

Titre: Exploitation des technologies de l'Industrie 4.0 à des fins de
Title: génération du As-Built Schedule en gestion de projets

Auteur: Nolwenn Cousin
Author:

Date: 2019

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Cousin, N. (2019). Exploitation des technologies de l'Industrie 4.0 à des fins de
Citation: génération du As-Built Schedule en gestion de projets [Mémoire de maîtrise,
Polytechnique Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/3934/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/3934/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Mario Bourgault, Christophe Danjou, & Robert Pellerin
Advisors:

Programme: Maîtrise recherche en génie industriel
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Exploitation des technologies de l'Industrie 4.0 à des fins de génération du *As-Built Schedule* en gestion de projets

NOLWENN COUSIN

Département de mathématiques et de génie industriel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie industriel

Juillet 2019

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Exploitation des technologies de l'Industrie 4.0 à des fins de génération du As- *Built Schedule* en gestion de projets

présenté par **Nolwenn COUSIN**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Bruno AGARD, président

Mario BOURGAULT, membre et directeur de recherche

Robert PELLERIN, membre et codirecteur de recherche

Christophe DANJOU, membre et codirecteur de recherche

Louis RIVEST, membre

REMERCIEMENTS

Je souhaite exprimer toute ma gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de recherche.

Je tiens tout particulièrement à remercier mon directeur de recherche M. Mario Bourgault, professeur à Polytechnique Montréal, de m'avoir fait confiance pour rejoindre son équipe au sein de la Chaire industrielle de recherche Pomerleau sur l'innovation et la gouvernance des projets de construction. Merci Mario pour le support, la disponibilité, l'expertise et l'infinie gentillesse. Ce projet de recherche n'aurait pas pu aboutir sans deux autres professeurs de Polytechnique Montréal, mes codirecteurs M. Robert Pellerin et M. Christophe Danjou. Merci à Robert Pellerin de m'avoir acceptée au sein de la Chaire de Recherche Jarislowski/SNC-Lavalin en gestion de projets internationaux. Toute ma reconnaissance va aux partenaires industriels de ces deux chaires de recherche pour le soutien financier sans lequel le projet n'aurait pu avoir lieu. Merci aussi à Nathalie Perrier pour tous les conseils pertinents.

Une mention spéciale à Aristide, Thibault, Mathilde et Laure et à l'ensemble des amis rencontrés lors de cette expérience pour tous ces moments passés ensemble qui ont rendu l'atmosphère si agréable et créé des liens allant au-delà de ce projet.

Un grand merci à toute l'équipe de tennis des Carabins de l'Université de Montréal (entraîneurs, joueurs, joueuses et physiothérapeute) qui ont rendu cette aventure si inoubliable avec ce titre de champions canadiens et m'ont toujours encouragée au cours de ces deux années.

Plus personnellement, je souhaite remercier mes parents, mes frères, ma famille et tout mon entourage pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de mes études. Un merci tout particulier à Geoffrey pour toute cette aventure canadienne.

RÉSUMÉ

Les projets de construction sont constitués d'un ensemble d'activités plus ou moins complexes et de nombreux ajustements doivent être réalisés tout au long de leur réalisation suite à des complications par rapport au plan initial, d'où l'importance du processus de suivi de l'avancement de ces projets. Afin de mener à bien ce processus, il est nécessaire de collecter des données sur le site en vue de l'élaboration du *As-Built Schedule*. Ce dernier est une image détaillée des activités réalisées du chantier servant de base au processus de suivi et de replanification de projet, à l'analyse des réclamations et de tout type de délais.

Les données du suivi d'un projet de construction sont incorporées à plusieurs documents, dont les journaux de chantier qui rassemblent les informations caractérisant factuellement l'avancée et les conditions d'avancées du chantier. Par leur contenu, ils constituent un rapport pouvant être utilisé pour l'élaboration du *As-built Schedule*. C'est pourquoi l'objectif général est l'amélioration du processus d'élaboration du *As-Built Schedule* à partir des journaux de chantier. L'état de l'art concernant les journaux de chantier a permis de mettre en évidence que la collecte des données nécessaires est chronophage, parfois erronée et qu'elle s'effectue à une fréquence variable. Les méthodes de collecte des données des journaux de chantier constituent donc un enjeu majeur pour automatiser le suivi de projet et l'élaboration du *As-Built Schedule*. Toutefois, la littérature ne fournit pas de modèles de données de ces journaux de chantier indiquant quelles données devraient être collectées. C'est pourquoi l'objectif spécifique (objectif n°1) de cette recherche est la création d'un modèle de données présentant les données nécessaires à la création d'un journal de chantier ainsi que leur mode de collecte.

Cet objectif est ancré dans le contexte de l'Industrie 4.0 qui fait référence à la quatrième révolution industrielle que nous vivons présentement. L'Industrie 4.0 comprend un ensemble de moyens techniques, méthodes et technologies utilisés afin de soutenir la prise de décision en temps réel. Cette révolution touche peu à peu le secteur de la construction (Construction 4.0) qui reste néanmoins très en retard par rapport à d'autres secteurs industriels. Dans ce contexte, l'objectif n°1 se précise pour intégrer l'association des applications technologiques issues de l'Industrie 4.0 permettant d'automatiser la collecte à chacune des données lors de la création du modèle des journaux de chantier.

La méthodologie employée a permis de confirmer la problématique des journaux de chantier soulevée par la revue de littérature en la confrontant à une analyse de l'existant réalisée chez un partenaire industriel. L'élaboration du modèle de données s'est réalisée à partir de l'identification des données nécessaires et par la détermination des applications technologiques issues du 4.0 permettant la collecte de ces données. Après identification de ces éléments, le modèle de données des journaux de chantier avec intégration des applications technologiques du 4.0 a été construit. Un cas d'étude du modèle mené chez le partenaire industriel a permis de proposer une démarche d'implantation. La démarche proposée est basée sur la priorisation des entités les plus chronophages du modèle, identifiées par une étude de temps. Ce cas d'étude répond au deuxième objectif (objectif n°2) qui est de développer une méthodologie d'implantation du modèle.

En conclusion, les contributions de ce mémoire ont pour vocation de contribuer au développement de l'Industrie 4.0 ainsi qu'à l'amélioration du processus de suivi des projets dans le domaine de la construction.

ABSTRACT

Construction projects involve a set of more or less complex activities and many adjustments must be made throughout their implementation following complications compared to the initial plan, hence the importance of the progress monitoring process. In order to complete this process, it is necessary to collect data on site for the elaboration of the As-Built Schedule. The latter is a detailed picture of the activities carried out on the site, which serves as a basis for the project monitoring and re-planning process, the analysis of claims and all types of delays.

The monitoring data of a construction project are included in several documents, including daily reports that collect information that characterizes the progress and conditions of the site's progress. By their content, they can be used to develop the As-built Schedule. The state of the art concerning daily reports has shown that the collection of the necessary data is time-consuming, sometimes incorrect and that it is carried out at a variable frequency. Methods of collecting data for daily reports are therefore a major challenge in automating project monitoring and the development of the As-Built Schedule. However, the literature does not provide a data model of these site reports indicating which data should be collected. This is why the objective of this research is to create a data model presenting the data needed for the creation of a daily report as well as their collection method.

This objective is grounded in the Industry 4.0 context, which refers to the fourth industrial revolution we are currently experiencing. Industry 4.0 includes a set of technical means, methods and technologies used to support real-time decision-making. This revolution is gradually affecting the construction sector (Construction 4.0), which nevertheless remains far behind other industrial sectors. In this context, the objective is to combine technological applications from Industry 4.0 to automate the collection of each of the data contained in the daily report model.

The methodology used made it possible to confirm the problem of site daily reports raised by the literature review by comparing it with an analysis of the existing situation carried out by an industrial partner. The development of the data model was based on the identification of the required data and the determination of the technological applications from 4.0 that would allow the collection of these data. After identifying these elements, the site daily report data model with integration of 4.0 technological applications was developed. A case study of the model conducted at the industrial partner's site made it possible to propose an implementation approach. The

proposed approach is based on prioritizing the most time-consuming entities in the model, identified by a time study.

In conclusion, the purpose of the contributions of this thesis is to contribute to the development of Industry 4.0 and to the improvement of the monitoring process for construction projects.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES.....	XII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XIII
LISTE DES ANNEXES.....	XIV
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	4
2.1 Introduction	4
2.2 Industrie 4.0.....	4
2.3 Suivi de projet, <i>As-Built Schedule</i> et journaux de chantier	5
2.4 Stratégie de recherche de l'analyse critique de la littérature.....	7
2.5 Présentation du contenu des articles pertinents.....	9
2.5.1 Revue des travaux de recherche	9
2.5.2 Les journaux de chantier	12
2.6 Analyse critique de la littérature	13
2.7 Conclusion.....	16
CHAPITRE 3 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE.....	17
3.1 Introduction	17
3.2 Objectifs de recherche.....	17
3.3 Démarche proposée.....	18

3.3.1	L'analyse de l'existant	19
3.3.2	Élaboration du modèle	21
3.3.3	Démarche d'implantation et cas d'étude	23
3.4	Conclusion.....	24
CHAPITRE 4 ANALYSE DE L'EXISTANT.....		25
4.1	Introduction	25
4.2	Cartographie du processus de suivi.....	25
4.3	Analyse causale	28
4.3.1	Analyse de la valeur	28
4.3.2	Analyse de la structure	30
4.3.3	Analyse causale	30
4.4	Journal de chantier du partenaire	32
4.5	Conclusion.....	33
CHAPITRE 5 MODÈLE DE DONNÉES		34
5.1	Introduction	34
5.2	Le contenu du modèle de données des journaux de chantier	34
5.2.1	Identification des données	34
5.2.2	Identification des applications technologiques 4.0	37
5.3	Modèle de données des journaux de chantier.....	41
5.4	Conclusion.....	44
CHAPITRE 6 CAS D'ÉTUDE.....		45
6.1	Introduction	45
6.2	Démarche d'implantation progressive	45
6.3	Application dans le contexte du partenaire industriel	46

6.3.1	Application de la démarche d'implantation progressive.....	46
6.3.2	Interprétation	54
6.4	Conclusion.....	54
CHAPITRE 7 DISCUSSION, CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....		55
BIBLIOGRAPHIE		57
ANNEXES		60

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Concepts et mots clés de la phrase de recherche.....	8
Tableau 2.2 : Revue des sujets abordés par les auteurs.....	14
Tableau 3.1 : Concepts et mots clés associés à la recherche des applications technologiques 4.0 de collecte de données.....	23
Tableau 4.1: Analyse de la valeur du processus cartographié.....	28
Tableau 6.1 : Exemple de résultats obtenus pour la catégorie gestion du site pour les rôles de chef de projet et surintendant	48
Tableau 6.2 : Nombre d'heures totales référencées pour l'ensemble des activités des rôles de chef de projet et surintendant	49
Tableau 6.3 : Association entre les entités du modèle de données et les activités de l'étude de temps	50
Tableau 6.4 : Résultats de l'étude de temps pour chaque entité du modèle.....	51
Tableau D.1 : Grille d'analyse des articles de la vue de littérature sur les journaux de chantier ..	63

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Stratégie de recherche pour mener l'analyse critique de la littérature.....	7
Figure 3.1 : Application de la démarche DRM au projet de recherche.....	19
Figure 3.2 : Méthodologie de l'analyse de la valeur.....	20
Figure 4.1 : Processus cartographié de suivi d'avancement du projet	27
Figure 4.2: Analyse causale du processus cartographié.....	31
Figure 4.3 : Gabarit anonymisé du journal de chantier du partenaire	32
Figure 5.1: Correspondance entre les éléments des journaux de chantier présentés dans les articles	37
Figure 5.2 : Modèle de données des journaux de chantier intégrant des applications technologiques de collecte issues de l'Industrie 4.0.....	43
Figure 6.1 : Démarche d'implantation progressive des applications technologiques du 4.0	46
Figure 6.2 : Résultats de l'étude de temps intégrés au modèle de données des journaux de chantier	53
Figure A.1 : Nombre de publications scientifiques sur le BIM par an, tiré de SCOPUS®	60
Figure C.1 : Processus de suivi d'avancement du projet cartographié.....	62

