nature différent des autres usages.

4.2 Acteurs clés impliqués dans ces usages

Il est intéressant de s'intéresser aux acteurs que l'on pourrait mettre en relation avec ces usages proposés. Une proposition d'identification des acteurs clés impliqués est présentée dans le Tableau 1. Celui-ci suggère également l'association pour chaque usage de deux types d'intervenant :

- Les émetteurs d'informations de type 4D¹¹
- Les utilisateurs principaux des informations émises

Tableau 1 : Acteurs impliqués dans les différents usages proposés

Usages	Emetteurs d'information 4D	Utilisateurs principaux
U1 : Communication	<ul style="list-style-type: none"> - Architecte - Bureau d'études - Bureau de contrôle - Entreprise - Coordonnateur OPC 	<ul style="list-style-type: none"> - Client - Architecte - Bureau d'études - Bureau de contrôle - MOA - Entreprise - Coordonnateur SPS - Coordonnateur OPC - Sous-traitants
U2 : Planification 4D	<ul style="list-style-type: none"> - Architecte - Bureau d'études - Entreprise - Coordonnateur OPC 	<ul style="list-style-type: none"> - Client - Architecte - Bureau d'études - Bureau de contrôle - MOA - Entreprise - Coordonnateur SPS - Coordonnateur OPC - Sous-traitants
U3 : Gestion de la sécurité	<ul style="list-style-type: none"> - Bureau de contrôle - Entreprise - Coordonnateur SPS - Coordonnateur OPC 	<ul style="list-style-type: none"> - Bureau de contrôle - Entreprise - Coordonnateur SPS - Coordonnateur OPC - Sous-traitants
U4 : Gestion du PIC	<ul style="list-style-type: none"> - Entreprise - Coordonnateur OPC 	<ul style="list-style-type: none"> - Entreprise - Coordonnateur SPS - Coordonnateur OPC - Sous-traitants
U5 : Conflits spatio-temporels	<ul style="list-style-type: none"> - Bureau d'études - Bureau de contrôle - Entreprise - Coordonnateur OPC 	<ul style="list-style-type: none"> - Architecte - Bureau d'études - Bureau de contrôle - Entreprise - Coordonnateur SPS - Coordonnateur OPC - Sous-traitants
U6 : Méthode de construction	<ul style="list-style-type: none"> - Architecte - Bureau d'études 	<ul style="list-style-type: none"> - Architecte - Bureau d'études - Bureau de contrôle - Entreprise - Coordonnateur OPC - Sous-traitants
U7 : Suivi de chantier	<ul style="list-style-type: none"> - Entreprise - Coordonnateur OPC - Sous-traitants 	<ul style="list-style-type: none"> - Client - Architecte - MOA - Entreprise - Coordonnateur SPS - Coordonnateur OPC - Sous-traitants

¹¹ Une information de type 4D peut se présenter de différentes manières : Modèle 4D, Vidéo, Animations.

4.3 Proposition d'intégration des usages au processus LEAN Construction

Les sections précédentes ont montré que le BIM et le LEAN Construction sont deux outils confirmés dans la construction et on peut ajouter que "le BIM et le LEAN ne sont pas indépendants l'un de l'autre" et que "des bénéfices importants peuvent être réalisés par la mise en œuvre simultanée de l'outil BIM et du processus LEAN" (Bhatla and Leite 2012). En effet, il est évident que les logiciels 4D-CAD, grâce à la visualisation 4D, peuvent supporter certains des besoins du LEAN en termes de planification et de production. Cependant, mis à part quelques travaux isolés, prenant en compte des problématiques ciblées (Sacks, Radosavljevic, and Barak 2010a), aucun cadre pour la mise en œuvre conjointe globale et intégrée des deux technologies n'a encore été développé. Cette section vise à rejoindre le BIM et le LEAN via les usages définis préalablement en trouvant des fonctionnalités futures pour que la 4D intègre le processus LEAN.

4.3.1 Visualisation

Le LEAN et la 4D sont tous deux axés sur la visualisation. D'une part, la gestion visuelle dans le LEAN Construction est prépondérante, notamment avec le Kanban et l'utilisation de Post-It de couleurs représentant des tâches « À faire », « En cours » ou « Terminé » (To Do / Doing / Done). Cela permet une meilleure communication entre les parties prenantes. D'autre part, un des avantages centraux de la 4D est la visualisation qui vise à une meilleure compréhension et une meilleure communication. KanBIM (Sacks, Radosavljevic, and Barak 2010b) est un exemple de la mise en œuvre d'un modèle 3D BIM lié à l'utilisation du Kanban. Il pourrait être intéressant de lier le Kanban à un modèle 4D afin de le visualiser avec un code couleur mutuel. Par exemple : Une tâche "Terminé" (Exemple : Murs du niveau inférieur) colorée en vert sur le modèle 4D et apparaissant en couleur verte (« Terminé ») sur le panneau magnétique Kanban.

4.3.2 Planification

La méthode du Last Planner System (LPS) est caractérisée par différents niveaux de planification, allant du Master Schedule qui représente le planning général et global au Daily Check-In qui se concentre sur les tâches quotidiennes à réaliser. En ce qui concerne le BIM, différents niveaux de développement (LOD = Level Of Details ou Level Of Development) ont été caractérisés pour qualifier un modèle 3D (Botton, Kubicki, and Halin 2013). Le guide LOD du BIMForum (parmi les plus utilisés aujourd'hui) met en lumière l'importance d'avoir plusieurs niveaux de développement au cours d'un projet de construction (Ikerd et al. 2013). Botton et al. Mettent en évidence notamment qu'en phase de construction le LOD doit être supérieur au LOD en phase de conception (Botton, Kubicki, and Halin 2015b). Il semblerait donc logique que ces LOD augmentent proportionnellement avec les différents niveaux de planification du LPS. En effet, le modèle 4D ne

nécessite pas d'être détaillé en phase de conception, lorsqu'on planifie les grandes phases d'un projet. En revanche, il est primordial qu'il soit plus détaillé en phase de construction quand on réfléchit à la mise en œuvre. Le tableau 1 étudie une structure pour intégrer, dans un modèle 4D, les différents niveaux de planification de la méthode LPS et les différents LOD du modèle BIM.

4.3.3 Sécurité

Le LEAN Construction et BIM sont tous deux des outils appropriés pour améliorer la gestion de la sécurité sur le chantier. Le premier vise à atteindre le principe du « 0 accident » en suivant la directive des 5S. Le deuxième s'avère utile pour visualiser les risques et les dangers d'un projet de construction au fil du temps (que ce soit pour la sécurité des personnes ou la sécurité structurelle) et pour concevoir des équipements de sécurité nécessaires.

4.3.4 Plan d'Installation de Chantier (PIC)

Le LEAN Construction s'appuie sur les principes du LEAN pour réduire au maximum les mouvements inutiles sur un chantier de construction. La mise en place d'une gestion du PIC dynamique en 4D pourrait être efficace pour anticiper et recommander le stockage de matériaux de manière efficiente. Le Smart Construction Planner (SCP) (Guerriero et al. 2017) développé au LIST fournit déjà un système de planification dynamique du PIC et des fonctionnalités de suivi des matériaux. La recommandation de stockage des matériaux au fil du projet ainsi que la visualisation 4D dynamique du chantier pourraient être des fonctionnalités intéressantes à mettre en œuvre.

4.3.5 Détection des conflits

Grâce au BIM, les utilisateurs peuvent détecter des conflits 4D, c'est-à-dire les conflits spatio-temporels qui sont soit statiques soit dynamiques. L'un des objectifs du LEAN Construction est d'atteindre le principe du « 0 rework » et repose sur la gestion de la qualité totale. Par conséquent, la technologie 4D/BIM peut être améliorée pour détecter automatiquement les conflits spatio-temporels afin de les anticiper selon les principes du LEAN.

4.3.6 Méthode de construction

Les principes du LEAN sont basés sur la diminution des déchets et du gaspillage, notamment grâce à l'utilisation du Value Stream Mapping (VSM) qui met l'accent sur la suppression des composants qui n'apportent aucune valeur ajoutée. La 4D, elle, est utile lorsqu'il s'agit de simuler différentes alternatives de construction. Un système de simulation et de prise de décision basé sur les logiciels 4D/CAD et l'application des principes du LEAN pourraient être une caractéristique intéressante à développer afin d'optimiser la gestion de la méthode de construction.

4.3.7 Suivi de chantier

Le LEAN Construction est également axé sur une amélioration continue (principe de Deming, PDCA) et applique le « Planned Percent Completed » (PPC) : un calcul du pourcentage de « promesses tenues ». En effet, les différentes parties prenantes s'engagent sur un nombre de tâches à réaliser. Le PPC permet d'analyser et donne un feedback sur la tenue de ces engagements. En outre, l'une des utilisations de la 4D consiste à capturer la progression réelle (par exemple par l'analyse d'image ou la numérisation laser, etc.) afin de la comparer à la progression prévue (c'est-à-dire l'état du modèle 4D à la date considérée) : l'usage de suivi de chantier. Ces deux aspects pourraient être combinés afin de générer un système automatique de détection de la progression, qui pourrait être visualisé en 4D.

Tableau 2 : Usages de la 4D et du LEAN Construction et interactions

4D Uses	Added-value of 4D/BIM for LEAN construction uses	LEAN Construction Uses	
4D Visual Communication	To do/Doing/Done 4D visualization (Better understanding, communication and collaboration between all the construction stakeholders)	Visual Management Kanban	
4D Scheduling	Last Planner System Collaborative planning (Better forecasting and optimizing of construction project management at different level of granularity)	Master schedule	LPS
		Phase schedule	
		Look-Ahead schedule	
		Weekly Work Plan	
		Daily Check-in	
4D Site Layout & Environment Management	Dynamic Site Layout Planning System Material Tracking, Storage Recommendation (Better management of workspace conflict and deliveries by comparing with on-going operations)	5S Dynamic site layout Just-in-time delivery	
4D Safety Management	Resource affectation with co-activity 4D alerts module (Better management of safety risks)	5S Dynamic site Layout "0 accident principle"	
4D Clash Detection	Dynamic Site Layout (Better management of spatio-temporal issues)	Total Quality Management "0 rework principle"	
4D Constructability Management	Simulation and decision making system (Better optimizing of construction strategy choices)	Value Stream Mapping	
4D Monitoring (As plan vs As Built)	Automatic progress detection system (Better adjustments of planning during construction)	Percent Plan Completed (PPC) Andon	

Le Tableau 2 résume les usages du LEAN Construction et du BIM ainsi que les caractéristiques communes, à développer. Il lie les deux approches via la colonne centrale qui fournit des informations sur les potentielles applications à mettre en œuvre et souligne la valeur ajoutée que l'on peut attendre de la technologie BIM appliquée aux usages du LEAN Construction.

5 Questionnaire d'étude sur les usages de la 4D

Nous avons vu précédemment qu'une liste d'usages, tirée d'une synthèse de la littérature scientifique et des guides BIM existants, avait été proposée. L'étape suivante dans la méthodologie est la validation de ces usages par les professionnels du secteur de la construction. Afin d'obtenir l'avis des professionnels, un questionnaire a été mis au point. Cette section discute d'abord des objectifs et des cibles de celui-ci ainsi que de sa structure. Puis, elle présente et discute les résultats obtenus. L'ensemble du questionnaire est disponible en ligne¹².

5.1 Objectifs et cibles

L'enquête menée au sein du projet *4DCollab* sera divisée en deux parties. Une première partie où le questionnaire vise à capter l'intérêt des professionnels de la construction pour chaque usage 4D préalablement décrit est directement reliée à notre travail de recherche. Une seconde partie qui va servir à mesurer l'acceptation et la perception qu'ont les utilisateurs à l'égard de cette nouvelle technologie, grâce à un questionnaire unifié et scientifiquement reconnu : le questionnaire UTAUT (Venkatesh et al. 2003). Les résultats de cette seconde partie ne seront pas discutés ici.

Il est ouvert à tous les profils (Architecte, Ingénieur, Maître d'ouvrage etc..) impliqués dans l'acte de construire. Le but est de soumettre ce questionnaire aussi bien aux personnes qui n'utilisent pas la 4D qu'aux personnes qui s'en servent déjà. En effet, tous les retours sont intéressants car une personne non-utilisatrice peut donner un avis pertinent, notamment si elle est experte d'un domaine se rapprochant d'un des usages définis.

Aussi, comme il est parfois compliqué d'obtenir l'avis de professionnels, le questionnaire a pour but de recenser des informations sur d'autres aspects de la 4D :

- Phase d'application de la 4D
- Acteurs impliqués dans l'utilisation de la 4D
- Logiciels de 4D/CAD connus et utilisés

Afin d'obtenir un maximum de réponses, le questionnaire a été traduit en anglais afin d'être diffusé largement. En France, il a été transmis (grâce au partenaire MAP-CRAI) à un large réseau d'architectes et de partenaires du laboratoire. Au Luxembourg, il a été transmis à l'OAI (Ordre des Architectes et des Ingénieurs). Via Internet, le questionnaire est disponible sur le site du projet *4DCollab* et a été repartagé sur *Twitter* par l'ensemble des partenaires du projet. Aussi, via le réseau social *LinkedIn*, il a été partagé sur le groupe *Pratiques du BIM*, un groupe réunissant près de 4000 membres et spécialistes francophones du BIM et sur d'autres groupes anglophones.

¹² Le questionnaire est accessible en ligne via le lien suivant : <https://goo.gl/forms/ZbLf4PvMf83J2A2H2> (accédé le 31/08/2017)

5.2 Structure du questionnaire

Il fallait pour le traitement des réponses, pouvoir distinguer les personnes utilisatrices et non-utilisatrices de la 4D. Pour ce faire, une première question permet de rediriger les deux types de profils vers des questions formulées différemment. Néanmoins, les deux types de profil ont été interrogés sur les mêmes questions et ont répondu au même nombre de questions, seule la formulation de celles-ci différée (comme le montre la Figure 19).

La structure du questionnaire est divisée en quatre parties. Une introduction, présentant la 4D et l'objectif du questionnaire, qui permet d'orienter les personnes selon leur profil. Une première partie où le questionnaire vise à capter l'intérêt des professionnels de la construction pour chaque usage 4D préalablement décrit. Une seconde partie qui va servir à mesurer l'acceptation et l'usage de cette nouvelle technologie grâce à un questionnaire unifiée et scientifiquement reconnu : le questionnaire UTAUT (Venkatesh et al. 2003). Enfin, la dernière partie qui permet de retranscrire le profil des personnes répondant au questionnaire.

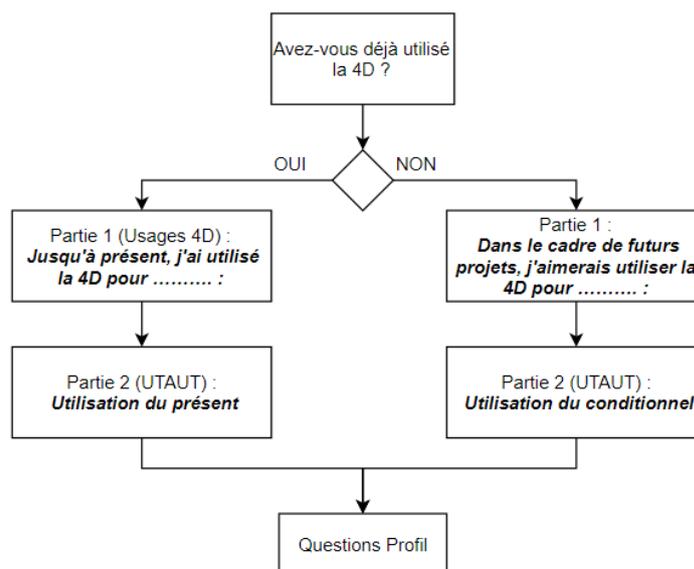


Figure 19 : Structure du questionnaire

5.2.1 Partie 1 : Usages de la 4D

Dans cette partie, six des sept usages présentés précédemment sont testés. En effet, l'usage de communication visuelle n'a pas été retenu car il est présent de manière commune à chaque usage. On parle de visualisation d'un modèle 4D pour chaque usage. L'idée est de recueillir l'utilité perçue de chaque usage ainsi que la fréquence d'utilisation. Pour ce faire, chaque usage est décrit brièvement et présenté à la cible qui doit ensuite répondre à deux questions obligatoires :

J'estime que, pour l'usage X, la 4D est : *

1 = Pas utile ; 2 = Peu utile ; 3 = Moyennement utile ; 4 = Utile ; 5 = Très utile

	1	2	3	4	5	
Pas utile	<input type="radio"/>	Très utile				

Jusqu'à présent, j'ai utilisé la 4D pour l'usage X : *

1 = Pas du tout ; 2 = Très peu ; 3 = Peu ; 4 = Souvent ; 5 = Très souvent

	1	2	3	4	5	
Pas du tout	<input type="radio"/>	Très souvent				

OU (selon profil)

Dans le cadre de futurs projets, j'aimerais utiliser la 4D pour l'usage X : *

1 = Pas du tout ; 2 = Très peu ; 3 = Peu ; 4 = Souvent ; 5 = Très souvent

	1	2	3	4	5	
Pas du tout	<input type="radio"/>	Très souvent				

Enfin, une dernière question facultative constituée d'une grille de réponses qui permet de mesurer l'apport de l'usage pour une liste de bénéficiaires.

La 4D, en tant qu'aide à l'usage X, me permettrait de :

Vous pouvez choisir plusieurs réponses

	Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Indifférent	D'accord	Tout à fait d'accord
Faciliter l'accès au marché	<input type="radio"/>				
Renforcer le partage d'idées	<input type="radio"/>				
Augmenter la productivité	<input type="radio"/>				
Améliorer la communication	<input type="radio"/>				
Faciliter le processus de décision	<input type="radio"/>				
Améliorer la qualité des résultats produits	<input type="radio"/>				
Développer l'image de marque	<input type="radio"/>				
Améliorer la sécurité sur chantier	<input type="radio"/>				

Cette liste est tirée d'une précédente étude menée par le LIST sur la mesure du retour sur investissement de la mise en place du BIM (Guerriero, Kubicki, and Reiter 2016). Pour chaque bénéfice potentiel, la cible peut donner son avis (de *Pas du tout d'accord* à *Tout à fait d'accord*). Une section de commentaire est laissée libre à la fin de chaque usage pour capter des remarques complémentaires.

5.2.2 Partie 2 : Perception de la technologie 4D

Cette partie du questionnaire est une adaptation du questionnaire UTAUT (Venkatesh et al. 2003) qui a déjà été utilisé pour mesurer l'impact de l'acceptation de la technologie BIM (Howard, Restrepo, and Chang 2017). Le but est de se servir d'un questionnaire unifié qui a déjà été validé par une vaste communauté de chercheurs. Le questionnaire UTAUT contient deux grands types de questions : sur l'implication et sur la perception des utilisateurs de la technologie 4D.

5.3 Résultats et discussions

Cette section discute des premiers résultats reçus suite à la diffusion du questionnaire¹³. Notre analyse se limite à la partie 1 du questionnaire, le traitement des données liées à la perception de la technologie étant réalisée plus tard, dans le cadre de *4DCollab*. Le nombre de personnes ayant répondu s'élève à 30 et une synthèse de leurs réponses est présentée dans cette section.

5.3.1 Profil des répondants

L'ensemble des personnes ont répondu à la question sur la profession. La proportion des métiers représentés dans les répondants au questionnaire est présentée dans la Figure 20. Il est important de noter que la totalité des réponses proviennent de pays francophones (France (77%), Luxembourg, Belgique, Suisse, Tunisie et Cameroun (23%)).

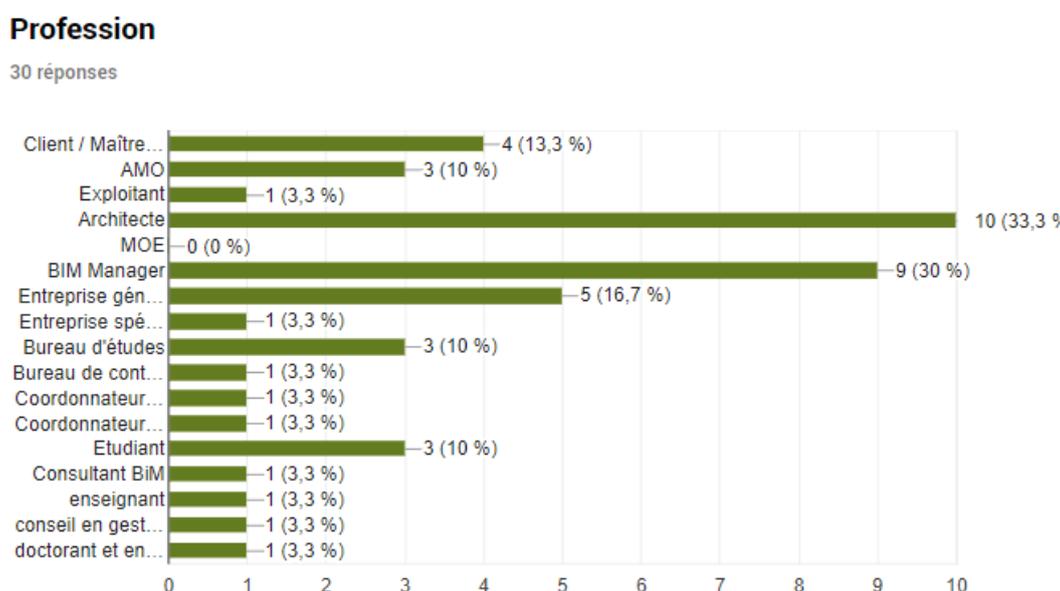


Figure 20 : Profession des personnes ayant répondu au questionnaire (plusieurs réponses possibles)

Les architectes sont majoritairement représentés en apportant un tiers des réponses au questionnaire, suivis de près par les BIM managers (30%). Cette proportion importante de réponses venant de deux corps de métiers nous pousse à relativiser et à pondérer les données collectées. En effet, bien qu'ayant une vision d'ensemble du processus de construction, ils peuvent être inconsciemment guidés vers certains usages directement en lien avec leur profession (exemple : les architectes interviennent plutôt en phase de conception).

¹³ Le questionnaire est encore ouvert aux réponses, mais pour des besoins de rédaction de ce mémoire, nous allons utiliser les données reçues à la date du 23/08/2017.

J'exerce mon métier depuis :

29 réponses

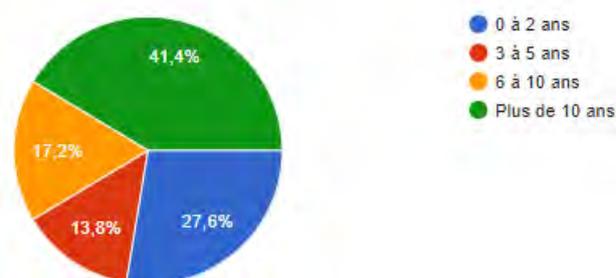


Figure 21 : Réponses au questionnaire sur l'expérience des participants (réponse facultative)

Aussi l'expérience des personnes ayant répondu au questionnaire est assez diverse. Près d'un tiers des répondants possèdent moins de 3 ans d'expérience dans leur métier quand 41 % des personnes possèdent plus de dix années d'expérience (Figure 21). Cette hétérogénéité est intéressante dans le traitement des résultats car permet d'avoir une vue d'ensemble de la profession.

Enfin, les participants proviennent d'entreprises de tailles variées même si la moitié (48%) travaille dans une entreprise de taille intermédiaire (ETI = plus de 250 personnes). L'autre moitié (52%) se répartit dans des structures plus petites comme des PME¹⁴ (24%) ou des TPE (28%) (Figure 22). Là encore, l'hétérogénéité du panel en ce qui concerne les structures des entreprises est très intéressante à analyser et peut donner de la consistance aux résultats.

Taille de l'entreprise

25 réponses

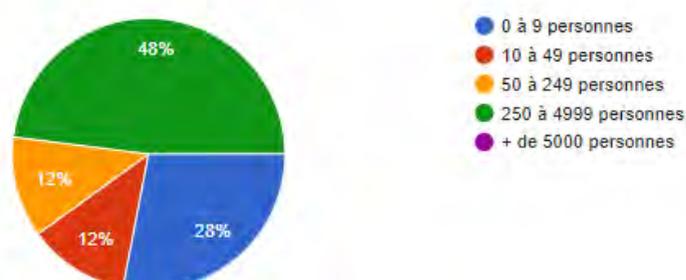


Figure 22 : Réponses au questionnaire sur la taille de l'entreprise des répondants (réponse facultative)

¹⁴ PME est l'abréviation de Petites et Moyennes Entreprises

5.3.2 Utilisateurs / Non-utilisateurs

Tout d'abord, la première question permet de sonder l'utilisation actuelle de la 4D. Sur les résultats obtenus (Figure 23), près de 37% des répondants déclarent avoir déjà utilisé la 4D, ce qui prouve que la 4D est en progression [dans la région concernée] mais qu'elle reste encore peu utilisée dans les projets de construction. Les réponses sont aussi à nuancer car le nombre de réponses n'est pas (encore) significatif. Surtout, les personnes ayant répondues sont majoritairement orientées vers l'innovation dans la construction (ex. chercheur, BIM manager), et donc plus à même d'utiliser des technologies émergentes.

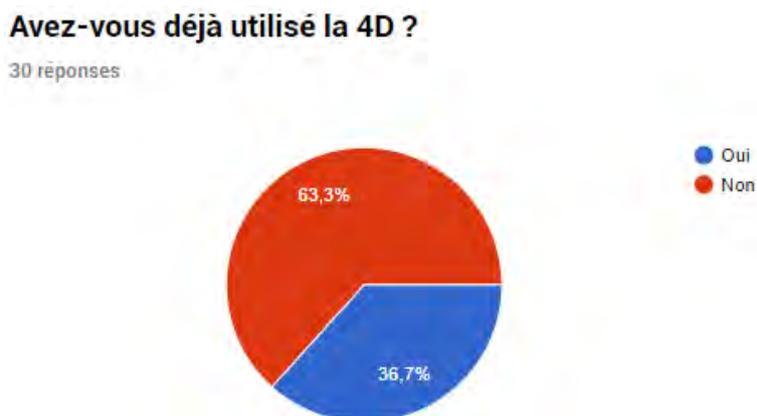


Figure 23 : Réponses du questionnaire sur l'utilisation de la 4D (en pourcentage)

5.3.3 Utilité perçue des usages

Le Tableau 3 présente la moyenne des résultats obtenus sur l'utilité perçue de chaque usage. Il est important de dissocier dans ces résultats les « utilisateurs 4D » des « non-utilisateurs 4D ». Pour rappel, les participants pouvaient répondre à cette question sur l'utilité via une échelle allant de 1 à 5.

Tableau 3 : Moyenne de l'utilité perçue pour chaque usage

Usages 4D	Utilisateurs de la 4D	Non-utilisateurs de la 4D
Planification	3,27	4,11
Suivi de chantier	3,90	4,32
Gestion du PIC	3,40	3,89
Sécurité	3,40	3,95
Détection des conflits	3,70	4,42
Méthode de construction	3,80	3,95
Moyenne général	3,58	4,11

Il est déjà intéressant de noter la différence de notes entre les « utilisateurs 4D » qui sont plus pessimistes sur l'utilité de chaque usage que les « non-utilisateurs 4D ». Ce résultat pourrait laisser présager que les méthodes ou outils liés à la 4D présentent des défauts.

Malgré cela, l'ensemble des usages proposés obtient une note supérieure à 3 (en moyenne) ce qui démontre l'utilité certaine de ceux-ci. Certains usages se distinguent des autres avec une moyenne légèrement supérieure (Suivi de Chantier, Méthodes de construction et Détection de conflits). A l'inverse, deux usages obtiennent des moyennes légèrement inférieures (Gestion de la sécurité et Gestion du PIC). L'usage de planification se situe entre ces deux groupes.

Même si le nombre de réponses ne permet pas de tirer de conclusions définitives, il permet néanmoins de dégager une tendance globalement positive de la perception des usages proposés, et plus nettement pour trois d'entre eux.