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AACE	Association for the Advancement of Cost Engineering
AR	Augmented Reality
BIM	Building Information Model ou Building Information Modelling
CPS	Cyber-Physical Systems — Systèmes CyberPhysiques
DRM	Design Research Methodology
ERP	Enterprise Resource Planning — Progiciel de gestion intégré
GIS	Geographic Information System
GPS	Global Positioning System
IFC	Industry Foundation Classes
IoT	Internet of Things — Internet des objets
LADAR	LAser Detection and Ranging
LiDAR	Light Detection and Ranging — Télédétection par laser
PDA	Personal Data Assistant
RFID	Radio Frequency Identification
SVA	Sans valeur ajoutée
VAA	Valeur ajoutée d'affaires
VAR	Valeur ajoutée réelle

LISTE DES ANNEXES

Annexe A – Nombre de publication scientifiques sur le BIM par an	60
Annexe B – Phrase de recherche des applications technologiques 4.0 de collecte de données.....	61
Annexe C – Processus de suivi d’avancement du projet cartographie.....	62
Annexe D – Résumé par les auteurs concernant les journaux de chantier.....	63

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

L'Industrie 4.0 fait référence à la quatrième révolution industrielle que nous serions en train de franchir après les trois premières (énergie hydraulique et à vapeur fin XVIII^e, production de masse et énergie électrique début XX^e, logique programmable au début des années 1970). Le terme Industrie 4.0 a d'abord été utilisé en Allemagne en 2011¹ pour qualifier un nouveau type d'industrialisation (Kagermann, Helbig, Hellinger, & Wahlster, 2013) destiné à améliorer l'efficacité énergétique et en termes de ressources pour répondre aux changements démographiques du pays (Drath & Horch, 2014). L'une des définitions les plus simples consiste à considérer ce terme comme désignant l'ensemble des moyens techniques, méthodes et technologies utilisés afin de soutenir la prise de décision en temps réel (Danjou, Pellerin, & Rivest, 2017). Plusieurs termes sont associés à cette transformation pour décrire le phénomène selon les différents pays et stratégies mises en place : « Smart Manufacturing », « Smart Production », « Advanced Manufacturing » ou encore « Smart Factory ». Ce dernier concept d'usine intelligente désigne l'interconnexion des différents points de production et l'automatisation de leurs échanges d'informations (Halaška & Šperka, 2018). Dans le secteur manufacturier, l'Industrie 4.0 est centrée sur les systèmes cyberphysiques (CPS) et l'internet des objets (IoT) qui représentent l'association du monde physique avec le monde virtuel (Kagermann et al., 2013). L'IoT et les CPS constituent donc un mode de gestion des systèmes et technologies pouvant être utilisé en temps réel pour l'ensemble de la chaîne de valeur et permettant une amélioration des processus (Brettel, Friederischen, Keller, & Rosenberg, 2014). En somme, l'Industrie 4.0 est à l'origine d'environnements intégrés, basés sur le tout numérique et le tout connecté entre les différents processus automatisés tout au long de la chaîne de valeur (Halaška & Šperka, 2018). Le développement, l'utilisation et la maîtrise des applications technologiques liées à cette révolution constituent à la fois un défi et une opportunité majeurs pour l'industrie d'aujourd'hui.

¹ Le terme « Industrie 4.0 » a été utilisé pour la première fois lors de la foire d'Hanovre en 2011 (Drath & Horch, 2014).

Ce projet de recherche est ancré dans un secteur qui est peu à peu touché par la 4^e révolution industrielle : le secteur de la construction. L'Industrie 4.0 dans ce domaine d'application peut être désignée comme la Construction 4.0. Peu de concepts liés à cette révolution sont actuellement employés par les industriels du secteur. L'industrie de la construction reste encore très en retard par rapport à la quasi-totalité des autres industries notamment en ce qui concerne l'investissement en recherche et développement. Le nombre de petites et moyennes entreprises dans le secteur peut en partie expliquer une plus faible capacité à investir dans les nouvelles technologies (Oesterreich & Teuteberg, 2016). La chaîne de valeur est fragmentée et l'aboutissement des projets repose le plus souvent sur de nombreux sous-traitants. Cette fragmentation impose la collaboration entre plusieurs acteurs de tailles différentes qui n'ont généralement pas le même niveau de développement technologique que les gros acteurs du secteur. Le domaine est aussi soumis à une forte résistance aux changements. Ces spécificités peuvent expliquer le développement tardif de l'Industrie 4.0 dans ce contexte (Oesterreich & Teuteberg, 2016).

C'est dans ce contexte de Construction 4.0 que se déroule ce projet de recherche centré sur la gestion et le suivi des projets. Le suivi de l'avancement du projet doit être particulièrement bien mené pour parvenir à atteindre les objectifs d'un chantier le plus souvent complexe. Parmi les nombreux outils permettant ce suivi, le *As-Built Schedule*² représente une image de la progression des travaux (Knoke & Jentzen, 1996). Sa génération peut s'effectuer à partir des rapports et notamment des journaux de chantier. C'est ce moyen d'élaboration du *As-Built Schedule* qui est au cœur de ce projet de recherche. La collecte des données qui figurent dans ces documents s'effectue le plus souvent de manière manuelle, par déambulation d'un membre de l'équipe projet sur le chantier à une fréquence variable. La question de la génération automatique du *As-Built Schedule* via les journaux de chantier à l'aide des applications technologiques de collecte de données 4.0 s'avère donc prometteuse pour combler ces lacunes, et constitue donc l'objet de ce mémoire.

² Le terme *As-Built Schedule* est lié au terme *As-built*. Ce dernier n'a pas véritablement d'équivalent en français, il est généralement désigné comme le « tel que construit ». Il est associé à plusieurs outils comme le *As-Built Schedule* auquel s'intéresse ce projet de recherche, ou encore au *As-Built Model* qui est un modèle 3D reconstitué à partir des données chantier (souvent sous la forme d'un nuage de points).

L'objectif général est l'amélioration du processus d'élaboration du *As-Built Schedule* à partir des journaux de chantier.

Pour mener ce projet de recherche, une revue de littérature sera d'abord présentée au Chapitre 2. Cet état de l'art présente les travaux principaux ainsi qu'une analyse critique de la littérature dans le domaine des journaux de chantier. Le Chapitre 3 détaille par la suite les objectifs de recherche qui découlent de ces limitations ainsi que la méthodologie de recherche employée par la suite. Cette démarche méthodologique s'appuie sur la démarche DRM (*Design Research Methodology*), une approche qualitative permettant de structurer le projet de recherche à partir d'analyse de cas empiriques. L'ensemble des études empiriques de ce mémoire ont été réalisées chez un partenaire industriel, acteur du domaine de la construction. Le Chapitre 4 comprend une analyse de l'existant. Elle inclut une cartographie d'un projet d'infrastructure de plusieurs millions de dollars, une analyse de structure de processus, une analyse de valeur ainsi qu'une analyse causale. Le Chapitre 5 présente le modèle de données élaboré suite à l'identification préalable des données devant y figurer et des méthodes de collecte 4.0 permettant de les collecter. Enfin, le chapitre 6 permet de proposer une démarche d'implantation basée sur l'utilisation du modèle et de l'expérimenter dans le contexte particulier du partenaire industriel. Un chapitre de conclusion présentera finalement une discussion sur les contributions de ce projet de recherche et les opportunités qui peuvent en découler.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

Cette revue de littérature s'axe sur le suivi des projets de construction et les journaux de chantier. Le chapitre débute par une présentation de l'Industrie 4.0 même si ce n'est pas le sujet principal de la revue, elle est nécessaire pour comprendre la dynamique actuelle de l'industrie. Cette présentation sera suivie de l'explication des liens exprimés dans la littérature entre suivi de projet, *As-Built Schedule* et journaux de chantier. La revue systématique de littérature est ensuite exposée, elle est suivie d'une analyse critique de ces articles. L'objectif de cette analyse critique est de faire ressortir les manques de la littérature scientifique en ce qui concerne le contenu et l'élaboration des journaux de chantier. Ce sont également ces manques qui ont influencé les objectifs de recherche, tels que présentés au prochain chapitre.

2.2 Industrie 4.0

Le terme « Industrie 4.0 » a été utilisé pour la première fois lors de la foire d'Hanovre en 2011 (Drath & Horch, 2014). Il n'y a pas de consensus autour de la définition de l'Industrie 4.0 en tant que telle et plusieurs définitions ont été recensées (Bidet-Mayer & Ciet, 2016). De nombreuses applications technologiques peuvent se rattacher à l'Industrie 4.0. Ces applications ne reposent pas forcément sur de nouvelles technologies. La stratégie 4.0 est centrée, dans le secteur manufacturier, sur les Systèmes Cyberphysiques (CPS) et l'internet des objets (IoT) qui représentent l'association du monde physique avec le monde virtuel (Kagermann et al., 2013). L'Industrie 4.0 est donc basée sur le tout numérique et le tout connecté en vue d'une prise de décision en temps réel (Danjou et al., 2017).

L'implantation de l'Industrie 4.0 dans le secteur de la construction, aussi appelée « Construction 4.0 », est liée avec le Building Information Modeling (BIM) comme le montre l'analyse quantitative effectuée par Oesterreich et Teuteberg (2016) dans laquelle le BIM est l'élément le plus cité parmi les publications de l'enquête. Le BIM s'inscrit plus largement dans le courant du « Digital building ». Le bâtiment numérique est considéré comme l'ensemble des informations qui définissent le bâtiment avec la possibilité d'une représentation virtuelle reflétant le cycle de vie de celui-ci (Watson, 2011). Spécifiquement, le terme BIM peut désigner à la fois le

modèle numérique de partage d'information et la méthodologie de gestion de l'information. S'il existe des liens entre le BIM et de nombreuses applications technologiques 4.0, plusieurs applications en sont totalement indépendantes. Ainsi, le BIM est une caractéristique du milieu de la construction et son émergence a facilité l'introduction de la Construction 4.0, mais celle-ci ne cherche pas à bâtir un système intégré basé sur le BIM.

Si les technologies ne sont pas spécifiques à la révolution 4.0, certaines sont néanmoins plus fréquemment mentionnées lorsqu'il s'agit de Construction 4.0. Oesterreich et Teuteberg (2016) se sont ainsi donnés pour objectif d'explorer l'état de l'art ainsi que l'état de la pratique de l'industrie 4.0 dans le secteur de la construction en ce qui concerne les technologies. Ils ont effectué une revue de littérature systématique permettant de faire ressortir les technologies les plus mentionnées. L'utilisation du RFID pour l'automatisation du processus de construction est ressortie tout comme la réalité augmentée, virtuelle et mixte pour les simulations (parfois associées au BIM). Un autre concept technologique majeur du domaine est la robotisation (drone, impression en trois dimensions...) pour la fabrication, la surveillance de site et la capture d'un nuage de point permettant de reconstituer le chantier. Enfin, plusieurs publications mentionnent l'utilisation d'assistant d'aide à la saisie de données (PDA), de téléphones intelligents et de dispositifs mobiles.

2.3 Suivi de projet, *As-Built Schedule* et journaux de chantier

Les projets de construction sont des projets souvent complexes avec des complications et des changements fréquents tout au long de leur réalisation, d'où l'importance de la gestion et plus particulièrement du processus de suivi. Un des enjeux majeurs des projets de construction est donc d'assurer un suivi continu d'avancement du projet pour connaître l'état des travaux. Ce suivi nécessite la collecte de données sur le chantier. Le plus souvent, l'ensemble des données est collecté par un membre de l'équipe de projet qui se rend sur le site de construction. Ces données sont ensuite exploitées en vue d'analyser la situation et de prendre les décisions nécessaires à l'atteinte des objectifs du projet (Pučko, Šuman, & Rebolj, 2018). L'analyse de l'information vise en effet la détection et l'explication des écarts de temps, de coût, de portée afin de permettre l'instauration de mesures correctives (Russell, 1993). Ces analyses peuvent aussi être utilisées dans le cadre de réclamations. L'ensemble des données collectées constitue le *As-Built Schedule* qui représente les séquences et les durées réelles des activités en tenant compte des changements tout au long du projet (Shrestha & Jeong, 2017).