5.3.4 Fréquence et Intention d'utilisation des usages

Concernant la fréquence d'utilisation des usages présentés, la moyenne se révèle être assez basse. En effet, les « utilisateurs 4D » ont répondu (en moyenne) en dessous de 2,5 pour tous les usages, excepté pour l'usage de Méthode de construction (Tableau 4). Ces résultats confirment l'impression de départ sur l'utilisation encore assez marginale de la 4D qui reste une pratique émergente. Ils montrent également que les « utilisateurs 4D » se servent de la 4D en s'orientant vers un usage prédominant : la revue des méthodes de construction.

Tableau 4 : Fréquence et Intention d'utilisation des usages

Usages 4D	Utilisateurs de la 4D	Non-utilisateurs de la 4D
Planification	2,27	3,84
Suivi de chantier	1,90	4,26
Gestion du PIC	2,40	3,63
Sécurité	1,60	3,53
Détection des conflits	2,10	4,11
Méthode de construction	2,80	3,58
Moyenne général	2,18	3,82

L'avis des « non-utilisateurs 4D » est aussi intéressant à analyser. On ne peut pas parler pour eux de fréquence d'utilisation mais plutôt d'intention d'utilisation. Le sondage révèle une intention assez élevée pour l'intégralité des usages confirmant ainsi l'optimisme dégagé sur la première question. Les « non-utilisateurs 4D » seraient donc prêts à mettre en œuvre la plupart des usages

présentés dans leurs futurs projets. Si leur avis est intéressant à analyser, il faut tout de même le pondérer car leur expérience 4D reste vierge. Ils sont donc moins à même de cerner les potentiels difficultés concernant la mise en œuvre de ces usages 4D.

5.3.5 Logiciels de 4D connus et utilisés

Dans la liste des logiciels proposés aux répondants, une tendance assez nette se dégage. La majeure partie des personnes connaissent *Navisworks* (80 %) ce qui confirme sa place de leader sur le marché des logiciels de 4D. *Synchro* est connu par 35% des répondants. Les autres logiciels proposés obtiennent des pourcentages relativement faibles (Figure 24).

Je connais les logiciels de 4D suivants :

30 réponses

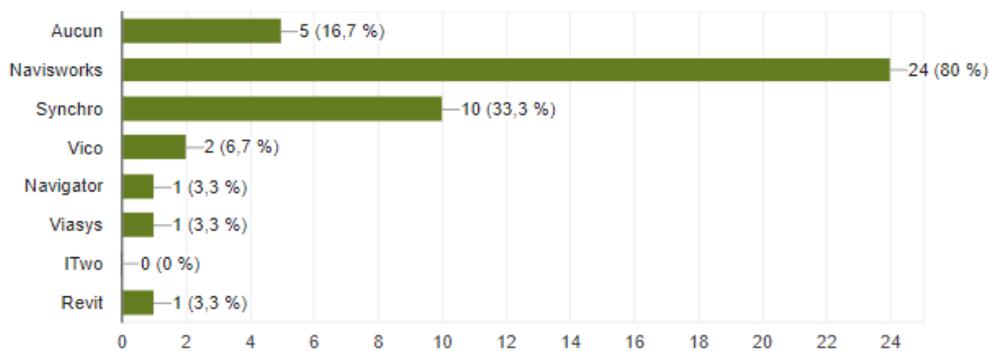


Figure 24 : Réponses collectées sur la connaissance des logiciels 4D (plusieurs réponses possibles)

Concernant l'utilisation des logiciels de 4D proposés, là encore *Navisworks* se révèle être le plus utilisé par les personnes ayant répondu à notre étude (Figure 25).

J'utilise les logiciels de 4D suivants :

27 réponses

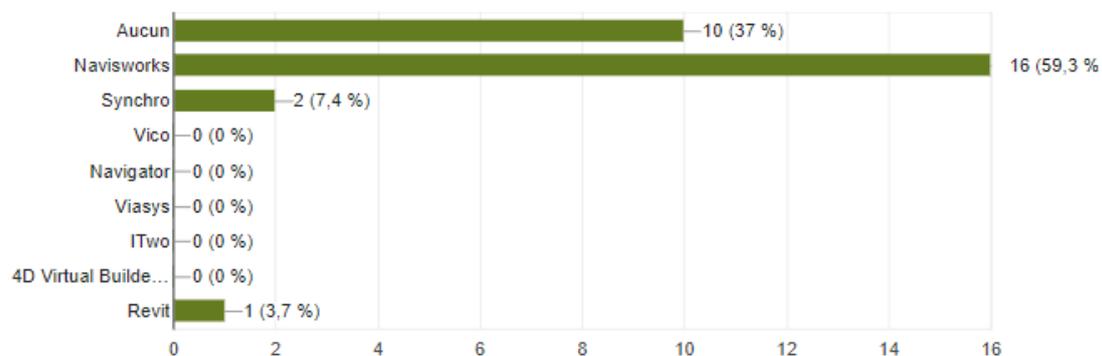


Figure 25 : Réponses collectées sur l'utilisation des logiciels 4D (plusieurs réponses possibles)

5.3.6 Phase d'application de la 4D

Au sujet de la phase d'application de la 4D, les réponses obtenues convergent vers une application lors des phases de Conception et de Construction, aussi bien pour les « utilisateurs 4D » () que pour les « non-utilisateurs 4D » (Figure 26).

J'utilise la 4D plutôt en phase de :

11 réponses

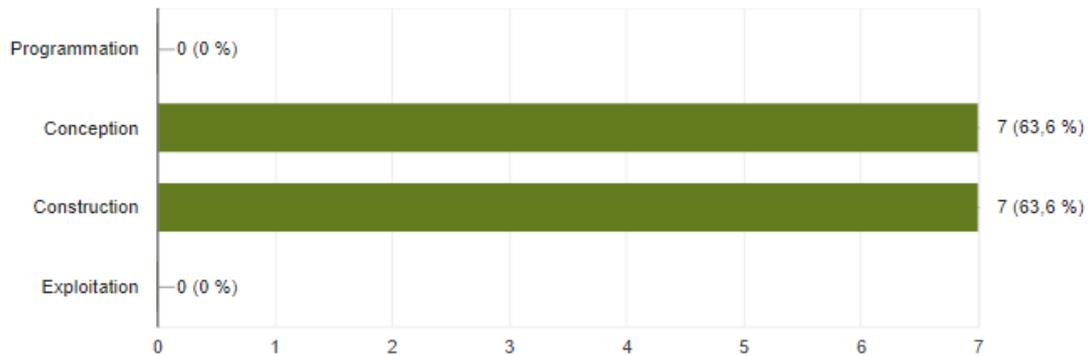


Figure 26 : Réponses collectées sur la phase d'application de la 4D pour les « utilisateurs 4D » (plusieurs réponses possibles).

Cependant, une légère différence apparaît entre les deux types de profils. En effet, les « non-utilisateurs 4D » ont également coché les phases de programmation et d'exploitation (respectivement 21 et 31% d'entre eux) alors qu'aucun « utilisateur 4D » n'a coché ces deux phases d'application (Figure 27).

J'utiliserais la 4D plutôt en phase de :

19 réponses

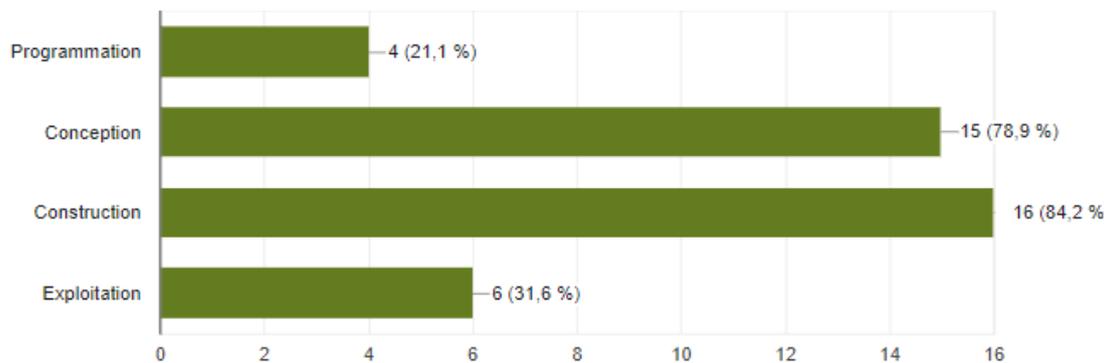


Figure 27 : Réponses collectées sur la phase d'application de la 4D pour les « non-utilisateurs 4D » (plusieurs réponses possibles).

De manière générale, les résultats collectés ont plutôt conforté et validé les usages regroupés et définis dans la section précédente. Que ce soit les utilisateurs ou les non-utilisateurs, tous ont répondu positivement sur l'utilité de chacun des usages. De plus, deux phases d'application ont été mis en lumière et des données sur les logiciels de 4D-CAD ont pu être collectées. La fréquence d'utilisation de chacun des usages reste en revanche relativement faible, comme pressenti en introduction. A contrario, la volonté d'utilisation de ces usages s'est révélée être assez forte. Ces résultats viennent conforter les hypothèses de départ mais demeurent tout de même assez relatifs, notamment au vu du nombre de réponses et de l'hétérogénéité des profils ayant répondu.

6 Session d'expérimentation

Dans le cadre du projet de recherche *4DCollab*, une première série d'expérimentations a été menée afin d'analyser l'apport des documents issus d'un modèle 4D dans le processus de prise de décision collaboratif assisté par un dispositif interactif numérique.

Cette section décrit l'expérimentation mise en place en définissant la méthodologie instaurée.

6.1 Objectifs de l'expérimentation

Nous l'avons vu dans la section précédente, les usages proposés ont été en partie validés par le questionnaire. La deuxième étape de validation s'intéresse à caractériser la collaboration autour de ces usages de la 4D. Aujourd'hui, la collaboration dans le processus BIM reste encore majoritairement asynchrone et à distance. L'expérimentation va permettre grâce à un dispositif numérique (qui sera décrit dans cette section) de tester certains usages dans un processus de travail collaboratif synchrone et colocalisé. Le travail de ce mémoire cherche à démontrer que ces usages peuvent être collaboratifs synchrones et colocalisés. Au regard de la durée du stage, l'expérimentation sera limitée à une seule session qui servira de pré-test pour les expérimentations du projet *4DCollab*.

6.1.1 O1 - Validation de la plausibilité du scénario

Le **premier objectif** coïncide avec celui de l'expérimentation pour *4DCollab* qui est de déterminer comment des documents issus et coordonnés à partir d'un modèle 4D/BIM influencent la prise de décision collaborative dans un *environnement digital collaboratif co-localisé synchrone*¹⁵. La question de recherche sous-jacente réside dans la détermination de la plus-value de l'utilisation de la 4D (en comparaison avec les documents utilisés actuellement) dans la prise de décision collaborative en phase de pré-construction.

Cette expérimentation sera menée dans les mois suivants ce travail par le projet *4DCollab* car elle nécessite de faire intervenir plusieurs groupes de travail sur plusieurs tâches afin de pouvoir analyser et comparer les résultats entre les deux types de documents.

Notre contribution consiste donc à vérifier que le protocole est valide et que le scénario de l'expérimentation est plausible.

6.1.2 O2 - Deuxième phase de validation de certains usages proposés

Grâce aux premières réponses au questionnaire, nous avons pu constater que les usages de la 4D proposés étaient plutôt bien accueillis par la profession, même si le nombre de réponses nous invite à rester prudents. Le **deuxième objectif** de cette session d'expérimentation est de tester

¹⁵ Dispositif fourni par le partenaire industriel du projet (Immersion) et dont les caractéristiques sont présentées en page 43.

ces usages en situation réelle avec des professionnels du BTP. Elle constitue donc une deuxième étape de validation plus qualitative car elle va permettre d'avoir des retours sur l'utilité et la manière avec laquelle les participants interfèrent avec ces usages. Au regard de la complexité de la préparation de cette session et du temps alloué à celle-ci, nous avons décidé de nous intéresser seulement à certains usages, qui seront présentés ultérieurement.

6.1.3 O3 - Validation de l'intérêt d'une réunion synchrone et colocalisée pour les usages retenus

Le **troisième objectif** consiste à démontrer l'intérêt d'une réunion de travail collaborative synchrone et colocalisée permettant une revue du modèle 4D/BIM en phase de pré-construction. En effet, le processus BIM, et notamment de l'usage 4D, est encore majoritairement utilisé pour une collaboration asynchrone et distante mais nous pensons qu'il nécessite certains points de synchronisation qui permettront de mieux définir les modifications du modèle et faire évoluer son LOD au fil du projet.

6.2 Hypothèses

Nous venons de voir que plusieurs objectifs ont été fixés pour cette session d'expérimentation. Il est important maintenant de présenter les hypothèses retenues en rapport avec ces objectifs.

H1 - Le scénario proposé au cours de l'expérimentation est plausible.

H2 - Les usages de la 4D testés sont utiles en phase de pré-construction.

H3 - Une réunion de travail synchrone et collocalisée est bénéfique pour discuter de ces usages.

6.3 Dispositif d'interaction permettant de faciliter la collaboration synchrone et colocalisée

Meetiiim est une table de réunion tactile multitouch et collaborative (Figure 28), qui vise à révolutionner les réunions professionnelles. Immersion (partenaire industriel du projet *4DCollab*) s'est penché, en développant cette table, sur les difficultés engendrées par des réunions passives (un voire deux orateurs face à un public « à l'écoute ») et le plus souvent improductives. Immersion s'adresse non seulement aux secteurs industriels (automobile, aéronautique...) mais aussi à d'autres (tels que le BTP, cabinets d'architecture ou de design, centres de formations...).

Cette table est équipée du logiciel Shariing qui permet de charger et de naviguer dans différents types de fichiers (Textes, tableaux, graphiques, pdfs, images, vidéos, fichiers 3D). Il permet également d'offrir à chaque collaborateur autour de la table un point de vue différent. Grâce à un système de vignette duplicable, les différents acteurs peuvent visionner et annoter (de manière éphémère ou définitive) les documents de la façon qui leur semble la plus cohérente. Un travail sur l'ensemble des fonctionnalités de Shariing et de Meetiiim peut être trouvé dans (Bolshakova 2016). Ce dispositif permet donc la collaboration synchrone et présenteielle et sera utilisé comme support des sessions d'expérimentation.

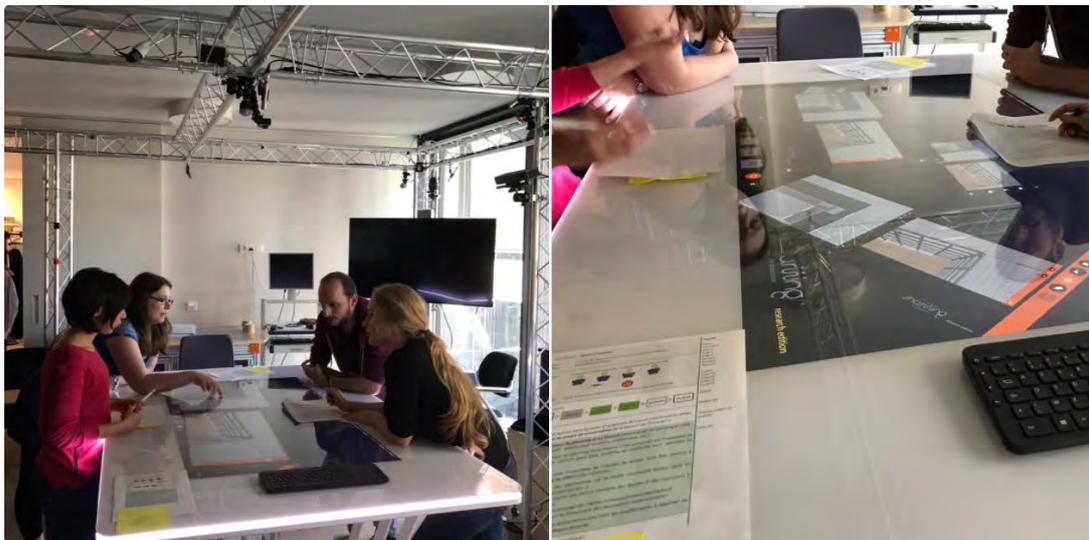


Figure 28 : Photos de la table Meetiiim du fabricant Immersion installé dans le laboratoire du LIST

6.4 Cas d'étude

Pour réaliser l'expérience, nous avons utilisé le cas d'étude de la Maison de l'Innovation, le bâtiment dans lequel sont installés une partie des bureaux du LIST. Le but est de reconstituer fictivement la construction de ce bâtiment grâce à la 4D. Pour ce faire, nous avons bénéficié de l'ensemble des plans et des coupes, mis à disposition par le Fonds Belval, gestionnaire du bâtiment, qui nous a permis de reconstituer le modèle 3D/BIM (Figure 29).



Figure 29 : Modèle 3D de la Maison de l'Innovation (réalisé par Etienne Goffard et Justine Guerrin)

Nous avons également eu accès au planning initial de la construction, ainsi qu'au PIC et à des photos du chantier. Cela nous a donc permis de réaliser fictivement l'environnement de chantier tel qu'il était au moment de la construction et surtout de lier les tâches du planning aux objets 3D de la manière qui nous semblait être la plus plausible et la plus proche de la réalité.

6.5 Modélisation 4D

Dans le cadre de l'expérimentation et du stage, il a fallu s'intéresser de plus près à la modélisation 4D. Pour ce faire, deux logiciels de 4D-CAD ont été testés de manière plus approfondie (*Navisworks* et *Synchro*).

6.5.1 Premiers pas avec un outil 4D-CAD

Les premiers tests ont été réalisés avec *Navisworks* et ont permis de se familiariser avec l'interface d'un logiciel de 4D-CAD avec plusieurs fenêtres sont à disposition :

- Fenêtre de vue 3D
- Fenêtre de planning GANTT
- Fenêtre de navigation dans les ressources

Pour un premier test, le but était de faire une simulation 4D globale de la construction du bâtiment en ne tenant pas compte du planning réel de la construction. Cela a pu être réalisé rapidement en créant un planning fictif à partir des ressources 3D. Les tâches s'enchaînent une à une sans se chevaucher et cela permet déjà de bien visualiser la construction. Grâce au fichier IFC importé, on peut facilement sélectionner des types d'objet par étage et les affecter à des tâches du planning. La Figure 30 donne une idée du résultat de ce premier test réalisé avec *Navisworks* et où les ressources affectées aux tâches en cours s'affichent en vert.

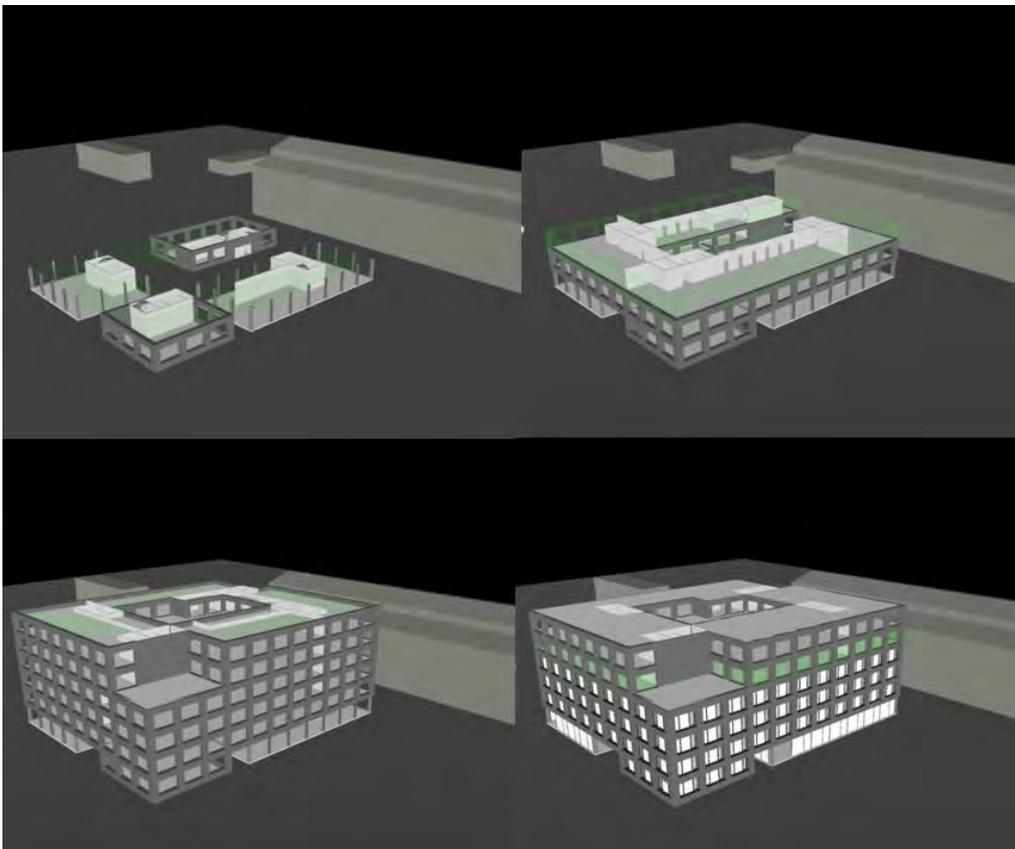


Figure 30 : Première version du modèle 4D de la Maison de l'Innovation (Navisworks)

6.5.2 Modèle 4D pour la session d'expérimentation

Le niveau de détail du premier modèle 4D (Figure 30) n'était pas suffisant pour être conservé dans la session d'expérimentation. En effet, le découpage des objets dans le modèle 3D ne permettait pas de simuler la construction d'un étage par zones. Pour ce faire, il a fallu re-modéliser le bâtiment en découpant les dalles et les murs en plusieurs objets (ajustement du modèle 3D).

De plus, la table tactile Meetiim ne permet de lire que des fichiers vidéo qui soient en adéquation avec la 4D. Dans un souci de facilitation, nous avons fait le choix de ne pas présenter aux participants un logiciel métier lors de l'expérimentation. A la place, ils auront accès à une vidéo d'un modèle 3D et d'un planning animé par la dimension du temps. Aussi, afin de correspondre à la tâche d'optimisation du planning de gros œuvre, le modèle 3D est le modèle Structure de la Maison de l'Innovation. Le planning quant à lui est tiré du planning réel global de la construction mais se concentre uniquement sur la phase de gros œuvre. Enfin, pour faciliter la tâche des participants, ce planning a été rallongé fictivement pour qu'il soit plus facilement optimisable.

Un séquençage de la construction de chaque étage par zone est également proposé dans le modèle 4D permettant une superposition de certaine tâche. Par exemple, on peut réaliser la dalle supérieure de l'étage n-1 de la Zone 3 et en parallèle les verticaux de la Zone 1 de l'étage n. Cet ajustement permet de mieux correspondre au chevauchement des tâches du planning original. Pour mieux visualiser ce séquençage, une vue de dessus a également été rajoutée comme on peut le voir sur la Figure 31.

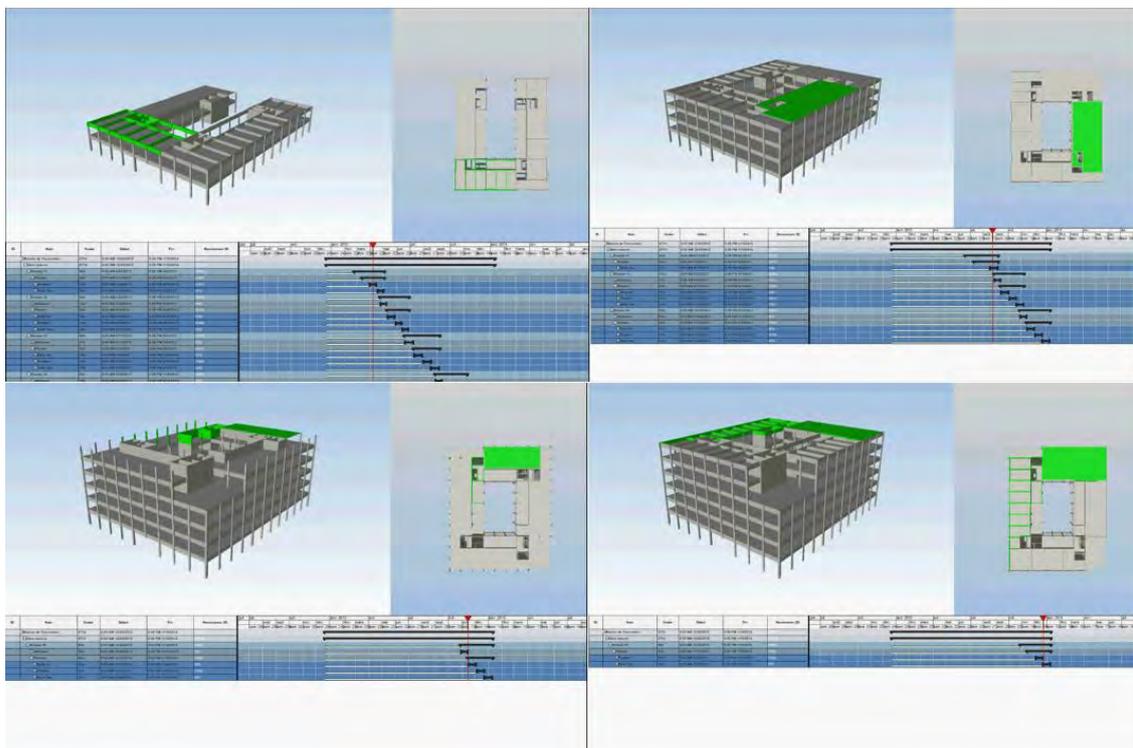


Figure 31 : Deuxième version du modèle 4D de la Maison de l'Innovation (Synchro)

Une autre version de l'animation 4D est encore en cours de réalisation et va permettre d'intégrer l'environnement de chantier (grues, bungalows, clôtures) au modèle afin de se rapprocher encore plus de la réalité.

6.6 Protocole et scénario de l'expérimentation

L'étude se déroule en quatre étapes qui sont détaillées dans cette section. Elle prendra place d'une part à Belval dans le laboratoire d'observation du LIST et d'autre part à Nancy dans le laboratoire du MAP-CRAI.

6.6.1 Accueil

La **première étape** démarre avec l'accueil des participants au sein des bureaux du LIST ou du MAP-CRAI. Une fois ces derniers installés dans le laboratoire, il leur est demandé de remplir un accord de consentement¹⁶ ainsi qu'une fiche de renseignement. Un tour de table servant de « ice breaking¹⁷ » permet aux participants de se présenter. Ensuite, ils assistent à une démonstration rapide de la table Meetiim et de son logiciel Shariing ainsi qu'à la projection de la vidéo expliquant brièvement les possibilités de ces outils. Cette démo de l'outil va devoir rapidement les aider à intégrer la logique de Shariing afin de comprendre les types de gestes, les types d'annotations et les types de capture d'écran possibles mais aussi les niveaux d'interaction avec les vignettes. Lors de cette démonstration, chaque fonctionnalité est montrée aux participants qui les testent dans la foulée afin de les assimiler plus rapidement.

6.6.2 Prise en main

Lors de la **seconde étape**, le groupe de participants est invité à réaliser un exercice de prise en main des outils d'une durée de quinze minutes. Cet exercice a pour but de réduire l'impact du biais d'appropriation du projet lors de la troisième phase. En effet, le projet et les documents utilisés dans cette étape sont identiques (partiellement) à ceux qui sont utilisés dans la réalisation de la tâche, dans le but de faciliter la compréhension du projet (structure, architecture, techniques spéciales etc.). Afin de permettre aux participants de s'immerger dans le projet mais aussi de faciliter la prise en main de l'outil Shariing, un petit exercice utilisant chaque fonctionnalité de Shariing utile pour l'expérimentation est donné à tous les participants. Cet exercice va permettre de s'assurer qu'ils possèdent les connaissances de base sur l'outil et sur le projet pour que ces biais soient réduits au minimum.

¹⁶ Les expérimentations étant filmées et enregistrées, il est obligatoire d'avoir le consentement des participants avant le début de l'expérimentation

¹⁷ Littéralement « briser la glace », permet de détendre un peu l'atmosphère en présentant les différents participants à l'étude.

6.6.3 Réalisation de la tâche

Lors de la **troisième étape**, le groupe est invité à prendre connaissance de la tâche qu'ils doivent réaliser (les décisions qu'ils doivent prendre collaborativement), du contexte du projet architectural (présentation du type de projet, rapide explication des documents à leur disposition, ...) et du rôle qui leur est attribué (Architecte, Bureau d'études, Entreprise générale ou Maître d'ouvrage).