Le *As-Built Schedule* réfère à un enregistrement des activités du projet qui définit une image détaillée et précise de l'avancée du chantier à un moment donné. C'est un portrait détaillé des performances des activités du projet (Knoke & Jentzen, 1996). Les données principales nécessaires à sa constitution sont relatives aux tâches accomplies, à la météo, aux équipements et aux travailleurs. Peu d'auteurs s'intéressent à la génération du *As-Built Schedule* (Shrestha & Jeong, 2017). Dans la littérature, les travaux qui s'intéressent au *As-Built Schedule* portent principalement sur l'analyse des délais (Yang & Yin, 2009), coûts (Battikha & Alkass, 1994) et risques (Thipparate, 2014) notamment pour les réclamations ou encore sur des logiciels (Jazayeri, 1994) et algorithmes (Yang & Tsai, 2010) permettant la génération automatique (Ibrahim, Germain, Guevremont, Forcier, & Moselhi, 2013) du *As-Built Schedule*. D'autres enfin se concentrent sur les analyses de comparaison avec le BIM (Matthews et al., 2015) et la visualisation (Tserng, Ho, & Jan, 2014) de ce qu'ils considèrent comme le *As-Built Schedule* mais se focalisent en réalité sur quelques données issues du site de construction (Kim, C., Kim, & Kim, 2013) qui ne permettent pas de reconstituer une image détaillée et précise de l'intégralité du chantier.

Selon l'Association for the Advancement of Cost Engineering (2011) (AACE), une des approches pour l'élaboration du *As-Built Schedule* consiste à créer un échancier conforme à l'exécution à partir de zéro. Cette approche s'appuie sur divers types d'enregistrements d'avancement et principalement les journaux de chantier. Ces derniers sont des rapports constitués de la compilation des données collectées sur le site de construction (notamment relatives à la météo, aux ressources, aux tâches accomplies, ...) et permettant un suivi de l'avancement du projet. La précision et la véracité du calendrier qui en résulte sont dépendantes du niveau de détail et l'étendue de l'information disponible dans les enregistrements du chantier. Il est donc très important de s'assurer de la validité des données contenues dans les journaux de chantier afin de garantir un processus de suivi basé sur la réalité (Association for the Advancement of Cost Engineering, 2011). S'intéresser aux journaux de chantier est donc une nécessité afin de comprendre les difficultés qui menacent la validité de leurs contenus et donc l'élaboration du *As-Built Schedule*. La génération automatique du *As-Built Schedule* demande en effet de documenter automatiquement les journaux de chantier et donc la collecte automatique des données nécessaire à leur élaboration. C'est pourquoi l'analyse critique issue de la revue systématique de la littérature présentée à la section suivante vise à répondre à ce besoin en se focalisant sur l'analyse des données et méthodes de collecte destinées à la réalisation des journaux de chantier.

2.4 Stratégie de recherche de l'analyse critique de la littérature

Une méthode rigoureuse de sélection et d'analyse des articles est employée afin de couvrir le domaine des journaux de chantier de façon exhaustive. La Figure 2.1 détaille la stratégie générale de recherche :

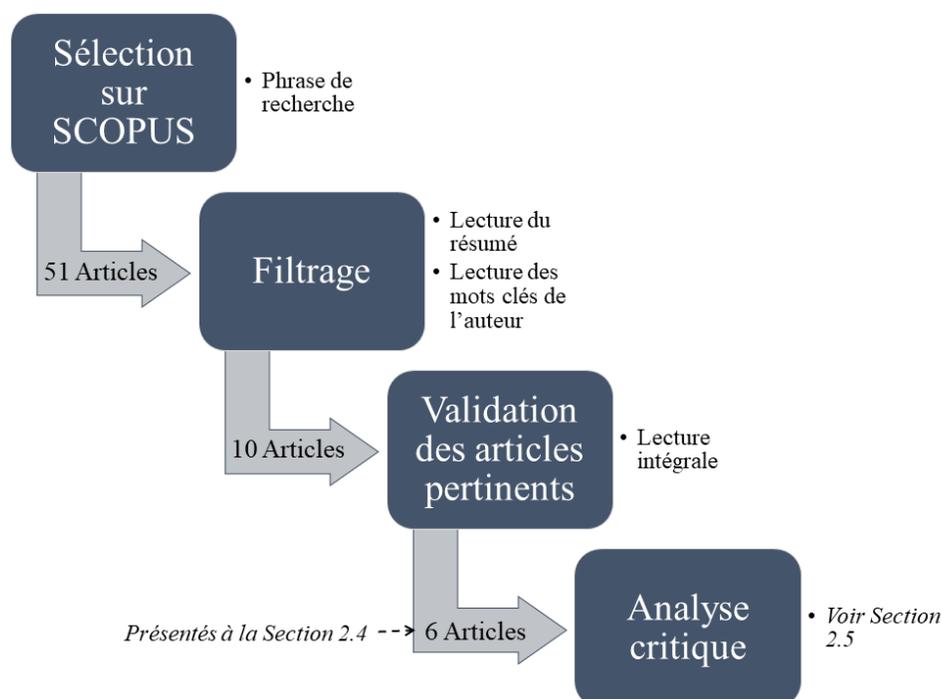


Figure 2.1 : Stratégie de recherche pour mener l'analyse critique de la littérature

La phrase de recherche utilisée sur SCOPUS³ se découpe en trois parties correspondant aux trois concepts de la phrase présentés dans le Tableau 2.1. Elles permettent de centrer la recherche sur le

³ Cette base de données (<https://www.scopus.com/home.uri>) a été préférée à d'autres pour sa large couverture et ses 16500 titres (https://www.couperin.org/IMG/pdf/Scopus_comparatif_290709.pdf). De plus, SCOPUS permet de rechercher des mots clés uniquement sur ceux de l'auteur ce que ne permettent pas d'autres bases de données. Enfin, SCOPUS présente une meilleure logique booléenne, particulièrement en ce qui concerne les troncatures. Les

domaine de la construction puis au sein de ce domaine de s'intéresser au suivi des projets, et plus précisément aux journaux de chantier :

- Une première partie ciblant le domaine de la construction ;
- Une partie se focalisant sur le suivi de projet ; et
- Une troisième partie ciblant les journaux de chantier avec les mots clés suivants.

Ces trois parties se trouvent détaillées au Tableau 2.1 en fournissant les mots clés associés.

Tableau 2.1 : Concepts et mots clés de la phrase de recherche

Concepts	Domaine de la construction	Suivi de projet	Journaux de chantier
Mots clés associés	Construction	supply chain flow management site monitoring reporting site supervision project control* ⁴ project monitor* work progress project progres* control* process monitor* process progress monitor*	daily record* daily report* work report* site report* site record* workbook

Les mots clés ont été recherchés dans le titre, le résumé ou les mots clés de la base de données (« TITLE-ABS-KEY ») afin d'augmenter la pertinence des résultats. La phrase de recherche utilisée est donc :

troncatures étaient indispensables à notre recherche surtout en ce qui concerne le domaine de la construction pour la recherche effectuée à la Section 3.3.2, le terme « construction » pouvant avoir des sens multiples.

⁴ Le symbole « * » constitue une troncature permettant de prendre en considération toutes les terminaisons possibles du mot dans la recherche.

TITLE-ABS-KEY ("construction") AND TITLE-ABS-KEY ("supply chain" OR "flow management" OR "site monitoring" OR "reporting" OR "site supervision" OR "project control*" OR "project monitor*" OR "work progress" OR "project progres*" OR "control* process" OR "monitor* process" OR "progress monitor*") AND ("daily record*" OR "daily report*" OR "work report*" OR "site report*" OR "site record*" OR "workbook").

Après récupération des articles issus de la recherche sur SCOPUS, les articles s'intéressant aux données des journaux de chantier et à leur méthode de collecte ont été sélectionnés. Cette sélection s'est faite par lecture du résumé et des mots-clés des articles, les articles identifiés comme non pertinents ont été éliminés de la revue. Une lecture des articles pertinents restants a été effectuée pour confirmer leur intérêt pour le sujet.

2.5 Présentation du contenu des articles pertinents

La recherche effectuée sur la base de données SCOPUS fait ressortir des articles datant de 1988 à 2018. Si les articles mentionnant des technologies de collecte de données sont nombreux dans la littérature scientifique, très peu d'entre eux sont associés aux journaux de chantier. Le premier auteur à réellement s'intéresser aux journaux de chantier et au suivi quotidien d'un site de construction est Russell (1993). Seuls six auteurs (présentés à la Section 2.5.1) s'intéressent aux problèmes liés aux données à collecter ou aux technologies de collecte dans le cadre des journaux de chantier. En effet, certains articles portent plus sur une technologie particulière, par exemple les ordinateurs mobiles (Valdes & Perdomo, 2013) (Chin, Kim, & Kim, 2005), d'autres se concentrent sur l'analyse des données comme pour estimer le taux de production (Woldesenbet, Jeong, & Oberlender, 2011) ou intégrer les informations au planning (Russell, 1993). D'autres ne s'intéressent tout simplement pas ou trop peu aux journaux de chantier.

2.5.1 Revue des travaux de recherche

En premier lieu, Pučko et al. (2018) se sont intéressés au suivi automatisé des projets de construction à l'aide des numérisations 3D en temps réel après avoir constaté que la mise à jour de l'avancement du projet par l'équipe projet demande beaucoup de ressources, de temps et reste sujette à de nombreuses erreurs. L'objectif est la mise à jour du *As-Built Model* et non du *As-Built Schedule* via la construction d'un nuage de points qui vise la conformité par rapport au résultat attendu et non à l'échéancier planifié. Les dispositifs de numérisation sont placés sur les casques

des travailleurs. En plus du nuage de points 3D, ils enregistrent la position ainsi qu'un horodatage ce qui permet de reconstruire un *As-Built Model 4 D*.

Park et Cai (2017) se sont aussi penchés sur l'utilisation des modélisations 4D pour supporter le suivi des projets de construction. Ces modélisations s'appuient sur le Building Information Modelling (BIM) notamment, car celui-ci permet la comparaison entre le modèle prévu (BIM) et les résultats de la numérisation. De nos jours, les modèles BIM sont mis à jour manuellement afin de suivre l'avancement des travaux. L'article présente un processus basé sur le Web permettant de mettre à jour les modèles numériques en exploitant les données contenues dans les journaux de chantier. L'auteur met en évidence la possibilité de lier les modèles avec les journaux de chantier enregistrés quotidiennement afin de mettre à jour automatiquement l'avancement de la construction. Il présente les résultats d'une étude menée dans plusieurs organisations sur les pratiques de celles-ci. Cette étude s'intéresse aux éléments contenus dans les journaux de chantier des organisations étudiées. Elle recense la présence ou non des éléments suivants : les activités du jour, les caucus quotidiens, des informations sur la qualité, le travail, les équipements, les accidents, la météo, une description du chantier, la localisation des éléments, les matériaux. L'élément commun qui figure dans tous les journaux étudiés correspond aux activités du jour. Cet article s'intéresse donc plus à l'entrée des données dans les journaux de chantier et à leur récupération pour l'analyse qu'à leur collecte.

Dans le même esprit, Hamledari, McCabe, Davari et Shahi (2017) se sont intéressés à la mise à jour automatique des modèles BIM 4D en termes de calendrier et de progrès. Dans cet article, un état de l'art des solutions de suivi basées sur le BIM 4D est présenté et le processus est décrit avant de développer une discussion sur le format d'échange de données Industry Foundation Classes (IFC) et son support pour la programmation. L'auteur identifie dans son introduction les déficiences des processus actuels de collecte des données des journaux de chantier, défis auxquels doit répondre l'automatisation du processus.

Pour leur part, Omar et Nehdi (2016) ont étudié les technologies de collecte des données pour le suivi des projets de construction et notamment des technologies permettant l'acquisition de données en temps réel. Ces données se retrouvent ensuite dans les journaux de chantier. Les technologies étudiées sont classées en trois groupes : les technologies de l'information (outils multimédias, courriels, outils de reconnaissance vocale, outils portatifs), les technologies

géospatiales⁵ (code-bar, radio fréquence, bande ultra large, système de positionnement) et les technologies d'imagerie (photogrammétrie, numérisation par scan laser, vidéogrammétrie et gamme d'images). Ils présentent les avantages et les limitations de ces technologies et leurs applications possibles selon les projets en vue de l'acquisition en temps réel. Des logiciels reposant sur ces technologies sont analysés et plusieurs d'entre eux sont destinés à l'enregistrement des données contenues dans les journaux de chantier.

Isaac et Navon (2012) ont aussi proposé une approche hybride de combinaison des méthodes de collecte de données automatiques et manuelles dans les processus de suivi et de contrôle des projets de construction. Les méthodes manuelles sont souvent nécessaires en complément des méthodes automatiques. Les auteurs présentent un modèle étendu afin d'intégrer des données ajoutées manuellement. L'intégration des données manuelles repose sur leur représentation dans un format standardisé. Un deuxième modèle basé sur l'utilisation des informations contenues dans les journaux de chantier est testé sur un projet de construction. Ce dernier modèle génère des informations sur l'état d'avancement des travaux.

Finalement, Hegazy, Elbeltagi et Zhang (2005) ont proposé des diagrammes intelligents à barres pour simplifier l'enregistrement des données du site et l'élaboration du *As-Built Schedule*. Cette approche permet d'identifier les retards, le nom du responsable et les raisons de ces retards (le nom du responsable et les raisons sont entrés manuellement par l'utilisateur). Un état est ensuite attribué par le diagramme à barres à chaque activité selon son état d'avancement (lent, suspendu ou accéléré). Cet état est basé sur le pourcentage de retards complétés et enregistrés pour l'activité. L'article commence par décrire les données qui doivent être collectées dans les journaux de chantier en vue de l'élaboration du *As-Built Schedule*. Puis, il présente le diagramme, sa représentation et son fonctionnement. Le diagramme est lié à l'échéancier du projet et provoque sa mise à jour automatique.

Si d'autres domaines comme le suivi médical et la maintenance proposent un aspect qui pourrait sembler équivalent en termes de suivi, la fragmentation de la chaîne de valeur des projets de construction et la participation de nombreux acteurs ainsi que le nombre de pièces présentes sur le

⁵ Selon les auteurs, les technologies sont considérées comme géospatiales dans la mesure où elles aident les gestionnaires à visualiser les objets de constructions sur le chantier (Omar & Nehdi, 2016).

produit final et la non répétabilité de celui-ci rendent spécifique le suivi dans ce domaine. C'est pourquoi la revue de littérature se limite au domaine de la construction.

2.5.2 Les journaux de chantier

En se focalisant plus précisément sur les journaux de chantier, la lecture des différents articles permet de faire ressortir le contexte actuel de la recherche sur les journaux de chantier. Certaines organisations utilisent pour les journaux de chantier des systèmes basés sur le Web pour enregistrer les données collectées sur le chantier, par exemple l'U.S. General Services Administration (GSA) ou l'U.S. Department of Transportation (DoT). D'autres, comme la National Aeronautics and Space Administration (NASA) et de nombreuses entreprises utilisent encore les méthodes basées sur le papier pour les journaux de chantier (Park & Cai, 2017). Quelles que soient les méthodes employées, les informations que l'on cherche à mesurer pour suivre le projet sont les activités du projet qui permettent de préciser l'avancée du chantier à un instant donné (tâches accomplies, à la météo, aux équipements et aux travailleurs).

Les données présentes dans les journaux sont souvent qualifiées par les auteurs d'erronées. Pučko et al. (2018) mettent en évidence que la qualité des données et de la mesure est fortement dépendante de l'expérience de l'arpenteur qui collecte les données. Cela conduit donc à des données erronées ou qui ne correspondent pas aux besoins du journal. De plus, les méthodes de collecte manuelles introduisent une subjectivité liée à l'expérience et à l'analyse de la situation réalisée par l'arpenteur dans sa collecte qui peut impacter la qualité des données récoltées. Pučko et al. (2018) soulignent aussi les problèmes liés à la fréquence des journaux de chantier tout comme Hamledari et al. (2017) qui précisent que les équipes projet et les sous-traitants ne produisent pas les rapports de suivi d'avancement à une fréquence suffisante. Le temps nécessaire à la collecte des informations et à l'établissement des journaux de chantier est un autre élément négatif mis en évidence par Omar et Nehdi (2016).

Les fréquences variables de production des journaux de chantier aboutissent à des documents trop peu souvent exploitables ou qui contiennent des données non actuelles, donc sur lesquelles il est impossible de fonder une analyse ou d'élaborer le *As-Built Schedule*. Ce contexte pointe ainsi les dysfonctionnements des journaux de chantier et pousse à approfondir la question de leur contenu

et des méthodes de collecte afin d'assurer la validité des analyses qui en découlent et du *As-Built Schedule*.

2.6 Analyse critique de la littérature

Suite à cette compréhension générale du contexte, une analyse détaillée des articles présentés dans les sections précédentes (Sections 2.5.1 et 2.5.2) s'avère pertinente pour deux thèmes en particulier : les données à collecter et les méthodes de collecte. Ces thèmes sont étudiés en raison de leur impact sur la validité des données contenues dans les journaux qui serviront de base à l'élaboration du *As-Built Schedule*.

Cette analyse critique de la littérature vise donc à faire ressortir les manques de la littérature en ce qui concerne les deux thèmes suivants.

- **Les données à collecter** c'est-à-dire les informations devant figurer dans les journaux de chantier selon les auteurs. Ici, c'est le contenu du journal en lui-même qui est visé. Que contient-il ? Quelles données son utilisation impose-t-elle de collecter ?
- **Les méthodes de collecte** des données figurant dans les articles scientifiques. Quelles sont les technologies permettant la collecte de ces données ?

L'annexe D synthétise la présence de ces éléments dans les articles. Cette synthèse est à l'origine du Tableau 2.2. Celui-ci s'organise en trois colonnes. La première contient les articles étudiés, les deux autres permettent de relever si les articles font mention ou pas des données à collecter et des méthodes de collecte de données des journaux de chantier. La colonne « Données » se décompose en trois parties pour déterminer si les articles précisent toutes les données devant être collecter dans les journaux ou mentionnent seulement un ensemble de thématiques voir uniquement quelques données spécifiques. La colonne « Méthodes de collectes » se découpe en trois parties soulignant la présence ou non dans les articles d'un ensemble de méthodes ou bien de quelques méthodes spécifiques et l'association de méthodes de collecte aux données collectées. Ces deux colonnes (« Données » et « Méthodes de collecte » constituent les deux sujets abordés permettant d'identifier les manques de la littérature. Les deux paragraphes suivants présentent en détail les points de vue exprimés par les différents auteurs en ce qui concerne ces deux thématiques. Autrement dit, les paragraphes suivants détaillent les croix positionnées dans le Tableau 2.2. Pour chacun de ces deux

thèmes étudiés (« Données » et « Méthodes de collecte »), des manques ont été identifiés par les colonnes qui ne contiennent pas de croix et qui ont donc été grisées dans le Tableau 2.2. Ces manques seront aussi exposés dans les paragraphes suivants.

Tableau 2.2 : Revue des sujets abordés par les auteurs

Auteurs, Date	Données			Méthodes de collecte		
	Toutes les données à collecter	Ensemble de thématiques des données	Quelques données spécifiques	Ensemble de méthodes de collecte	Quelques Méthodes spécifiques	Association données-méthodes de collecte
(Pučko et al., 2018)			x	x		
(Park & Cai, 2017)		x			x	
(Hamledari et al., 2017)				x		
(Omar & Nehdi, 2016)				x		
(Isaac & Navon, 2012)				x		
(Hegazy et al., 2005)		x				

En ce qui concerne les données, les journaux de chantier doivent rassembler diverses informations puisque leur utilisation contribue à plusieurs objectifs. Ils doivent ainsi contenir des données sur les méthodes de travail, les coûts du projet, le travail accompli tout au long du projet et des informations relatives aux enjeux de sécurité et de qualité (Hegazy et al., 2005). Selon Isaac et Navon (2012), les données présentes dans les journaux de chantier devraient être utilisées par l'équipe de management du projet pour le suivi et le contrôle du projet. Hegazy et al. (2005) précisent que le journal devient alors un document de base dans l'analyse : de l'utilisation des ressources humaines et matérielles, des tâches accomplies, de la vérification de la mise en place des demandes de changement ainsi que l'analyse de tout type de retards. Hegazy et al. (2005) sont les seuls à véritablement exposer les différentes entités des journaux de chantier, et non uniquement des données générales nécessaires au suivi de projet. Ces entités sont : les demandes de changement, les inspections, les accidents, la météo, les ressources humaines, les équipements, les livraisons de matériaux et le travail accompli. Park et Cai (2017) ont mené une étude sur différentes organisations dans laquelle ils recensent les éléments figurant dans les journaux de chantier.

Aucune des organisations ne présente un journal de chantier contenant l'ensemble des éléments recensés et chacune d'entre elles rassemble des éléments différents. Seuls quatre éléments sont communément enregistrés : les activités du jour, les informations sur le travail réalisé, les équipements utilisés et la météo. Cela démontre qu'il n'existe pas de modèles présentant l'ensemble du contenu attendu dans un journal de chantier qui semble faire consensus au niveau de la littérature. Ainsi, si des entités ou des données sont parfois mentionnées par les auteurs comme devant figurer dans les journaux de chantier, aucun article n'expose précisément toutes les données nécessaires au contenu du document comme le montre la revue des sujets abordés par les auteurs (Tableau 2.2, colonne vide). Ainsi, il y a un premier manque dans la littérature scientifique causé par l'absence de modèle de données détaillant précisément les données devant être collectées sur le site de construction et incorporées dans les journaux de chantier.

La collecte des données contribuant au suivi des projets est une question centrale chez plusieurs auteurs. Les méthodes de collecte peuvent être automatiques, manuelles ou combiner les deux (Isaac & Navon, 2012). Plusieurs auteurs mentionnent des technologies associées à la collecte des données notamment les numérisations laser, les techniques de radiofréquence, les applications à bande ultra-large, les GPS et les réseaux de capteurs sans fil (Pučko et al., 2018). Les différentes applications technologiques existantes et notamment celles liées à l'Industrie 4.0 et employées de nos jours sont donc recensées par les auteurs (Tableau 2.2). Cependant, si ces applications sont mentionnées, elles ne sont pas directement reliées aux données qu'elles collectent dans le cadre des journaux de chantier. Autrement dit, il y a un deuxième manque dans la littérature scientifique causé par l'absence de connexion entre les applications technologiques de l'Industrie 4.0 et les données collectées dans les journaux de chantier.

Les deux manques dans la littérature scientifique n'encouragent pas la conformité des données contenues dans les journaux de chantier et donc la fiabilité du *As-Built Schedule*.

L'absence d'articles précisant les données devant être collectées ne facilite pas la génération de journaux de chantier pouvant servir de base complète en vue de l'élaboration *As-Built Schedule*. L'absence de précision sur les données rend leur collecte plus complexe, car certaines données non nécessaires peuvent être collectées et inversement.

De même, l'absence d'association avec les méthodes de collecte de l'Industrie 4.0 et les données collectées ne facilite pas l'élaboration automatique du *As-Built Schedule* malgré l'existence des

applications technologiques. La collection non automatisée rend certaines données non valides temporellement et donc cause une analyse erronée dans le sens où elle n'est plus en accord avec la réalité du site de construction, mais se retrouve dépassée.

2.7 Conclusion

Après avoir mis en contexte la recherche, l'analyse critique de la littérature a permis de mettre en évidence deux manques de la recherche scientifique dans le domaine des journaux de chantier : l'absence de modèle de données détaillant le contenu à collecter dans les journaux de chantier et l'absence de connexion entre les applications technologiques 4.0 de collecte et les données collectées des journaux de chantier. Ces manques concernent des éléments ayant un impact sur la qualité des données contenues dans les journaux de chantier du point de vue de l'élaboration du *As-Built Schedule* et constituent donc une opportunité pour ce projet de recherche. Dans le contexte de l'Industrie 4.0, ces manques nous amènent à nous intéresser à l'élaboration automatique du *As-Built Schedule* en collectant les données juste nécessaires via des méthodes de collecte 4.0. Le chapitre suivant posera les objectifs spécifiques de recherche ainsi que la méthodologie de recherche.

CHAPITRE 3 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

3.1 Introduction

Ce chapitre vise à présenter les objectifs du projet et proposer une démarche méthodologique permettant de répondre à la question de la recherche. Cette question de recherche est présentée à la Section 3.2 et découlent des manques issus de la revue de la littérature.