La consigne est, tout d'abord, donnée oralement et ensuite sous la forme d'une feuille A4 dont ils pourront disposer librement tout au long de l'expérience (Annexe 5). Ce document de support contiendra également un mémo sur les principales fonctionnalités de l'interface Shariing, ainsi qu'une liste des documents à disposition pour chaque tâche (Annexe 5).

Nous avons choisi une tâche lors de cette expérimentation qui est représentative des problèmes résolus par les groupes de travail en phase de pré-construction.

« Enoncé de la tâche : Optimisation du planning de Gros Œuvre. »

⇒ **Cette tâche permet de s'intéresser aux usages 4D de planification et de méthode de construction définis dans les sections précédentes.**

La consigne pour cette tâche est la suivante :

« Nous sommes en mars 2012, en phase de pré-construction du projet. Une première version du planning Gros Œuvre a été présentée par l'entreprise de construction. Cette version peut être discutée et modifiée dans cette réunion d'équipe projet, pour l'améliorer, corriger des erreurs ou éviter d'éventuels risques liés aux choix de planification.

Lors d'une réunion avec l'équipe du projet (architecte, ingénieur, entreprise, client), vous êtes donc amenés à optimiser ce planning de différentes manières :

- *En proposant des alternatives sur le mode constructif (béton coulé en place, béton préfabriqué etc.),*
- *En modifiant la durée des tâches (analyse des durées et des ressources à mettre en œuvre),*
- *En modifiant le séquençage des tâches (chevauchement des tâches). »*

À la suite de chaque consigne, chaque groupe dispose d'un set de documents prédéfinis présenté comme suit, qui diffère selon la modalité (comme le montre le Tableau 5).

Tableau 5 : Documents à disposition des participants pour réaliser la tâche du scénario

2D	4D
<ul style="list-style-type: none"> - Plans étages (1 et 2, 3, 4 et 5) - Coupes - Planning GO - Tableaux quantités - Google Map du site 	<ul style="list-style-type: none"> - Vidéos 4D (Pers + Vue de dessus) - Modèle 3D du site - Exports 3D / Phases - Tableaux quantités - Google Map du site

N.B : Des limites dans l'utilisation de Shariing (types de fichiers compatibles) nous ont obligé à adapter les logiciels métiers (4D-CAD) afin de pouvoir produire des documents dits « 4D » composés de vidéo 4D et d'export 3D de chaque phase de construction.

A la fin de la tâche, les participants doivent décrire et expliquer la ou les solutions choisies à une tierce personne (ce n'est pas le gestionnaire de l'expé, qui connaît la table et le projet) qui joue alors le rôle du membre du projet absent lors de la réunion et à qui il faut faire un compte-rendu. Cette demande va ainsi obliger les participants à formaliser leurs prises de décision afin de les restituer et de les présenter comme un compte rendu de réunion.

6.6.4 Entretien de débriefing avec les participants

La dernière et **quatrième étape** se conclut par le retour des participants sur leur expérience avec Shariing. Ce feedback est réalisé grâce à un questionnaire et à un entretien collectif. Le questionnaire est composé des questions adaptés du questionnaire SUS (Brooke 1996) et présenté en annexe (Annexe 6). Lors de cet entretien collectif, les participants explicitent les solutions choisies et nous livrent leur ressenti général sur l'expérience.

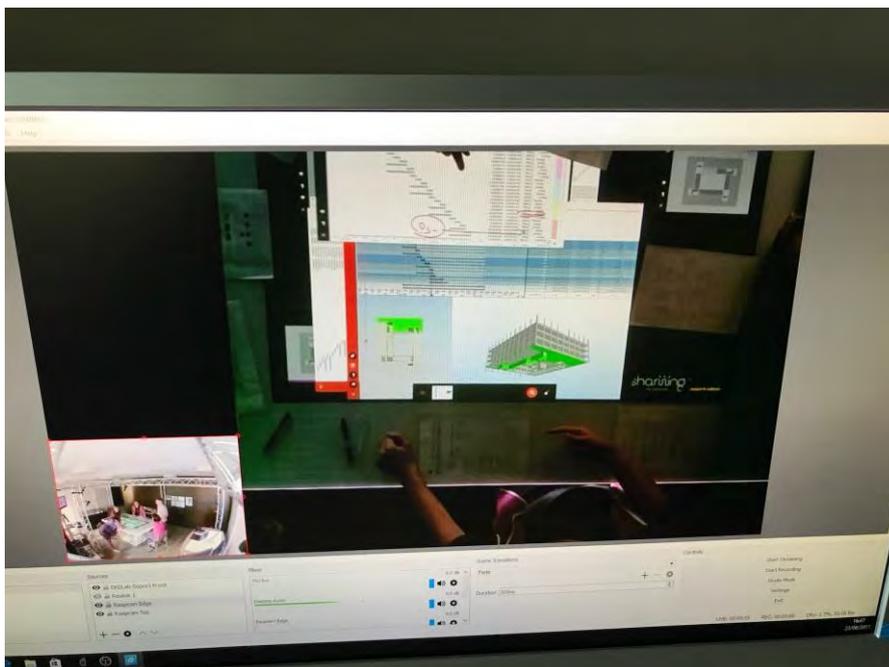


Figure 32 : Vue de dessus de la table lors d'une session (capture via la régie)

6.7 Résultats

L'ensemble des résultats collectés lors de ces deux sessions peut être trouvé en Annexe 7. De plus amples analyses des vidéos enregistrés sont encore en cours de réalisation. Cette section vise à discuter des premières impressions concernant les objectifs de départ.

6.7.1 Plausibilité du scénario

De manière générale, l'ensemble des participants a trouvé le scénario de l'expérimentation plutôt plausible. « *Ce genre de réunion de travail peut bien avoir lieu durant cette phase d'un projet* ». Néanmoins, ils ont suggéré quelques ajustements concernant le scénario, la tâche et les documents mis à leur disposition.

Quelques remarques sur les acteurs impliqués dans le scénario ont été faites. Le premier groupe considère que l'architecte n'intervient pas forcément dans des réunions de planification. Il conviendrait donc de remplacer cet acteur par un Ingénieur (Méthode ou Technique Spéciale) qui serait plus à même de discuter du mode constructif et des durées relatives aux tâches du planning de gros œuvre. Selon certains, il faudrait préciser l'acteur impliqué dans la réalisation de chaque document présenté afin que ce soit plus cohérent.

La plupart des participants ont trouvé la tâche complexe, notamment à cause du nombre important de documents à traiter. Aussi, le fait de devoir travailler sur un projet qui leur est inconnu ne les a pas aidés. Le deuxième groupe a d'ailleurs trouvé le scénario un peu trop long.

6.7.2 Utilisation de la 4D pour la planification et la méthode de construction

Le premier groupe est le seul à avoir utilisé le set de documents dits « 4D ». En se penchant sur les résultats du questionnaire post-expérimental (Annexe 7), on se rend compte que les participants ont à l'unanimité répondu positivement sur les bénéfices qu'apportés les documents 4D. Ils jugent que la 4D améliore la compréhension des problèmes de planification et la prise de décision collaborative. Pendant l'entretien de débriefing, les remarques ont également affluées dans ce sens en confirmant les résultats du questionnaire.

Le deuxième groupe n'ayant manipulé que des documents « 2D » nous n'avons pas pu réellement capter leur intention d'utilisation de la 4D. Néanmoins, certains ont manifesté leur envie de pouvoir visualiser le planning de manière 4D.

6.7.3 Réunion de travail synchrone et colocalisée

Concernant la collaboration synchrone et colocalisée, les participants ont émis de nombreuses remarques sur le dispositif numérique interactif. La grande majorité des participants l'ont trouvé utile et bénéfique dans le cadre de réunion de travail car il permet de visualiser et d'annoter un grand nombre de documents. De plus, ils ont répondu dans le questionnaire, là aussi unanimement, que ce dispositif pourrait améliorer les réunions de planification.

Il y a eu aussi des suggestions techniques pour améliorer l'outil et donc la collaboration autour de cette table tactile. Nous ne développerons pas ces recommandations techniques dans ce mémoire mais elles peuvent être trouvées (en partie) en Annexe 7.

6.8 Discussion

Bien que ces résultats soient encore à prendre avec précaution, compte tenu du nombre de participants aux expérimentations, ils dégagent tout de même une tendance. Déjà, le besoin de documents issus d'un modèle 4D/BIM dans les réunions de planification s'est fait assez nettement ressentir. De plus, la collaboration synchrone et colocalisée dans la phase de pré-construction d'un projet semble importante et l'apport de la 4D dans ce contexte est notoire.

Aussi, il pourrait être intéressant de commencer à réfléchir à une modélisation du processus en se basant sur ce qui a déjà été fait. La Figure 33 propose un premier exemple de raffinement du BPMN de l'usage de « Phase 4D Planning » élaboré par Penn State dans son guide BIM(CIC 2010). Le but de cette proposition est de préciser la revue du modèle 4D et du planning en rendant cette tâche collaborative synchrone et colocalisée (en rouge). Les autres tâches pourraient rester dans des dispositions asynchrones et distantes mais la nécessité d'un point de synchronisation semble évidente.

Les futures expérimentations du projet *4DCollab* seront très certainement intéressantes à analyser pour avoir des données plus importantes sur ce sujet. L'analyse vidéo des résultats permettra également des discussions sur des développements à apporter sur le processus de collaboration et sur le dispositif numérique interactif.

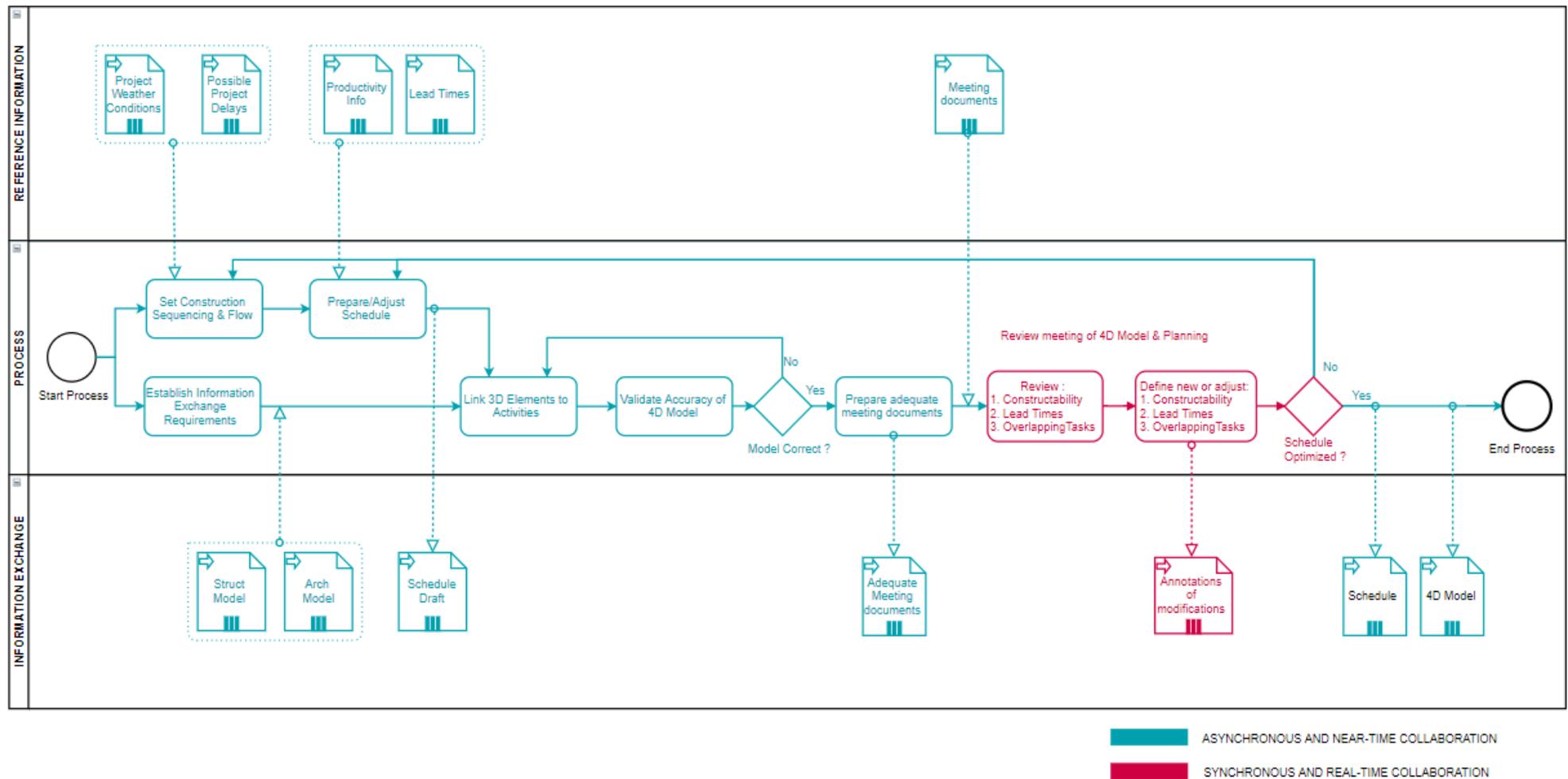


Figure 33 : BPMN de l'utilisation de la modélisation 4D en phase de pré-construction, proposition d'adaptation du BPMN de PennState University

7 Conclusion

Nous avons pu voir dans ce mémoire que la modélisation 4D faisait partie d'un processus collaboratif global avec le BIM, un des axes majeurs d'innovation dans le secteur de la construction. Bien que son usage soit bien documenté, il reste encore assez peu utilisé et reste concentrée sur la planification et le phasage, ou se cantonne à des projets de grandes envergures.

Partant de cet état, nous avons proposé une liste d'usages qui découlent de la littérature scientifique mais aussi des recommandations des différents guides du BIM. Ces BIM guidelines nous auront servi de référence pour détourner les usages de la 4D proposés.

Nous avons ensuite essayé d'identifier les acteurs clés pouvant être impliqué dans chacun de ces usages avant d'essayé de les intégrer au processus LEAN Construction. L'idée était de coupler deux outils qui peuvent se compléter et qui ne sont pas indépendants les uns des autres.