3.2 Objectifs de recherche

La Section 2.5.2, a mis en évidence les inexactitudes possibles liées aux données divulguées à des fréquences variables dans les journaux de chantier. Ces données imprécises nuisent à la qualité du *As-Built Schedule* élaboré en conséquence et donc à l'ensemble du processus de suivi de projet. L'analyse critique de la littérature a soulevé deux manques impactant la validité des données présentes dans les journaux de chantier. D'une part, l'absence de modèle de contenu des journaux de chantier ne facilite pas l'élaboration de journaux contenant les données juste nécessaires à la génération du *As-Built Schedule*. D'autre part, l'absence de lien entre les méthodes de collecte issues de l'Industrie 4.0 de collecte et les données collectées au sein des journaux de chantier aboutit à l'utilisation de données temporellement dépassées. Ces manques conduisent à s'interroger sur l'apport possible des concepts de l'Industrie 4.0 face à des lacunes liées à des questions d'automatisation et de temps réel. Ces deux constats mènent ainsi à la question de recherche suivante dans le cadre du suivi des projets de construction :

Comment générer automatiquement le As-Built Schedule à l'aide des applications technologiques de collecte de données issues de l'Industrie 4.0 ?

La revue de littérature a démontré qu'une méthode pour l'élaboration du *As-Built Schedule* s'effectue par récupération des données présentes dans les journaux de chantier (Section 2.3). Au travers de cette question de recherche une question se pose : quelles données faut-il collecter et comment les collecter ? Un premier objectif spécifique de recherche découle donc de la spécification des données et des méthodes de collecte nécessaires à la construction des journaux de chantier. Cet objectif est axé sur la conception d'un modèle de données des journaux de chantier.

Le deuxième objectif est centré sur le développement d'une méthodologie d'implantation du modèle et de son application dans le contexte propre au partenaire industriel. Ainsi, les travaux de recherche seront axés sur les deux objectifs suivants :

Objectif n° 1 : Concevoir un modèle consolidé de données des journaux de chantier intégrant les applications technologiques 4.0 permettant leur collecte.

Objectif n° 2 : Développer une méthodologie d'implantation du modèle.

3.3 Démarche proposée

La démarche de ce projet de recherche suit la méthodologie de recherche *Design Research Methodology* (DRM), comme illustré à la Figure 3.1. Le choix de cette méthodologie décrite par Blessing et Chakrabarti (2009) repose sur le fait qu'elle ne nécessite pas l'implantation complète contrairement à d'autres méthodes qui s'appuient sur l'implantation pour évaluer la validité des résultats. En effet, une implantation comme dans le cas d'une recherche-action ou une recherche intervention nécessite la capacité (habilité, temps, ressources...) du partenaire industriel à réaliser cette implantation. D'où l'intérêt de l'approche DRM qui reste qualitative et permet de développer des outils ou des artefacts appliqués tout en évitant les difficultés liées à une implantation chez un partenaire. Cette méthodologie est mixte, en incluant des phases d'études et des phases expérimentales. Elle alterne donc entre théorie et pratique, entre études descriptives et études prescriptives. Elle permet de structurer rigoureusement le déroulement de la recherche et reste pertinente à l'étude de cas industriels, le terme *Design* prenant ici un sens générique. Si elle est décrite en 4 étapes (Figure 3.1), la méthodologie DRM ne doit pas être considérée comme une méthode linéaire, elle est au contraire flexible et peut comporter plusieurs boucles d'itérations (Blessing & Chakrabarti, 2009).

Dans le cas de ce projet de recherche, les étapes de la méthodologie DRM constituent les chapitres 2, 4, 5 et 6 du mémoire. La Figure 3.1 présente la correspondance entre ces chapitres et

les étapes de la méthodologie DRM, une itération est effectuée au Chapitre 5. Les sections suivantes détaillent les étapes de la démarche.

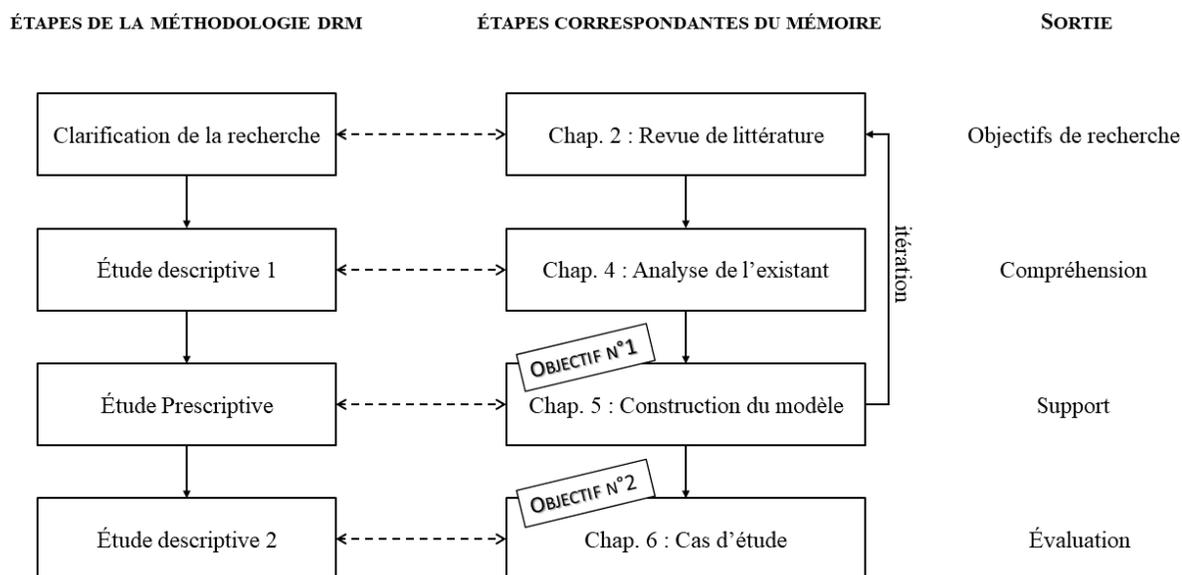


Figure 3.1 : Application de la démarche DRM au projet de recherche

3.3.1 L'analyse de l'existant

La deuxième étape de la démarche méthodologique (Figure 3.1) est une analyse de l'existant. Cette analyse permet de préciser les besoins et d'améliorer la compréhension de la situation après la revue de littérature, avant de passer à l'élaboration du modèle. Le modèle de données devra donc tenir compte des besoins soulevés par cette analyse de processus. L'analyse de l'existant présentée au Chapitre 4 repose sur une cartographie des processus en situation réelle. La technique de cartographie des processus est une technique utilisée en réingénierie des processus au cours de l'étape de diagnostic, comme le montre Kettinger, Teng et Guha (1997). Il s'agit d'une technique de représentation commune qui aide à documenter les processus existants pour mener une réingénierie. Documenter les processus permet de mieux les connaître et donc assure une meilleure

compréhension de l'existant d'où le choix méthodologique de réaliser une cartographie des processus dans le cadre de cette deuxième étape de la méthodologie DRM.

Cette analyse de processus s'accompagne d'un journal de chantier actuel du partenaire industriel où figurent les données devant être recueillies et entrées manuellement dans le journal (Section 4.4). Ce journal précise les besoins actuels du partenaire industriel et permettra de s'assurer qu'aucune des informations figurant actuellement dans le journal n'est omise lors de la construction du modèle de données.

Pour effectuer cette analyse de l'existant, le processus de suivi de projet a donc été cartographié dans le cadre d'un projet spécifique chez le partenaire industriel (Section 4.2). Cette cartographie du projet a été réalisée après une session d'entrevues auprès de différents membres de l'équipe projet (chef de projet, adjoint, planificateur, coordinateur de chantier...) sur le site de construction et a été suivie d'une validation avec l'équipe. L'analyse de cette cartographie s'est ensuite déroulée en trois étapes : une analyse de la valeur, une analyse de la structure et enfin une analyse causale issue des deux analyses précédentes (Rivard, 2000) (Section 4.3).

L'analyse de la valeur réalisée sur le processus cartographié suit la méthodologie de la Figure 3.2, elle permet d'identifier les activités du processus sans valeur ajoutée.

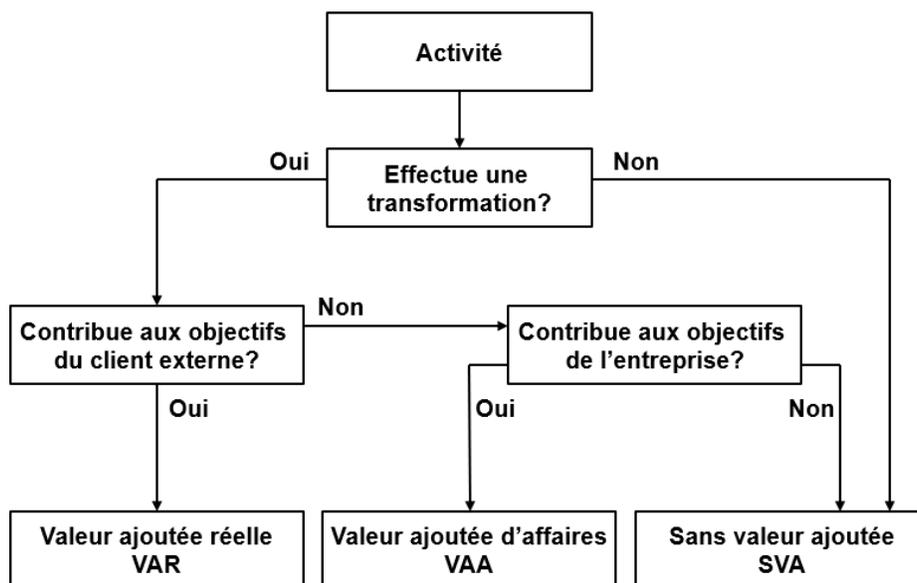


Figure 3.2 : Méthodologie de l'analyse de la valeur

L'analyse de la structure réalisée sur le processus cartographié a pour but d'identifier les constats suivants sur un processus : distinguer les activités sans entrées (*input*), repérer les duplications de données ainsi que les données identiques issues de différentes activités et identifier les boucles de rétroaction.

Pour chacune des deux analyses précédentes, une attention particulière est accordée aux problèmes liés aux journaux de chantier et aux éléments en lien avec les deux manques issus de la revue de littérature : l'absence d'articles détaillant précisément les données devant être collectées et l'absence d'association entre ces données et les méthodes de collecte issues de l'Industrie 4.0 (Section 2.6). L'objectif de l'analyse causale est ensuite de visualiser et de lier l'ensemble des problèmes identifiés dans l'analyse de la structure et de la valeur. Au départ, il s'agit de déterminer les conséquences principales pour par la suite énumérer les causes à partir de ces conséquences puis de trouver les causes issues des causes précédentes et ainsi de suite. Le processus s'arrête lorsque l'information est suffisante pour identifier des actions correctives à partir des causes fondamentales. En remontant à ces causes fondamentales, la compréhension des besoins du partenaire industriel est améliorée. Cette compréhension de la situation existante vient s'ajouter à la première étape de la démarche DRM avant de passer à l'élaboration du modèle.

3.3.2 Élaboration du modèle

La troisième étape de la démarche consiste en l'élaboration du support reflétant la situation désirée. Dans le cadre de ce projet de recherche, il s'agit de la construction du modèle de données des journaux de chantier présenté au Chapitre 5. L'avantage de la méthode DRM est qu'elle est flexible et peut contenir des boucles d'itérations. La construction du modèle de données fait donc appel à la revue de littérature et constitue en ce sens une itération dans la démarche. Cette étape vise à répondre au premier objectif de recherche.

L'état de l'art présenté au Chapitre 2 a permis de mettre en évidence les problèmes liés aux journaux de chantier auxquels le modèle devra répondre. Parmi ces problèmes figure le contenu des journaux. Aucun auteur n'exprime précisément quelles données doivent être contenues dans les journaux de chantier. Cependant, parmi les auteurs, seul Hegazy fait mention des entités devant être présentes dans un journal de chantier (Hegazy et al., 2005). Ces entités serviront donc de base pour établir le modèle de données.

Le deuxième manque identifié dans la revue de littérature soulève l'absence de lien entre les méthodes de collecte de données 4.0 et les données des journaux de chantier. Une recherche des applications technologiques de collecte 4.0 est donc nécessaire. L'importance du BIM⁶ dans l'émergence de l'Industrie 4.0 dans le secteur de la construction a conduit à inclure cet élément dans la phrase de recherche permettant d'identifier les applications technologiques de collecte issues de la Construction 4.0. Cette recherche est réalisée à l'aide de la base de données SCOPUS. La phrase de recherche se découpe en trois parties :

- Les premiers mots-clés permettent de cibler le secteur de la construction.
- Une deuxième partie est constituée de mots-clés basés sur le Building Information Modelling (BIM). C'est pourquoi l'augmentation du nombre de publications scientifiques à ce sujet dans les années 2004-2009 (voir Annexe A) a conduit à limiter la recherche à partir de ces années-là.
- Les mots-clés de la troisième partie se focalisent sur les technologies de l'Industrie 4.0.

Le tableau suivant résume les concepts et les mots clés associés présents dans la phrase de recherche (voir annexe B).

⁶ Comme mentionné à la Section 2.2, le BIM fait partie du « Digital building » (bâtiment numérique) qui est considéré comme l'ensemble des informations qui définissent le bâtiment avec la possibilité d'une représentation virtuelle reflétant le cycle de vie de celui-ci (Watson, 2011). Le terme BIM peut désigner à la fois le modèle numérique de partage d'information et la méthodologie de gestion de l'information. Si au départ il était avant tout destiné à permettre l'utilisation de modèles d'information partagés, aujourd'hui son rôle s'est étendu au management de la construction (Isikdag, 2015). Eastman, Teicholz, Sacks et Liston (2011) ont défini le BIM comme une technologie de modélisation et l'ensemble des processus connexes pour produire, communiquer et analyser les modèles de bâtiment. Il est utilisé dans l'analyse des données de suivi des travaux, par une comparaison entre le modèle prévu (BIM) et le modèle reconstitué à partir des données collectées sur le site (Eastman et al., 2011). L'implantation de l'Industrie 4.0 dans le secteur de la construction est liée au BIM, comme le montre l'analyse quantitative effectuée par Oesterreich et Teuteberg (2016) dans laquelle le BIM est l'élément le plus cité parmi les publications de l'enquête.

Tableau 3.1 : Concepts et mots clés associés à la recherche des applications technologiques 4.0 de collecte de données

Concepts	Secteur de la construction	BIM	Technologies de l'Industrie 4.0
Mots-clés associés	construct* indus* indus* construct* build* indus* indus* build* innovat* construct* innovat* build* construct* site* building system* construction sector*	BIM building information model*	indus* 4.0 build* 4.0 techno* 4.0 revolution* 4.0 construct* 4.0 digiti* digitali* digit* construct* digit* build*

Parmi les 290 publications issues de la recherche scientifique, les applications technologiques de collecte de données issues de la Construction 4.0 ont été extraites. Pour cela, une lecture de chaque article a été effectuée puis les technologies exposées ont été recensées. Suite au recensement des technologies, leurs applications ont été détaillées. Enfin, celles pouvant être destinées à recueillir les données contenues dans les entités du journal de chantier ont été incluses dans le modèle de données.

3.3.3 Démarche d'implantation et cas d'étude

La dernière étape de la méthodologie DRM est une évaluation d'application du support afin d'évaluer l'impact du support et sa capacité à mettre en application la situation désirée. Cette étape constitue la deuxième étude empirique de la démarche DRM, elle est détaillée pour ce projet de recherche au Chapitre 6 et vise à répondre au deuxième objectif du projet de recherche. Cette section présente d'abord une démarche d'implantation progressive générale basée s'appuyant sur le modèle de données. Cette démarche est ensuite testée dans un cas d'application précis, celui du partenaire industriel. Cette application s'appuie sur une étude de temps menée par un consultant chez le partenaire industriel.

3.4 Conclusion

Ce chapitre a permis d'exposer la méthodologie de recherche qui est basée sur une approche DRM. Les chapitres suivants présentent chacune des étapes de cette méthodologie. L'analyse de l'existant permettra d'abord d'améliorer la compréhension de la situation existante chez le partenaire industriel. Elle sera suivie de la construction du modèle de données permettant de répondre à l'objectif numéro 1 du projet de recherche. Enfin, le cas d'étude constituera un exemple d'application du modèle proposé en proposant une démarche d'implantation et en l'appliquant dans le contexte du partenaire industriel afin de répondre au deuxième objectif de la recherche.

CHAPITRE 4 ANALYSE DE L'EXISTANT

4.1 Introduction

Cette section a pour objectif de préciser les besoins des industriels afin d'améliorer la compréhension du sujet de recherche. Ce chapitre constitue la deuxième étape de la démarche DRM qui consiste en une étude descriptive basée sur une analyse de données empiriques (voir Section 193.3.1). La recherche étant menée en partenariat industriel, le processus de suivi a été analysé (analyse de valeur, de structure et causale) suite à une cartographie d'un projet mené par le partenaire. L'objectif recherché dans ce chapitre est de comprendre la réalité des processus de suivi de chantier et d'identifier les problèmes rencontrés.

4.2 Cartographie du processus de suivi

Le processus de suivi d'avancement du projet (voir Figure 4.1 et Annexe C pour le détail, incluant la signification des indices) fut cartographié à partir de l'observation d'un projet spécifique chez le partenaire industriel. Cette observation s'est faite sur le chantier via des entretiens avec l'ensemble des acteurs de l'équipe projet et notamment le surintendant, l'adjoint et le gérant de projet. Une fois le processus cartographié, une validation de celui-ci a été effectuée par un retour auprès de l'équipe projet. Plusieurs acteurs sont impliqués au cœur de ce processus dont le surintendant du chantier. Il a pour mission la visualisation sur le site de construction de l'avancement des travaux ainsi que la création du journal de chantier. Comme indiqué à l'Annexe C, l'activité de visualisation du progrès du chantier est réalisée par déambulation quotidienne sur le chantier. Le surintendant transmet ensuite l'information récoltée manuellement au chef de chantier, de manière informelle.

Ce processus rejoint donc le constat de la revue de littérature (Section 2.6) selon lequel la qualité des données récoltées dépend de l'expérience de celui qui les récolte manuellement. C'est le cas chez le partenaire industriel où la mesure de l'avancement repose sur la déambulation du seul surintendant sur le site de construction (Activité 1 du processus). Cette mesure menant ensuite à la création du journal de chantier, ce dernier est dépendant de la collecte de données manuelle effectuée par le surintendant.

Contrairement aux problèmes d'inconstance⁷ soulevés dans la revue de littérature (Section 2.6) au sujet de la fréquence de parution des journaux de chantier, la fréquence est constante dans le processus de suivi cartographié. Malgré cette constance, il est possible de se demander si la fréquence est suffisante. La fréquence est fortement dépendante du mode de collecte des données qui sur le projet étudié est manuel et nécessite la déambulation du surintendant sur le chantier.

⁷ Notons ici la distinction entre les collectes de données inconstantes ou incomplètes et les données erronées. L'inconstance est liée à la fréquence de collecte des données et donc à leur validité temporelle notamment au moment de leur analyse. Les données incomplètes résultent d'un manque au niveau de la collecte tandis que les données considérées comme erronées sont entachées d'une erreur et sont inexactes.

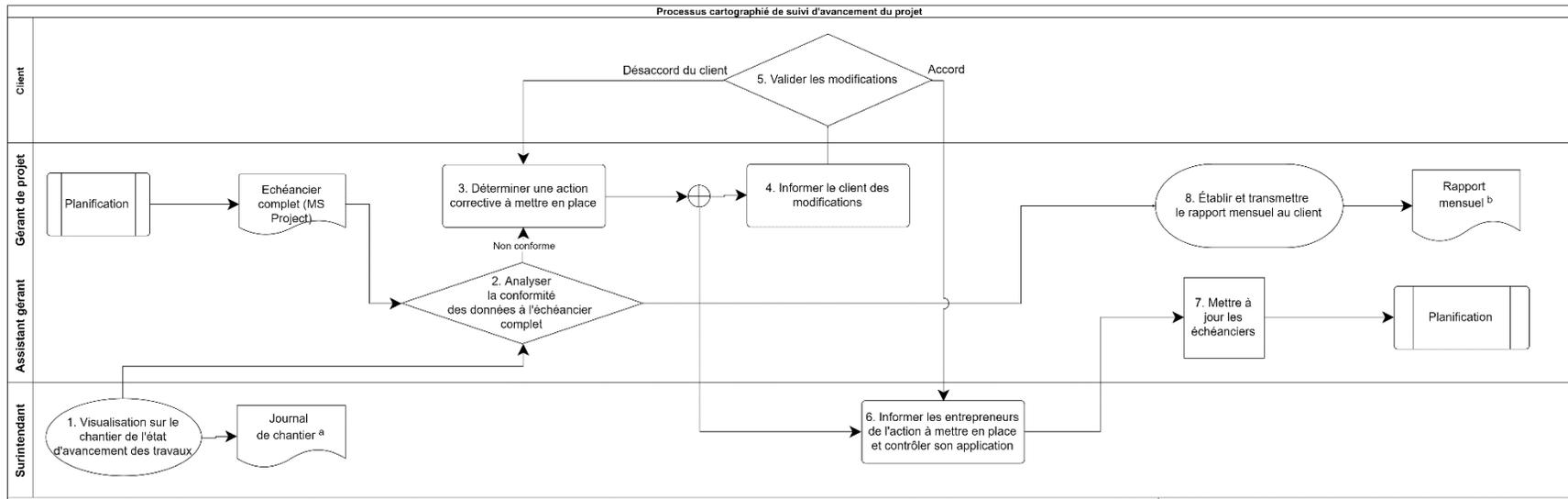


Figure 4.1 : Processus cartographié de suivi d'avancement du projet

4.3 Analyse causale

Dans cette section, une analyse de la valeur est d'abord menée. De cette analyse découlent trois problèmes (problèmes A, B et C) auxquels s'ajoute un quatrième problème tiré de l'analyse de la structure (problème D). Ces quatre problèmes seront utilisés comme base pour l'analyse causale afin de faire ressortir les besoins du partenaire industriel à travers cinq causes primaires (causes a, b,c,d,e).

4.3.1 Analyse de la valeur

L'analyse de la valeur du processus de suivi cartographié a été conduite conformément à la méthodologie exposée Figure 3.2. Toutes les activités du processus (Annexe C) ont été classées dans le Tableau 4.1 en trois catégories : Sans Valeur Ajoutée (SVA), Valeur Ajouté d'Affaires (VAA) et Valeur Ajoutée Réelle (VAR).

Tableau 4.1: Analyse de la valeur du processus cartographié

Activité	SVA	VAA	VAR
1. Visualisation sur le chantier de l'état d'avancement des travaux	X		
2. Analyser la conformité des données à l'échéancier complet			X
3. Déterminer une action corrective à mettre en place			X
4. Informer le client des modifications		X	
5. Valider les modifications	X		
6. Informer les entrepreneurs de l'action à mettre en place et contrôler son application.	X		
7. Mettre à jour les échéanciers			X
8. Établir et transmettre le rapport mensuel au client		X	

Activité 1

L'activité 1 est l'activité destinée à récolter les données nécessaires au suivi de l'avancement du chantier, données qui seront ensuite incorporées au journal de chantier. Elle est sans valeur ajoutée, car c'est le surintendant qui se déplace sur le site pour récolter les informations, il n'y a pas d'analyse des informations à ce stade. Seul le support de l'information change, mais son contenu reste identique, il n'y a donc pas de transformation⁸.

Problème soulevé A :

Le problème soulevé est une génération de document sans valeur ajoutée.

Activité 5

L'activité 5 est une activité de validation des modifications, elle nécessite de refaire des tâches déjà effectuées précédemment.

Problème soulevé B :

Le problème soulevé est une répétition de tâches.

Activité 6

L'activité 6 avec le contrôle de l'application est une activité sans valeur ajoutée dont les données sont récoltées manuellement et devraient figurer dans les journaux de chantier en tant que suivi des tâches accomplies.

Problème soulevé C :

Le problème identifié suite à ce constat est un problème de transfert des informations avec les parties prenantes.

⁸ Contrairement à des activités concernant la qualité. En effet, les activités liées à la qualité ont en données d'entrée les données collectées et en données de sortie les données vérifiées, il y a donc eu une transformation.

4.3.2 Analyse de la structure

Les trois problèmes soulevés par l'analyse de la valeur s'ajoutent à ceux soulevés par l'analyse de la structure menée selon la méthodologie exposée à la Section 3.3.1. Deux constats sont en effet ressortis de cette analyse.

D'abord, il y a une boucle de rétroaction au niveau des activités 3, 4 et 5. Le problème identifié suite à ce constat est une répétition de tâches déjà effectuées (même problème que pour l'activité 5 dans l'analyse de la valeur, **problème soulevé B**). Ensuite, il y a des données identiques provenant d'activités différentes. En effet, des données du journal de chantier figurent dans les rapports mensuels, mais selon le processus elles ne proviennent pas directement du journal.