Une première étape de validation constituée d'un questionnaire envoyé aux professionnels du secteur du BTP a permis de donner un peu plus d'ampleur aux usages initialement proposés. Bien qu'ayant besoin d'être relativisés, ces premiers résultats montrent une attente de la part de la profession. En effet, L'intention d'utilisation s'est révélée assez forte pour les personnes n'ayant jamais pratiqué et l'utilité perçue par les utilisateurs et non-utilisateurs importante pour la quasi-totalité des usages.

Ensuite, la préparation d'une session d'expérimentation a permis de questionner la collaboration autour de documents issus de modèles 4D/BIM. Nous avons alors pu tester, d'une part, certains usages retenus face à des situations réelles de projets de construction et, d'autre part, l'apport d'une réunion collaboration synchrone et colocalisée dans le cadre d'une revue de planning. Cette collaboration a été supporté par un dispositif interactif numérique encore en cours de développement mais qui a déjà montré l'étendue de ses possibilités. Les premières données tirées de ces expérimentations sont venues appuyer la première partie du mémoire et ont confirmé un besoin métier.

Ces deux études menées dans ce mémoire nécessitent d'être approfondies et élargies. D'une part, le questionnaire a besoin d'être diffusé plus largement pour capter une plus grande population. D'autre part, l'expérimentation mériterait d'être rééditée avec de nombreux autre groupes et d'autres usages.

Les thématiques de réflexion concernant la 4D peuvent elles aussi être poussées un cran plus loin. Une identification des acteurs plus fine et la mise en lumière du rôle du modélisateur 4D au sein d'un processus est un défi pour le développement de cette technologie. Les autres phases du projet de construction pourraient elles aussi être analysées afin de s'interroger sur une utilisation de la 4D, notamment dans les opérations de maintenance du bâtiment. La frontière avec le Facility Management reste encore très fine et de nombreuses applications pourraient être imaginées.

8 Bibliographie

- Ali Jaafari. 1984. "Criticism of CPM for Project Planning Analysis." *Journal of Construction Engineering and Management* 110 (2): 222–33. doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(1984)110:2(222).
- Arditi, David, Pirasak Sikangwan, and Onur B. Tokdemir. 2002. "Scheduling System for High Rise Building Construction." *Construction Management and Economics* 20 (4): 353–64. doi:10.1080/01446190210131647.
- Basu, Abhimanyu, and P E Psp. 2007. "4D Scheduling – A Case Study." *AACE International Transactions*, 1–6.
- Benjaoran, Vacharapoom, and Sdhabhon Bhokha. 2009. "Enhancing Visualization of 4D CAD Model Compared to Conventional Methods." *Engineering, Construction and Architectural Management* 16 (4): 392–408. doi:10.1108/09699980910970860.
- . 2010. "An Integrated Safety Management with Construction Management Using 4D CAD Model." *Safety Science* 48 (3). Elsevier Ltd: 395–403. doi:10.1016/j.ssci.2009.09.009.
- Bertelsen, S, and J Nielsen. 1997. "Just-In-Time Logistics in the Supply of Building Material." *1st International Conference on Construction Industry Development: Building the Future Together*, no. December: 9–11.
- Bettina, Par, L E Galiard, Le Lean, Lean Production, Le Lean, The Machine, and Daniel T Jones. 1997. "Le LEAN Appliqué À La Construction: Comment Les Pratiques Collaboratives Peuvent-Elles Agir Sur Les Coûts et Délais ?," 1–4.
- Bhatla, Ankit, and Fernanda Leite. 2012. "Integration Framework of BIM With the Last Planner System." *20th International Group for Lean Construction*, 10. doi:10.1016/j.autcon.2010.09.013.
- Bolshakova, Étudiante Veronika. 2016. "SYNCHRONOUS COLLABORATION AND 3D INTERACTIONS AEC INDUSTRY IMPLEMENTATION."
- Boton, Conrad, Gilles Halin, and Sylvain Kubicki. 2012. "A Metamodel to Describe nD CAD Visualization as Coordinated Multiple Views." *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* 7467 LNCS: 219–26. doi:10.1007/978-3-642-32609-7_31.
- Boton, Conrad, Sylvain Kubicki, and Gilles Halin. 2013. "Designing Adapted Visualization for Collaborative 4D Applications." *Automation in Construction* 36. Elsevier B.V.: 152–67. doi:10.1016/j.autcon.2013.09.003.
- . 2015a. "The Challenge of Level of Development in 4D/BIM Simulation Across AEC Project Lifecycle. A Case Study." *Procedia Engineering* 123: 59–67. doi:10.1016/j.proeng.2015.10.058.
- . 2015b. "The Challenge of Level of Development in 4D/BIM Simulation Across AEC Project Lifecycle. A Case Study." *Procedia Engineering* 123: 59–67. doi:10.1016/j.proeng.2015.10.058.
- Brooke, John. 1996. "SUS - A Quick and Dirty Usability Scale." *Usability Evaluation in Industry* 189 (194): 4–7. doi:10.1002/hbm.20701.
- Celnik, Olivier, and Eric Lebègue. 2014. *BIM et Maquette Numérique Pour L'architecture, Le Bâtiment et La Construction*.
- CIC. 2010. "BIM Execution Planning Guide." https://vdcscorcard.stanford.edu/sites/default/files/BIM_Project_Execution_Planning_Guide-v2.0.pdf.
- Cole, L. J. R. 1991. "Construction Scheduling: Principles, Practices, and Six Case Studies." *Journal of Construction Engineering and Management* 117 (4): 579–88. doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(1991)117:4(579).
- Collier, E, and M. Fischer. 1995. "Four-Dimensional Modeling in Design and Construction." Stanford.
- CRC Construction Innovation. 2009. *National Guidelines for Digital Modelling*. Icon. Net Pty Ltd., Brisbane.
- David, Bertrand. 2001. "IHM Pour Les Collecticiels." *RSR CP*.
- Dawood, Nashwan, and Sushant Sikka. 2006. "The Value of Visual 4D Planning in the UK." *Intelligent Computing in Engineering and Architecture*, 127–35. doi:10.1007/11888598_14.

- Denis, François. 2015. "Building Information Modelling – Belgian Guide for the Construction Industry," 56. <http://adeb-vba.be/the-guide-to-bim.pdf>.
- Diekmann, James E, Mark Krewedi, Balonick Joshua, Travis Stewart, and Spencer Won. 2005. "Application of Lean Manufacturing Principles to Construction." *University of Colorado*, no. 191: 334. http://www.leanconstruction.org/media/docs/lcj/V2_N2/LCJ_05_011.pdf.
- Fischer, Martin, and Florian Aalami. 1994. "Model Based Constructability Analysis: The MOCA System." *Technology in Construction: CIB*, no. 9: 1689–99. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- Guerriero, Annie. 2009. "La Représentation de La Confiance Dans L'activité Collective - Application À La Coordination de L'activité de Chantier de Construction," 286. <http://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00558823/>.
- Guerriero, Annie, Sylvain Kubicki, Fabrice Berroir, and Clément Lemaire. 2017. "BIM-Enhanced Collaborative Smart Technologies for LEAN Construction Processes," no. June: 1063–70.
- Guerriero, Annie, Sylvain Kubicki, and Sandrine Reiter. 2016. "Building Information Modeling in Use : How to Evaluate the Return on Investment ?"
- Halpin, Daniel W, and Luis-Henrique Martinez. 1999. "Real World Applications of Construction Process Simulation." *Proceedings of the 31st Conference on Winter Simulation: Simulation---a Bridge to the Future - Volume 2*, 956–62. doi:10.1145/324898.324947.
- Hashem, Ibrahim Abaker Targio, Victor Chang, Nor Badrul Anuar, Kayode Adewole, Ibrar Yaqoob, Abdullah Gani, Ejaz Ahmed, and Haruna Chiroma. 2016. "The Role of Big Data in Smart City." *International Journal of Information Management* 36 (5): 748–58. doi:10.1016/j.ijinfomgt.2016.05.002.
- Heesom, David, and Lamine Mahdjoubi. 2004. "Trends of 4D CAD Applications for Construction Planning." *Construction Management and Economics* 22 (2): 171–82. doi:10.1080/0144619042000201376.
- Herroelen, Willy, and Roel Leus. 2001. "On the Merits and Pitfalls of Critical Chain Scheduling." *Journal of Operations Management* 19 (5): 559–77. doi:10.1016/S0272-6963(01)00054-7.
- Howard, Robert, Luis Restrepo, and Chen-Yu Chang. 2017. "Addressing Individual Perceptions: An Application of the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology to Building Information Modelling." *International Journal of Project Management* 35 (2). Elsevier Ltd and Association for Project Management and the International Project Management Association: 107–20. doi:10.1016/j.ijproman.2016.10.012.
- Hu, Zhenzhong, and Jianping Zhang. 2011. "BIM- and 4D-Based Integrated Solution of Analysis and Management for Conflicts and Structural Safety Problems during Construction: 2. Development and Site Trials." *Automation in Construction* 20 (2): 155–66. doi:10.1016/j.autcon.2010.09.013.
- Hyun, By, Jeong Choo, Iris D Tommelein, Associate Member, Glenn Ballard, and Todd R Zabelle. 1999. "For W Ork P Ackage S Cheduling." *Engineering*, no. June: 151–61.
- Ikerd, Will, David Merrifield, James Vandezande, Walt Cichonski, Ron Dellaria, Brian Filkins, Murat Karakas, David Francis, Aaron Lawson, and Dan Russell. 2013. "Level of Development Specification." *Bim Forum*, 0–124. <http://bimforum.org/wp-content/uploads/2013/08/2013-LOD-Specification.pdf>.
- Kähkönen, Kalle. 2003. "Editorial : Virtual Reality Technology in" 8: 2002–4.
- Kim, Changwan, Changmin Kim, and Hyojoo Son. 2013. "Automated Construction Progress Measurement Using a 4D Building Information Model and 3D Data." *Automation in Construction* 31. Elsevier B.V.: 75–82. doi:10.1016/j.autcon.2012.11.041.
- Kreider, Ralph, John Messner, and Craig Dubler. 2010. "Determining the Frequency and Impact of Applying BIM for Different Purposes on Building Projects." *Proceedings of the 6th International Conference on Innovation in Architecture, Engineering and Construction (AEC)*, 1–10. http://bim.psu.edu/uses/Freq-Benefit/BIM_Use-2010_Innovation_in_AEC-Kreider_Messner_Dubler.pdf.
- Lean Construction Institute. 2015. "Last Planner ® System."
- Ma, Zhaoyang, Qiping Shen, and Jianping Zhang. 2005. "Application of 4D for Dynamic Site Layout and Management of Construction Projects." *Automation in Construction* 14 (3): 369–81. doi:10.1016/j.autcon.2004.08.011.

- Mahalingam, Ashwin, Rahul Kashyap, and Charudatta Mahajan. 2010. "An Evaluation of the Applicability of 4D CAD on Construction Projects." *Automation in Construction* 19 (2). Elsevier B.V.: 148–59. doi:10.1016/j.autcon.2009.11.015.
- Mani, Golparvar Fard, Pe??a Mora Feniosky, and Silvio Savarese. 2009. "D4AR-A 4-Dimensional Augmented Reality Model for Automating Construction Progress Monitoring Data Collection, Processing and Communication." *Electronic Journal of Information Technology in Construction* 14 (June): 129–53.
- McKinney, K., and Martin Fischer. 1998. "Generating, Evaluating and Visualizing Construction Schedules with CAD Tools." *Automation in Construction* 7: 433–447. doi:10.1016/S0926-5805(98)00053-3.
- McKinney, Kathleen, Jennifer Kim, Martin Fischer, and Craig Howard. 1996. "Interactive 4D-CAD." *Proceedings of the Third Congress on Computing in Civil Engineering* 135 (October): 1261. doi:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000101.
- NATSPEC. 2011. "NATSPEC National BIM Guide," no. September: 27.
- Philipp Gerbert, Santiago Castagnino Christoph Rothballer and Andreas Renz. 2016. "Shaping the Future of Construction A Breakthrough in Mindset and Technology." *World Economic Forum (WEF)*, no. May: 1–64. https://www.bcgperspectives.com/Images/Shaping_the_Future_of_Construction_may_2016.pdf.
- Pultar, By Mustafa. 1991. "Progress-Based Construction Scheduling" 116 (4): 670–88. doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(1990)116:4(670).
- République Française. 2017. "Plan Transition Numérique Dans Le Bâtiment - Rapport D'etape." *BIM-France*. <http://www.batiment-numerique.fr/>.
- Sacks, Rafael, Milan Radosavljevic, and Ronen Barak. 2010a. "Requirements for Building Information Modeling Based Lean Production Management Systems for Construction." *Automation in Construction* 19 (5). Elsevier B.V.: 641–55. doi:10.1016/j.autcon.2010.02.010.
- . 2010b. "Requirements for Building Information Modeling Based Lean Production Management Systems for Construction." *Automation in Construction* 19 (5). Elsevier B.V.: 641–55. doi:10.1016/j.autcon.2010.02.010.
- Sawhney, A.a b c, S.M.a Abourizk, and D.W.a Halpin. 1998. "Construction Project Simulation Using CYCLONE." *Canadian Journal of Civil Engineering* 25 (1): 16–25. doi:10.1139/I97-047.
- Sobotka, Anna, and Katarzyna Pacewicz. 2016. "Building Site Organization with 3D Technology in Use." *Procedia Engineering* 161: 407–13. doi:10.1016/j.proeng.2016.08.582.
- Succar, Bilal. 2009. "Building Information Modelling Framework: A Research and Delivery Foundation for Industry Stakeholders." *Automation in Construction* 18 (3). Elsevier B.V.: 357–75. doi:10.1016/j.autcon.2008.10.003.
- Sulankivi, K, and K Kähkönen. 2010. "4D-BIM for Construction Safety Planning." *Proceedings of W099- ...*, no. May: 117. http://cibworld.xs4all.nl/dl/publications/w099_pub357.pdf#page=122.
- Tay, Yi Wei Daniel, Biranchi Panda, Suvash Chandra Paul, Nisar Ahamed Noor Mohamed, Ming Jen Tan, and Kah Fai Leong. 2017. "3D Printing Trends in Building and Construction Industry: A Review." *Virtual and Physical Prototyping* 0 (0). Taylor & Francis: 1–16. doi:10.1080/17452759.2017.1326724.
- The Computer Integrated Construction Research Group The Pennsylvania State University. 2011. "Project Execution Planning Guide."
- U.S. Department of Veterans Affairs. 2010. "VA BIM Guide," 45.
- U.S. General Services Administration's Public Buildings Service: Office of the Chief Architect. 2009a. "GSA Building Information Modeling Guide Series 04 - BIM Guide for 4D Phasing." *National 3D-4D-BIM Program*, i-26.
- . 2009b. "GSA Building Information Modeling Guide Series 04 - BIM Guide for 4D Phasing." *National 3D-4D-BIM Program*, i-26.
- Venkatesh, Viswanath, Michael G Morris, Gordon B Davis, and Fred D Davis. 2003. "User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View" 27 (3): 425–78.
- Winch, Graham. 1998. "Zephyrs of Creative Destruction: Understanding the Management of Innovation in Construction." *Building Research & Information* 26 (June 2013): 268–79.

doi:10.1080/096132198369751.