Problème soulevé D :

Le problème issu de ce constat est une duplication de gestion de projet.

Les analyses de la valeur et de structure précédentes ont mis en évidence quatre problèmes. Ces problèmes vont servir de base à l'analyse causale qui est réalisée selon la méthodologie présentée à la Section 3.3.1.

4.3.3 Analyse causale

Les quatre problèmes (A, B, C, D) issus de l'analyse de la valeur et de l'analyse du processus permettent de remonter à cinq causes primaires (côté droit de la Figure 4.2: a, b, c, d, e). Pour remonter à ces causes, la question « pourquoi » est posée et la réponse dépend du contexte du problème au sein du processus cartographié. Parmi ces cinq causes, la non-collecte des données en temps réel (b) et la collecte de mauvaises données (c) sont les deux causes impactant principalement la visualisation de l'état d'avancement des travaux. Ces causes sont à l'origine de journaux de chantier erronés ou temporellement dépassés qui ne peuvent pas servir de base de génération du *As-Built Schedule*. Comme le montre la Figure 4.2, ces deux causes primaires proviennent de données de mauvaise qualité soit en termes de temporalité (données non actualisées) soit de contenu (données non pertinentes). C'est pourquoi cette analyse causale montre qu'il est indispensable de connaître quelles données collecter et comment les collecter automatiquement. Ce questionnement est justement celui soulevé par les manques mis en évidence lors de l'analyse critique de la littérature (Section 2.6).

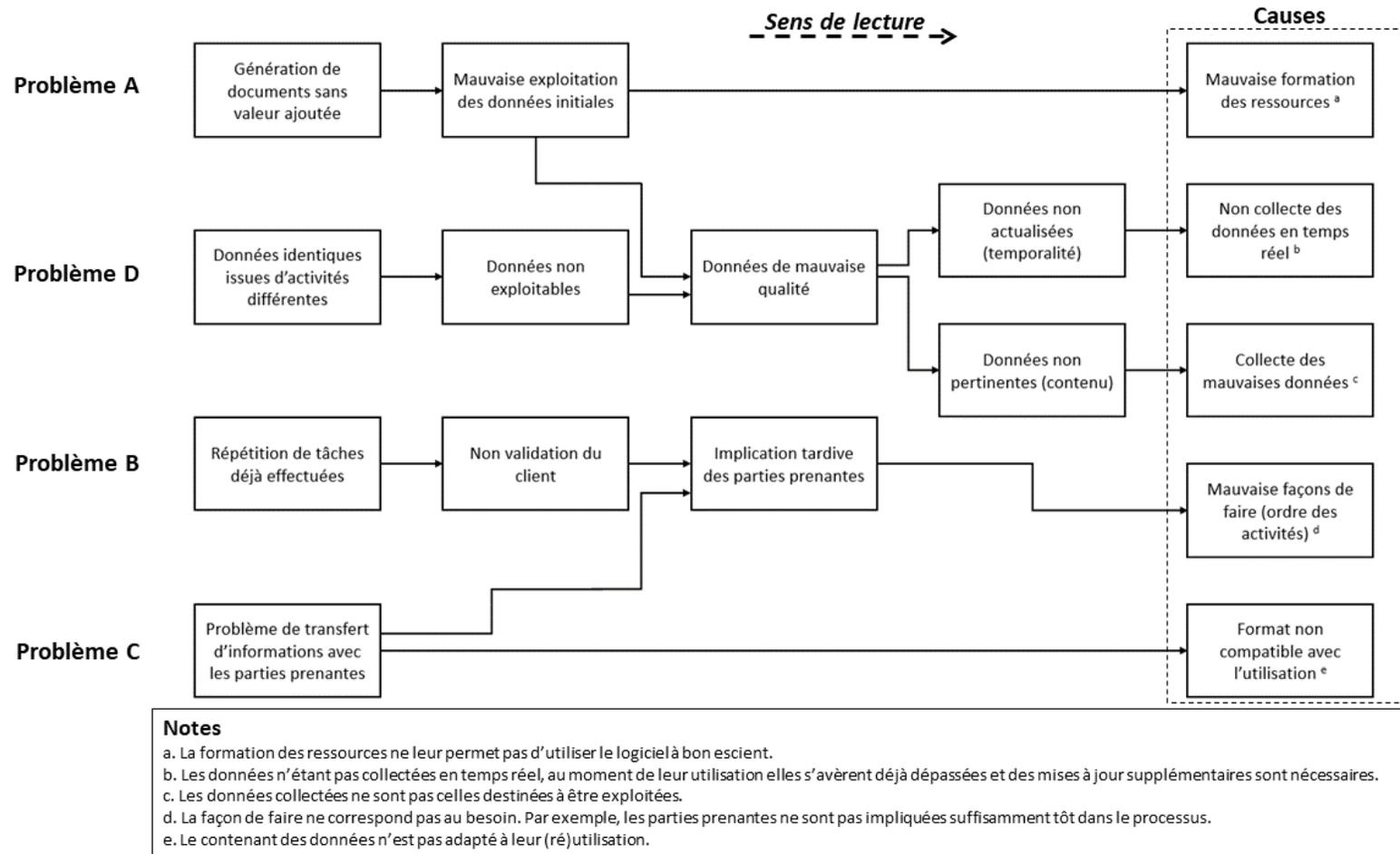


Figure 4.2: Analyse causale du processus cartographié

4.4 Journal de chantier du partenaire

Les journaux de chantier du partenaire industriel sont basés sur un gabarit. La fréquence de production du journal est hebdomadaire. Le journal contient des données sur la météo (température, précipitations, ciel et vent), les activités du jour, les équipements, les visiteurs, les livraisons, les faits saillants en matière de santé et de sécurité, les heures effectuées par des sous-traitants. La Figure 4.3 schématise anonymement le gabarit du journal de chantier du partenaire. Il regroupe ainsi les principaux éléments mentionnés par Hegazy et al. (2005).

ENTREPRISE	PROJET Journal N° ...	Date
Météo Température & Précipitations		
Activités du jour		
Equipements		
Visiteurs		
Livraisons		
Faits saillants (Santé et Sécurité)		
Compagnie	Sous-traitants Nb employés	Heures

Figure 4.3 : Gabarit anonymisé du journal de chantier du partenaire

Les journaux du partenaire ne servent actuellement pas à la génération du *As-Built Schedule* et l'analyse des retards d'après la cartographie du processus (voir Annexe C). Si le contenu des journaux de chantier du partenaire semble être pertinent, l'analyse causale réalisée a soulevé des dysfonctionnements. Sur les deux causes primaires exposées par l'analyse de l'existant (non-collecte des données en temps réel et collecte de mauvaises données), la présence d'un gabarit conforte le besoin du partenaire industriel en termes de méthodes de collecte et l'apport des méthodes liées à l'Industrie 4.0 et au temps réel. Le gabarit pourra néanmoins être comparé au modèle de données en termes de contenu afin de s'assurer de sa conformité.

Ce gabarit met en évidence les besoins du partenaire quant à l'implantation de méthodes de collecte de données issues de l'Industrie 4.0 afin d'améliorer le processus de suivi des projets. Le cas

d'étude mené au Chapitre 6 permettra de proposer une réponse à ce besoin en proposant une démarche d'implantation des applications technologiques de collecte, démarche basée sur l'utilisation du modèle de données présenté au Chapitre 5.

4.5 Conclusion

L'analyse de l'existant présente donc des problématiques identiques à celles de la revue critique de la littérature (Section 2.6). Cette analyse a mis en évidence les besoins des industriels vis-à-vis du projet de recherche. D'une part, le besoin d'élaboration du modèle de données est mis en évidence par l'analyse causale réalisée sur le processus du partenaire industriel. D'autre part, les problèmes de temporalité aboutissent à des données erronées sur lesquelles il est impossible de fonder une analyse de retards et donc de générer un *As-Built Schedule* fidèle à la réalité du chantier. Cette analyse de l'existant permet donc de cerner les besoins des industriels en termes de journaux de chantier et de collecte des données. L'amélioration de la compréhension de la situation existante va permettre de construire, dans le chapitre suivant, un support conformément à la méthodologie DRM.

Les besoins des industriels et les manques mis en évidence dans la revue de littérature concordent vers la création d'un modèle de données permettant de répondre au premier objectif de ce projet de recherche. Le chapitre suivant est donc consacré à la construction de ce modèle de données des journaux de chantier.

CHAPITRE 5 MODÈLE DE DONNÉES

5.1 Introduction

Cette section présente l'élaboration du modèle de données des journaux de chantier et répond à l'objectif numéro 1 du projet de recherche. Elle détaille et présente les résultats de la troisième étape de la méthodologie DRM. Cette étape consiste en la création du support, ici le modèle de données, permettant d'améliorer la situation existante détaillée précédemment par l'analyse de l'existant et la revue de littérature. Tout d'abord, la Section 5.2 présente une étude sur le contenu des journaux de chantier afin de déterminer quelles données doivent y figurer (Section 5.2.1) et comment les collecter grâce à des applications technologiques issues de l'Industrie 4.0 (Section 5.2.2). Ces deux sections sont destinées à préciser les informations contenues dans le modèle de données dans le but de répondre au premier objectif du projet de recherche (Section 3.2). Ce chapitre a nécessité une itération en conformité avec la démarche DRM, car il constitue un retour à la revue de littérature pour déterminer le contenu du modèle de données. À partir de ces sections, le modèle de données des journaux de chantier avec intégration des applications technologiques du 4.0 est présenté à la Section 5.3.

5.2 Le contenu du modèle de données des journaux de chantier

Cette section vise à expliciter les éléments qui seront présents dans le modèle. Le modèle de données des journaux de chantier est constitué des deux éléments suivants : les données contenues dans les journaux de chantier et les applications technologiques de l'Industrie 4.0 permettant la collecte de ces données.

5.2.1 Identification des données

La revue de littérature a démontré que peu de publications scientifiques s'intéressent au contenu des journaux de chantier. Les données devant être mentionnées ne sont jamais explicitées dans leur ensemble. Dans la revue de littérature, Hegazy et al. (2005) sont les seuls à se distinguer des autres auteurs sur ce sujet. En effet, ils exposent des sous-ensembles de données qui doivent figurer dans les journaux de chantier.

Ces sous-ensembles constitueront donc les différentes entités du modèle de données. Il sera donc composé de données portant sur :

- Les demandes de changement.
- Les inspections.
- Les accidents.
- La météo.
- Le personnel.
- L'utilisation des ressources (équipements).
- Les livraisons de matériaux.
- Les tâches accomplies.

Ces huit entités constituent le socle du modèle. Sur ces huit entités, une entité est influencée par les autres, il s'agit des « tâches accomplies ». Cette entité sera donc placée au centre du modèle puisqu'elle représente les progrès accomplis et les activités effectuées sur le chantier donc l'essentiel du *As-Built Schedule*. Les autres entités sont indispensables à la compréhension du contexte dans lequel se sont déroulés les travaux, car elles peuvent impacter l'environnement de construction et donc l'avancée du chantier. Ces entités permettent donc de réaliser une analyse détaillée des délais tout au long du suivi du projet et, ainsi, comprendre plusieurs des causes de retard. De plus, elles sont indispensables pour recréer le contexte des travaux lors d'une analyse des réclamations.

Les données contenues dans les entités de « météo » et « demandes de changement » pourraient être collectées respectivement sur des sites web et sur l'Entreprise Ressource Planning (ERP), et ce en temps réel. Les données sur les « livraisons des matériaux » pourraient aussi être obtenues à partir de l'ERP même si les données d'allocation des ressources livrées peuvent être obtenues par une méthode de collecte issue de l'Industrie 4.0 (Section 5.2.2).

Une comparaison⁹. entre le contenu devant figurer dans les journaux et le gabarit du partenaire (Section 4.4) montre que les ensembles de données se retrouvent dans le gabarit du journal de chantier du partenaire à l'exception des demandes de changements. De plus, les données concernant le personnel ne sont pas aussi détaillées dans le gabarit où seules les entreprises sous-traitantes sont mentionnées.