Womack, James P., Daniel T. Jones, and Daniel Roos. 1990. "The Machine That Changed The World," 1997.

Annexes

Annexe 1 : Tableau de la fréquence d'utilisation des BIM tiré de (Kreider, Messner, and Dubler 2010)

BIM Uses	0%	5%	25%	50%	75%	95%	100%	Response Count	Average Frequency	Median Response
3D Coordination	14	16	17	24	30	22	35	158	60.4%	75%
Design Reviews	22	17	25	23	22	19	33	161	53.5%	50%
Design Authoring	48	14	16	18	21	6	29	152	42.2%	25%
Construction System Design	47	25	17	18	12	5	28	152	37.0%	25%
Existing Conditions Modeling	32	34	26	23	17	6	16	154	35.2%	25%
3D Control and Planning	54	21	14	17	20	9	15	150	34.4%	15%
Programming	56	20	27	15	12	6	17	153	30.7%	25%
Phase Planning (4D Modeling)	55	25	18	15	20	3	13	149	29.6%	5%
Record Modeling	58	27	15	15	20	5	10	150	28.2%	5%
Site Utilization Planning	52	30	21	13	19	5	10	150	28.2%	5%
Site Analysis	51	24	28	18	15	3	10	149	27.7%	5%
Structural Analysis	74	19	10	13	11	6	16	149	26.8%	5%
Energy Analysis	58	32	19	17	17	6	6	155	25.4%	5%
Cost Estimation	53	33	28	15	11	6	8	154	24.7%	5%
Sustainability LEED Evaluation	64	29	21	11	16	5	6	152	23.0%	5%
Building System Analysis	64	33	17	14	14	6	5	153	22.3%	5%
Space Management / Tracking	77	25	15	13	9	5	10	154	21.4%	0%
Mechanical Analysis	88	15	10	7	14	7	7	148	20.9%	0%
Code Validation	77	26	16	8	8	8	5	148	18.9%	0%
Lighting Analysis	74	32	16	12	8	4	4	150	16.9%	5%
Other Eng. Analysis	90	21	10	9	10	3	3	146	14.7%	0%
Digital Fabrication	87	26	13	8	8	3	4	149	14.4%	0%
Asset Management	104	17	13	8	3	1	3	149	9.6%	0%
Building Maintenance Scheduling	118	26	8	2	4	0	0	158	4.6%	0%
Disaster Planning	124	17	0	3	4	0	0	148	3.6%	0%

Annexe 2 : Tableau recensant les BIM guidelines et leur traitement de l'usage « Phase 4D Modeling »

Country	Organization	Title	Last update	Version	BIM 4D Uses
US	Penn State University	Project execution planning guide	May 2011	v2.1	"Phase 4D (4D Modeling)" Site Utilization Planning 3D Control and Planning (Digital Layout) Building (Preventative) Maintenance Scheduling
US	National Institute of Building Science (BuildingSMART)	National BIM Standart US (NBIMS-US)	2015	v3.0	idemPennstate
US	Indiana University	BIM Guidelines & Standards for Architects,Engineers, and Contractors	July 2015		p22 use of Naviswork for Collision report (construction phase)
US	University of South California	Building Information Modeling (BIM) Guidelines	April 2012	v1.6	x
US	General Service Administration (GSA)	BIM Guide Overview	September 2009	v1.0	BIM Guide 04: 4D Phasing BIM Guide 08 : Facility Management ??
US	Department of Veterans affairs	The VA BIM Guide	April 2010	v1.0	Masterplan Space Scheduling and Sequencing – 4D Communication of Construction Scheduling and Sequencing - 4D
US	New York City Department of Design + Construction	BIM Guidelines	July 2012		Phase Modelling => Same as PENN STATE
Norway	Norwegian Home Builders' Association	BIM USER MANUAL	November 2012	v2.0	Both mention 4D and schedulling
Norway	Statsbygg	Statsbygg Building Information Modelling Manual	December 2013	v1.2.1	
Australia	NATSPEC	National BIM Guide	2011	v1.0	Same as VA BIM Guide
Australia	CRC Construction Innovation	National Guidelines for Digital Modelling	2009		4D scenario planning Clash detection, 4D construction sequencing/ scheduling, prefabrication coordination 4D and 5D modelling for optioneering/ optimisation Increasing off-site fabrication
UK	AEC UK	BIM Technology Protocol	June 2015	v2.1	x
Singapore	Corenet	Singapore BIM Guide	August 2013	v2.0	x
China	Hong Kong Institute of Building Information Modelling	BIM Project Specification	June 2011	v3.0	4D Virtual Construction simulations
Canada	AEC Canada	AEC (CAN) BIM Protocol	October 2012	v1.0	x
Belgium	ADEB-VBA	"Building Information Modelling – Belgian Guide for the construction Industry"	2015		x
Finland	COBIM	Common BIM Requirements	March 2012	v1.0	Series 13: Use of models in construction

Annexe 3 : Grandes thématiques abordées par les BIM guidelines au sujet de la 4D

BIM Uses	Objectives	Plan	Design	Construct	Operate
Phase 4D (4D Modeling)	Visualization - Communication				
	Communicate phased occupancy requirements to the owner and tenants in case of renovations, retrofits or additions to the existing buildings				
	Promote early communication among owners and end users and capture valuable inputs from the clients and inject them into the design				
	Communicate short-term goals with the team and assess day-to-day progress				
	Use 4D visualization to communicate the project plans				
	Visualize phasing plans				
	Reduce number of RFIs and Cos				
	Increase stakeholder communication through visualization and better understanding				
	Collaboration - Coordination - Clash detection				
	Collaboration tool between designers and contractors				
	Help involve more stakeholders early in the project to give their input into the design and construction of the facility				
	Improve sub-contractor coordination				
	Detail analysis of constructions sequencing				
	4D model used as a basis for analyzing time - space conflicts, safety issues and site workspace management				
	Compare construction alternatives simulating options with multiple 4D models and detect constructability issues (time – space conflicts)				
	Develop initial schedule and workflow of trades and communicate it to the project team				
	Identify and resolve phased occupancy and workspace conflicts that can cause construction and productivity inefficiencies				
	Planning - Scheduling				
	Show the Critical Path Method (CPM) schedule for the project				
	Interpret and visualize the project schedule and sequence of work				
	Improve design quality by testing the design against construction sequencing and thereby eliminating or reducing difficult sequence issues				
	Explore the impact of design and construction alternatives on a project				
	Improve lead time identification which can reduce total construction duration				
	Detail analysis of constructions sequencing.				
	Constructability - Site use				
	Site use planning and coordination with ongoing operations				
	Identify constructability and safety issue				
	Monitor actual progress vs. planned progress and to thereby identify and resolve issues more quickly, thereby reducing claims				
	Improve off-site delivery and site utilization				
	Design temporary works (scaffolding, hoists, shoring, etc.) and understand construction phases and sequencing using time-based clash detection				
Preliminary analysis of traffic flows, tenant phasing, construction activities					

*La modélisation 4D dans une approche BIM:
Usages et Collaboration*

Annexe 4 : Descriptif des logiciels de 4D-CAD actuellement sur le marché

Le Tableau 6 présente les principales fonctionnalités des logiciels de 4D-CAD.

Tableau 6 : Principales fonctionnalités des logiciels de 4D-CAD

Fonctionnalités	
Import Modèle 3D	Standard (.ifc) Autodesk (.rvt (Revit), .dwg (AutoCAD), .3ds (Autodesk 3ds Max), .fbx), SketchUp (.skp), Rhino (.3dm), Solidworks (.prt),
Import Planning	MS Project (.mpp, .mpx .xml) Primavera Project .CSV
Export Vidéo 4D	.avi

Navisworks

Navisworks est un logiciel développé par *Autodesk* et qui est actuellement leader sur le marché de la simulation en construction. L'interface est la même que pour les produits Autodesk et l'interopérabilité entre les fichiers natifs du développeur est bonne. Concernant les modèle 3D, il est possible d'importer les formats de fichiers suivants :

- Standard (.ifc)
- *Autodesk* (.rvt (*Revit*), .dwg (*AutoCAD*), .3ds (*Autodesk 3ds Max*), .fbx),
- *SketchUp* (.skp),
- *Rhino* (.3dm),
- *Solidworks* (.prt),

De plus, *Navisworks* permet d'importer différents types de formats de fichier pour les plannings :

- *MS Project* (.mpp, .mpx .xml)
- *Primavera Project*
- .CSV

Synchro

Synchro est développé par *Synchro LTD* qui est spécialisé dans le VDC (Virtual Design for Construction) et la 4D. Il est très proche de *Navisworks* au niveau des diverses fonctionnalités d'import et d'export. Il permet l'import de modèle 3D des formats de fichiers suivants :

- Standard (.ifc)
- *Autodesk* (.dwg (*AutoCAD*), .3ds (*Autodesk 3ds Max*), .fbx),
- *SketchUp* (.skp),
- *Rhino* (.3dm),
- *Solidworks* (.prt),

Synchro permet d'importer les mêmes types de formats de fichiers pour les plannings que *Navisworks* :

- *MS Project* (.mpp, .mpx .xml)
- *Primavera Project*
- .CSV

La particularité de *Synchro* réside dans la visualisation et le réalisme des animations créées. Enfin, il existe un plug-in qui permet d'exporter les modèles de *Navisworks* vers *Synchro*.

Annexe 5 : Fiche de consigne type distribuée aux participants à l'expérimentation



1. Généralités sur l'expérience

Le projet : Bâtiment de bureaux de 7270 m²

Lieux : Esch-sur-Alzette, Luxembourg

Etape : Préconstruction, Planification du chantier

Composition de l'équipe :

Architecte + Entreprise générale + Bureau d'études + Maître d'ouvrage



Equipement : Espace de travail numérique collaboratif synchrone co-



localisé (table tactile, logiciel Shariing, 4 stylets)

Scénario: vous agissez dans le cadre d'une équipe-projet intervenant

1



en phase de planification du projet de construction d'un bâtiment de bureaux à Esch-sur-Alzette.

2.a. Contexte architectural

Le bâtiment en cours de construction sur le site de Belval utilisé lors de cette expérimentation s'inscrit avec précision dans un environnement formé de vestiges industriels complexes et remarquables.

Il se présente sous forme d'un rectangle de 53 x 43 m de côtés, défini par un anneau périphérique continu d'une profondeur d'environ 15 m.

Cette structure bâtie libre en son centre un vaste espace ouvert de 23 x 14 m de côtés. L'anneau formé par les 5 niveaux de bureaux culminant à 23 m de hauteur est posé sur un rez-de-chaussée largement ouvert sur les quatre côtés pour souligner ainsi le caractère public de l'espace central.

2.b. Structure

La structure est basée sur un ensemble de sous-modules carrés de 0,525 m de côté, regroupés en modules structurels de 4,725 m (9 sous-modules).

Ce module constitue la base graphique sur laquelle se déclinent les différentes combinaisons offrant des espaces libres - donc *des portées de structure - de un ou deux modules respectivement de 4.725 ou 9.45 mètres.*

Pour chacune de ces portées, la structure est adaptée pour répondre aux objectifs de stabilité (résistance, déformabilité) et de compartimentage, mais également d'inertie thermique (masse).

Cet aspect de masse, jouant le rôle de réservoir de frigories nécessaire au free-cooling, est requis, pour des raisons d'efficacité et de confort, tant au niveau du plafond qu'au niveau du sol.

C'est ce besoin de masse qui a guidé les grands principes de la structure. Pour l'ensemble des zones bureaux, *deux dalles minces en béton (18 et 15 cm) délimitent les espaces. Ces deux dalles sont interconnectées par des poutres en béton créant un vide technique à chaque niveau.*

Ce vide technique est rendu accessible par des ouvertures générées dans le plancher des circulations et par des boîtes de sol disposées de manière systématique dans les zones de bureaux.

Cette conception permet d'obtenir la raideur suffisante pour le franchissement des plus grandes portées, de générer le compartimentage RF nécessaire entre les différents étages tout en



offrant une grande modularité et un espace technique pour la distribution chauffage, électricité et ventilation.

Tâche 1 : Optimisation du planning Gros Oeuvre (séquençage du planning et choix du mode constructif : béton coulé en place, préfabriqué, etc.).

Nous sommes en mars 2012, en phase de préconstruction du projet.

Une première version du planning Gros Oeuvre a été présentée par l'entreprise de construction. Cette version va être discutée et modifiée dans cette réunion d'équipe projet, pour l'améliorer, corriger des erreurs ou éviter d'éventuels risques liés aux choix de planification.

Lors d'une réunion avec l'équipe du projet (architecte, ingénieur, entreprise, client), *vous êtes donc amenés à comprendre, questionner et optimiser ce planning* de différentes manières (non exhaustif) :

- Tentez, en équipe, de proposer des alternatives sur le mode constructif (béton coulé en place, béton préfabriqué etc..),
- Évaluez la durée des tâches en analysant les durées et les ressources à mettre en oeuvre,
- Modifiez le séquençage des tâches, par exemple le chevauchement des tâches



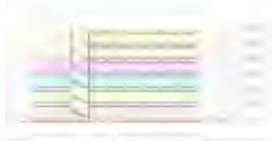
A la fin de la réunion, pendant l'étape de restitution de la décision, vous présenterez le résultat de vos décisions sur les trois points évoqués ci-dessus à un(e) membre du projet qui n'a pas pu se joindre à vous pendant la réunion.

Vous disposez de l'ensemble des documents - Tâche 1 - 4D

00 Schema code couleurs



01 Coupe transversale



03 Etage1



04 Plenum2



09 GO_Planning



10 Tableaux quantités



11a Orthophoto site

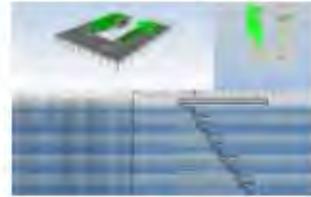


11b Carte site



12 Vidéo 4D





(Pers+Dessus)

13 3D Bâtiment +
environnement

export en cours

14 3D Structure +
environnement

15 3D Bâtiment coupe etage
1

16 Coupe 3D vertical

17 Détail 3D

6



Il n'y a pas de bonne (ou de mauvaise) réponse pour la problématique posée.

Merci pour votre participation et bon courage!

Vous disposez de l'ensemble des documents - Tâche 1 - 2D

00 Schema code couleurs

01 Coupe transversale

02 Coupe longitudinale



03 Etage1



04 Plenum2



05 Etage3

7



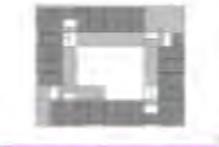
06 Plenum4



07 Etage4



08 Plenum5



09 GO_Planning



10 Tableaux quantités



11a Orthophoto site



11b Carte site



Annexe 6 : Questionnaire donné aux participants après l'expérimentation



Votre retour sur le logiciel Shariing

Merci de remplir le questionnaire suivant concernant votre expérience avec le logiciel Shariing sur table interactive permettant le support de réunion collaborative, afin de nous aider dans nos recherches.

Merci de votre participation.

Nom Rôle joué

- 1 Pour chacune de ces propositions veuillez indiquer à quel point vous vous sentez en accord ou en désaccord.

	Pas du tout d'accord 1	2	Neutre 3	4	Tout a fait d'accord 5
Je pense que vais utiliser le logiciel Shariing fréquemment.					
Je pense que le logiciel Shariing est inutilement complexe.					
Je pense que le logiciel Shariing est facile d'utilisation.					
Je pense que je vais devoir faire appel au support technique pour pouvoir utiliser le logiciel Shariing.					
Je trouve que les fonctionnalités du logiciel Shariing sont bien intégrées.					
Je trouve qu'il y a beaucoup trop d'incohérences dans ce logiciel Shariing.					
Je pense que la plupart des gens apprennent très rapidement à utiliser le logiciel Shariing.					
Je trouve le logiciel Shariing vraiment très lourd à utiliser.					
Je me suis senti très confiant en utilisant ce logiciel Shariing.					
J'ai dû apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir utiliser ce logiciel Shariing.					

- 2 En général, j'ai pu mener à bien mes actions ?

3. Quelle est ma pire expérience avec le logiciel Shariing ?

4. Quels autres problèmes ai-je rencontré avec le logiciel Shariing ?

5. Quelle est ma meilleure expérience avec le logiciel Shariing ?

6. Quels sont les autres points positifs du logiciel Shariing ?

7. Pour chacune de ces propositions veuillez indiquer à quel point vous vous sentez en accord ou en désaccord.

	Pas du tout d'accord 1	2	Neutre 3	4	Tout à fait d'accord 5
De manière générale je ne vois pas l'intérêt des réunions de planification collectives.					
Le logiciel Shariing sur table interactive améliore les réunions de planification.					
Le set de documents 4D améliore la compréhension des problèmes de planification.					
Le set de documents 4D améliore la prise de décision collaborative.					

8. Quel est mon avis sur l'association de la 4D avec Shariing ?

9. Je pense que Shariing permet de réaliser une bonne restitution d'une décision prise collectivement ?

Annexe 7 : Réponses au questionnaire post-expérimental

4 collab

Votre retour sur le logiciel Shariing

Merci de remplir le questionnaire suivant concernant votre expérience avec le logiciel Shariing sur table interactive permettant le support de réunion collaborative, afin de nous aider dans nos recherches.

Merci de votre participation.

Nom PIGNON Gilles.....

Rôle joué Bureau Etudes.....

1. Pour chacune de ces propositions veuillez indiquer à quel point vous vous sentez en accord ou en désaccord.

	Pas du tout d'accord 1	2	Neutre 3	4	Tout à fait d'accord 5
Je pense que vais utiliser le logiciel Shariing fréquemment.				X	
Je pense que le logiciel Shariing est inutilement complexe.		X			
Je pense que le logiciel Shariing est facile d'utilisation.				X	
Je pense que je vais devoir faire appel au support technique pour pouvoir utiliser le logiciel Shariing.		X			
Je trouve que les fonctionnalités du logiciel Shariing sont bien intégrées.				X	
Je trouve qu'il y a beaucoup trop d'incohérences dans ce logiciel Shariing.		X			
Je pense que la plupart des gens apprennent très rapidement à utiliser le logiciel Shariing.					X
Je trouve le logiciel Shariing vraiment très lourd à utiliser.	X				
Je me suis senti très confiant en utilisant ce logiciel Shariing.					X
J'ai dû apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir utiliser ce logiciel Shariing.		X			

2. En général, j'ai pu mener à bien mes actions ?

oui car cela a permis de travailler efficacement

3. Quelle est ma pire expérience avec le logiciel Shariing ?

3D difficile à appréhender.

4. Quels autres problèmes ai-je rencontré avec le logiciel Shariing ?

L'écriture sur les documents.

5. Quelle est ma meilleure expérience avec le logiciel Shariing ?

Partage au live

6. Quels sont les autres points positifs du logiciel Shariing ?

Permet collaboration et annotations directes.

7. Pour chacune de ces propositions veuillez indiquer à quel point vous vous sentez en accord ou en désaccord.

	Pas du tout d'accord 1	2	Neutre 3	4	Tout à fait d'accord 5
De manière générale je ne vois pas l'intérêt des réunions de planification collectives.	X				
Le logiciel Shariing sur table interactive améliore les réunions de planification.					X
Le set de documents 4D améliore la compréhension des problèmes de planification.					X
Le set de documents 4D améliore la prise de décision collaborative.					X

8. Quel est mon avis sur l'association de la 4D avec Shariing ?

Avis très positif à développer certains améliorations.

9. Je pense que Shariing permet de réaliser une bonne restitution d'une décision prise collectivement ?

Oui, sous réserve de bien maintenir le logiciel.

Votre retour sur le logiciel Shariing

Merci de remplir le questionnaire suivant concernant votre expérience avec le logiciel Shariing sur table interactive permettant le support de réunion collaborative, afin de nous aider dans nos recherches.

Merci de votre participation.

Nom *Zeynep Dediş*

Rôle joué *Entreprise générale*

1. Pour chacune de ces propositions veuillez indiquer à quel point vous vous sentez en accord ou en désaccord.

	Pas du tout d'accord 1	2	Neutre 3	4	Tout à fait d'accord 5
Je pense que vais utiliser le logiciel Shariing fréquemment.			<i>α</i>		
Je pense que le logiciel Shariing est inutilement complexe.	<i>α</i>				
Je pense que le logiciel Shariing est facile d'utilisation.				<i>α</i>	
Je pense que je vais devoir faire appel au support technique pour pouvoir utiliser le logiciel Shariing.	<i>α</i>				
Je trouve que les fonctionnalités du logiciel Shariing sont bien intégrées.				<i>α</i>	
Je trouve qu'il y a beaucoup trop d'incohérences dans ce logiciel Shariing.		<i>α</i>			
Je pense que la plupart des gens apprennent très rapidement à utiliser le logiciel Shariing.				<i>α</i>	
Je trouve le logiciel Shariing vraiment très lourd à utiliser.		<i>α</i>			
Je me suis senti très confiant en utilisant ce logiciel Shariing.			<i>α</i>		
J'ai dû apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir utiliser ce logiciel Shariing.	<i>α</i>				

2. En général, j'ai pu mener à bien mes actions ?

Oui, sans soucis

3. Quelle est ma pire expérience avec le logiciel Shariing ?

? => Encore aucune.

4. Quels autres problèmes ai-je rencontré avec le logiciel Shariing ?

3D mobile sur toute les fenêtres et pasteuriser

5. Quelle est ma meilleure expérience avec le logiciel Shariing ?

6. Quels sont les autres points positifs du logiciel Shariing ?

Convenir

En attente
d'autres
essais

Encore, encore...

7. Pour chacune de ces propositions veuillez indiquer à quel point vous vous sentez en accord ou en désaccord.

	Pas du tout d'accord 1	2	Neutre 3	4	Tout à fait d'accord 5
De manière générale je ne vois pas l'intérêt des réunions de planification collectives.	α				
Le logiciel Shariing sur table interactive améliore les réunions de planification.				α	
Le set de documents 4D améliore la compréhension des problèmes de planification.				α	
Le set de documents 4D améliore la prise de décision collaborative.				α	

8. Quel est mon avis sur l'association de la 4D avec Shariing ?

Bon compromis, mais que justifie l'interprétation réelle d'un visionner de planning permettant le défilement partiel

9. Je pense que Shariing permet de réaliser une bonne restitution d'une décision prise collectivement ?

Oui

Votre retour sur le logiciel Shariing

Merci de remplir le questionnaire suivant concernant votre expérience avec le logiciel Shariing sur table interactive permettant le support de réunion collaborative, afin de nous aider dans nos recherches.

Merci de votre participation.

Nom Abdil

Rôle joué Architecte

1. Pour chacune de ces propositions veuillez indiquer à quel point vous vous sentez en accord ou en désaccord.

	Pas du tout d'accord 1	2	Neutre 3	4	Tout à fait d'accord 5
Je pense que vais utiliser le logiciel Shariing fréquemment.			X		
Je pense que le logiciel Shariing est inutilement complexe.	X			X	
Je pense que le logiciel Shariing est facile d'utilisation.				X	
Je pense que je vais devoir faire appel au support technique pour pouvoir utiliser le logiciel Shariing.		X			
Je trouve que les fonctionnalités du logiciel Shariing sont bien intégrées.				X	
Je trouve qu'il y a beaucoup trop d'incohérences dans ce logiciel Shariing.		X			
Je pense que la plupart des gens apprennent très rapidement à utiliser le logiciel Shariing.				X	
Je trouve le logiciel Shariing vraiment très lourd à utiliser.	X				
Je me suis senti très confiant en utilisant ce logiciel Shariing.				X	
J'ai dû apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir utiliser ce logiciel Shariing.	X				

2. En général, j'ai pu mener à bien mes actions ?

3. Quelle est ma pire expérience avec le logiciel Shariing ?

Synchronisation de la 3D → souvent reporté sur x fenêtres -

4. Quels autres problèmes ai-je rencontré avec le logiciel Shariing ?

- Bug surcharge activité
- Redimensionnement non voulu des fenêtres -

5. Quelle est ma meilleure expérience avec le logiciel Shariing ?

Partage info / doc
Annotation partagées

6. Quels sont les autres points positifs du logiciel Shariing ?

Production de CR sur base des docs annotés

7. Pour chacune de ces propositions veuillez indiquer à quel point vous vous sentez en accord ou en désaccord.

	Pas du tout d'accord 1	2	Neutre 3	4	Tout à fait d'accord 5
De manière générale je ne vois pas l'intérêt des réunions de planification collectives.	X				
Le logiciel Shariing sur table interactive améliore les réunions de planification.				1	
Le set de documents 4D améliore la compréhension des problèmes de planification.				X	
Le set de documents 4D améliore la prise de décision collaborative.				X	

8. Quel est mon avis sur l'association de la 4D avec Shariing ?

Positif

9. Je pense que Shariing permet de réaliser une bonne restitution d'une décision prise collectivement ?

Oui

Votre retour sur le logiciel Shariing

Merci de remplir le questionnaire suivant concernant votre expérience avec le logiciel Shariing sur table interactive permettant le support de réunion collaborative, afin de nous aider dans nos recherches.

Merci de votre participation.

Nom ...ZIGUANE.....

Rôle jouéMO.....

1. Pour chacune de ces propositions veuillez indiquer à quel point vous vous sentez en accord ou en désaccord.

	Pas du tout d'accord 1	2	Neutre 3	4	Tout à fait d'accord 5
Je pense que vais utiliser le logiciel Shariing fréquemment.			X		
Je pense que le logiciel Shariing est inutilement complexe.	X				
Je pense que le logiciel Shariing est facile d'utilisation.				X	
Je pense que je vais devoir faire appel au support technique pour pouvoir utiliser le logiciel Shariing.	X				
Je trouve que les fonctionnalités du logiciel Shariing sont bien intégrées.					X
Je trouve qu'il y a beaucoup trop d'incohérences dans ce logiciel Shariing.	X				
Je pense que la plupart des gens apprennent très rapidement à utiliser le logiciel Shariing.			X		
Je trouve le logiciel Shariing vraiment très lourd à utiliser.	X				
Je me suis senti très confiant en utilisant ce logiciel Shariing.					X
J'ai dû apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir utiliser ce logiciel Shariing.	X				

2. En général, j'ai pu mener à bien mes actions ?

Oui

3. Quelle est ma pire expérience avec le logiciel Shariing ?

IP a planté.
3D difficile à plusieurs

4. Quels autres problèmes ai-je rencontré avec le logiciel Shariing ?

5. Quelle est ma meilleure expérience avec le logiciel Shariing ?

Rapidité de déploiement des données

6. Quels sont les autres points positifs du logiciel Shariing ?

Intuitif. Bonne qualité d'interactions

7. Pour chacune de ces propositions veuillez indiquer à quel point vous vous sentez en accord ou en désaccord.

	Pas du tout d'accord 1	2	Neutre 3	4	Tout à fait d'accord 5
De manière générale je ne vois pas l'intérêt des réunions de planification collectives.	X				
Le logiciel Shariing sur table interactive améliore les réunions de planification.				X	
Le set de documents 4D améliore la compréhension des problèmes de planification.					X
Le set de documents 4D améliore la prise de décision collaborative.					X

8. Quel est mon avis sur l'association de la 4D avec Shariing ?

Prometteur, beaucoup d'opportunités. Le partage d'information est utile à la planification 4D.

9. Je pense que Shariing permet de réaliser une bonne restitution d'une décision prise collectivement ?

Oui, Bilan rapide de la réunion -