Park et Cai (2017) mentionnent dans leur article les pratiques de plusieurs organisations sur les journaux de chantier. Il ne s'agit pas de données devant y figurer, mais de données y figurant d'après l'étude. Pour rappel, les éléments identifiés par l'étude parmi les journaux de chantier étudiés sont : les activités du jour, les caucus quotidiens, des informations sur la qualité, le travail, les équipements, les accidents, la météo, une description du chantier, la localisation des éléments, les matériaux. Aucun journal étudié ne contenait l'ensemble des informations or celles-ci figurent dans les entités du modèle de données et devraient donc apparaître dans l'ensemble des journaux. Seuls les caucus quotidiens ne sont pas mentionnés dans les entités du modèle. Il faudrait connaître les données récoltées lors de ces caucus, car elles pourraient figurer dans les entités sous une autre forme. De plus, ces données correspondent à un évènement ponctuel sur le chantier et ne représentent donc pas une information à collecter en temps réel.

⁹ Les comparaisons suivantes s'effectuent à partir de la colonne centrale de la Figure 5.1 et deux à deux (d'abord la colonne de droite par rapport à celle du centre puis la colonne de gauche par rapport à celle du centre). Aucun lien ne doit donc être établi directement entre les colonnes de gauche et de droite.

La figure suivante présente la correspondance entre l'étude menée par Park et Cai (2017) et les entités présentées par Hegazy et al. (2005) ainsi que les entités présentes dans le journal de chantier du partenaire.

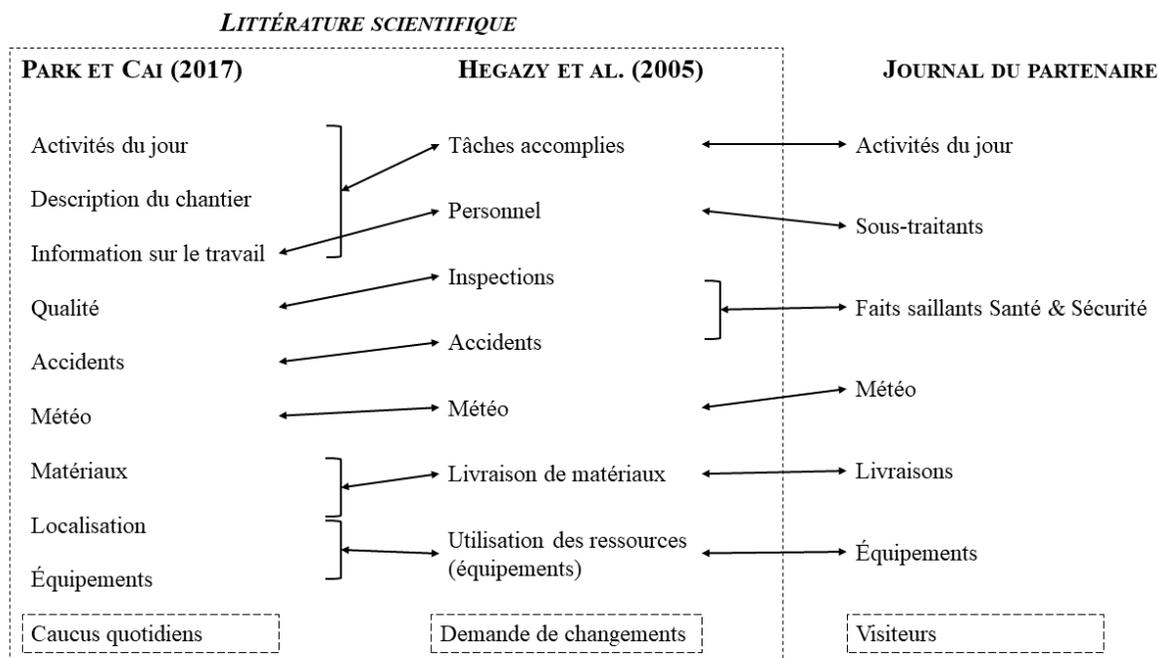


Figure 5.1: Correspondance entre les éléments des journaux de chantier présentés dans les articles

5.2.2 Identification des applications technologiques 4.0

La revue de littérature a mis en évidence une problématique liée aux modes de collecte des données. En effet, les méthodes de collecte sont souvent manuelles, non automatisées, s'effectuent donc à des fréquences variables et comprennent des données erronées ou dépassées.

Les auteurs ont soulevé les problèmes d'exactitude, de subjectivité, de fréquence et de qualité des données causés par des méthodes de collecte pour la plupart du temps manuelles même si de nombreuses technologies peuvent être utilisées. Ces problématiques poussent à s'intéresser à l'apport de l'Industrie 4.0 sur ce type de sujet avec l'implantation du temps réel pouvant se baser sur des méthodes de collecte automatique des données déjà existantes.

L'identification de ces technologies s'est faite selon la méthodologie décrite à la Section 3.3.2. Pour rappel, il s'agit d'une revue systématique de la littérature portant sur le Construction 4.0. Après l'analyse des articles, ceux présentant des méthodes de collecte 4.0 ont été sélectionnés pour

ensuite être ajoutés au modèle de données sous l'entité correspondante et en association avec la donnée de cette entité collectée. Les paragraphes suivants présentent les résultats de cette identification des applications technologiques 4.0 issues de la littérature. Les applications y sont reliées *aux données* et classées selon **les entités** de la Section 5.2.1 auxquelles elles se rattachent (Sections 5.2.2.1, 5.2.2.2, 5.2.2.3 et 5.2.2.4).

5.2.2.1 Les inspections

- *Mesure de la productivité* par Drone associé aux numérisations laser :

Dans la conclusion de l'article portant sur l'analyse documentaire qui montre que l'Industrie 4.0 en est à une étape de transformation du secteur de la construction et replace cette étape dans le contexte historique, Woodhead, Stephenson et Morrey (2018) énumèrent les tendances émergentes. Parmi celles-ci, ils expriment que de nouveaux processus modifient de nos jours les flux de travail en créant plus de valeur grâce aux flux d'informations. Ils donnent alors l'exemple des drones et des scanners laser utilisés pour mesurer les volumes de production, destinés à détecter les problèmes de productivité.

- *Inspections qualité* par Personal Data Assistant (PDA) :

Kim, Y. S., Oh, Cho et Seo (2008) proposent un système informatisé d'inspection de la qualité et de gestion des défauts destiné à collecter des données sur les défauts en temps réel en utilisant des PDA et internet sans fil. Plusieurs types d'inspections sont considérés dans cet article dont les inspections menées par l'équipe projet tout au long du projet. L'utilisation des PDA est prévue pour collecter des informations sur les défauts (types de défauts via une liste de contrôle électronique affichée sur le PDA) et l'état actuel de l'inspection, données qui seront ensuite transmises via internet sans fil.

5.2.2.2 Les accidents

- *Performance sécurité* par Radio Frequence Identification (RFID) :

Au sein de l'analyse documentaire des dispositifs de balayage laser et de modélisation 3D, des modes de prestation et des applications dans le secteur de la construction, Parn et Edwards (2017) s'intéressent aux méthodes de suivi de progrès. Après avoir présenté les avantages et inconvénients des techniques laser telles le LiDAR, ils mentionnent que ces dernières ne sont pas adaptées pour la surveillance de points dynamiques contrairement aux Tags RFID qui permettent par exemple de suivre les performances en matière de sécurité en suivant la localisation des ouvriers et des machines.

- *Suivi en temps réel des accidents* par Radio Frequence Identification (RFID) :

Wu et al. (2010) proposent un système autonome de suivi en temps réel des accidents évités de justesse sur les sites de construction. Ce système utilise la RFID pour le contrôle des accès ainsi que le stockage des données de sécurité (travailleurs, matériel, équipements et matériaux) associée à un réseau sans fil pour la transmission de celles-ci. Le tout serait intégré dans une architecture de réseau de capteurs RFID Zigbee.

- *Surveillance sécurité* par Drone :

Oesterreich et Teuteberg (2016) réalisent une revue systématique de la littérature sur l'industrie 4.0, un état de la pratique et des implications concernant les technologies dans l'industrie de la construction. Ils mentionnent à l'intérieur de cet état de l'art que les drones sont déjà utilisés pour surveiller les sites de construction.

5.2.2.3 Le personnel

- *Personnel sur site, localisation et nombre* par RFID :

Dans son état de l'art sur l'Industrie 4.0, Oesterreich et Teuteberg (2016) présentent les technologies associées au « chantier intelligent » dans le secteur de la construction en référence à « l'usine intelligente » de l'industrie. Parmi ces technologies, ils mentionnent l'utilisation des Tags RFID dans l'objectif de suivre le personnel présent sur le site, connaître le nombre et identifier les employés.

5.2.2.4 L'utilisation des ressources (équipements)

- *Localisation* par une association RFID - GPS :

Dallasega, Rauch et Linder (2018) réalisent une revue systématique de la littérature qui s'intéresse à la supply chain en construction dans le contexte de l'Industrie 4.0. Ils y font référence à une technologie d'association RFID-GPS pour localiser les équipements sur le site de construction. La puce RFID permet d'identifier l'équipement tandis que sa localisation est déterminée par GPS. Cette association est issue d'un article s'intéressant aux systèmes basés sur les RFID associées au GPS dans le but de récolter l'information en temps réel (Sardroud, 2012).

- *État des équipements et Diagnostics* par Réalité augmentée (AR) :

Dans l'article proposant une revue de littérature de l'Industrie 4.0 dans le domaine de la construction, Woodhead et al. (2018) mettent en évidence les technologies utilisées et les tendances émergentes. Ils donnent l'exemple de la réalité augmentée utilisée par les opérateurs dans les diagnostics de l'état de leurs équipements. Le diagnostic est effectué grâce à la réalité augmentée permise par les téléphones intelligents des opérateurs.

Les livraisons de matériaux

- *Allocation des ressources livrées par RFID :*

Sardroud (2012) met en évidence les systèmes utilisant les Tags RFID pour collecter des données en temps réel automatiquement afin d'améliorer le suivi des projets de construction. Parmi les applications mentionnées, les tags RFID permettent l'amélioration du suivi, de la livraison, de la réception et de l'emplacement des matériaux et des composants du chantier de construction.

Les tâches accomplies

- *Avancement en temps réel et pourcentage d'avancement par Drone - GIS :*

L'article de Dallasega et al. (2018) porte sur la supply chain dans le secteur de la construction vis-à-vis de l'Industrie 4.0. Il mentionne des exemples pratiques parmi lesquels « Mascaro Construction » dont l'application technologique associant les technologies de drones et de GIS permet le contrôle de la qualité et le suivi d'avancement du chantier en temps réel.

- *Activités accomplies par LiDAR :*

Randall (2011) met en évidence les applications de la numérisation par balayage laser. Ce type de numérisation est fortement influencée par l'adoption de plus en plus étendue du BIM dans le secteur de la construction et donc par l'émergence de l'Industrie 4.0. Le Flash LADAR est une technologie qui permet de capturer des données en temps réel sur une scène dynamique telle qu'un chantier de construction pour connaître son avancement.

5.3 Modèle de données des journaux de chantier

Les deux sections précédentes permettent de construire le modèle de données des journaux de chantier en déterminant les entités (Section 5.2.1) et les applications technologiques 4.0 (Section 5.2.2) de collecte des données présentes au cœur de ces entités. Il est présenté à la Figure 5.2. Ce modèle permet de répondre à l'objectif de recherche numéro 1 du projet de recherche (Section 3.2). Le modèle comporte huit entités mentionnées à la Section 5.2.1 comme

devant être contenues dans les journaux de chantier. Les huit entités sont représentées par des rectangles, le nom de l'entité étant souligné. Ces entités sont regroupées autour de l'entité centrale représentant les « tâches accomplies », car cette entité est influencée par les autres et représente la base des données à collecter pour élaborer le *As-Built Schedule*. Les applications technologiques issues de l'Industrie 4.0 et identifiées à la Section précédente sont surlignées en jaune et figurent dans le modèle sous le titre de l'entité et à la droite de la donnée qu'elle collecte. Certaines données n'ont pas nécessairement besoin d'être collectées via ces applications, elles sont surlignées en violet, par exemple pour les informations provenant de l'ERP pour les demandes de changements ou de site internet pour la météo. Une référence est associée à chacune des applications technologiques de l'Industrie 4.0. Le détail de ces références figure dans les notes de bas de page du modèle de données. La figure suivante présente le modèle de données des journaux de chantier intégrant les applications technologiques de l'Industrie 4.0.

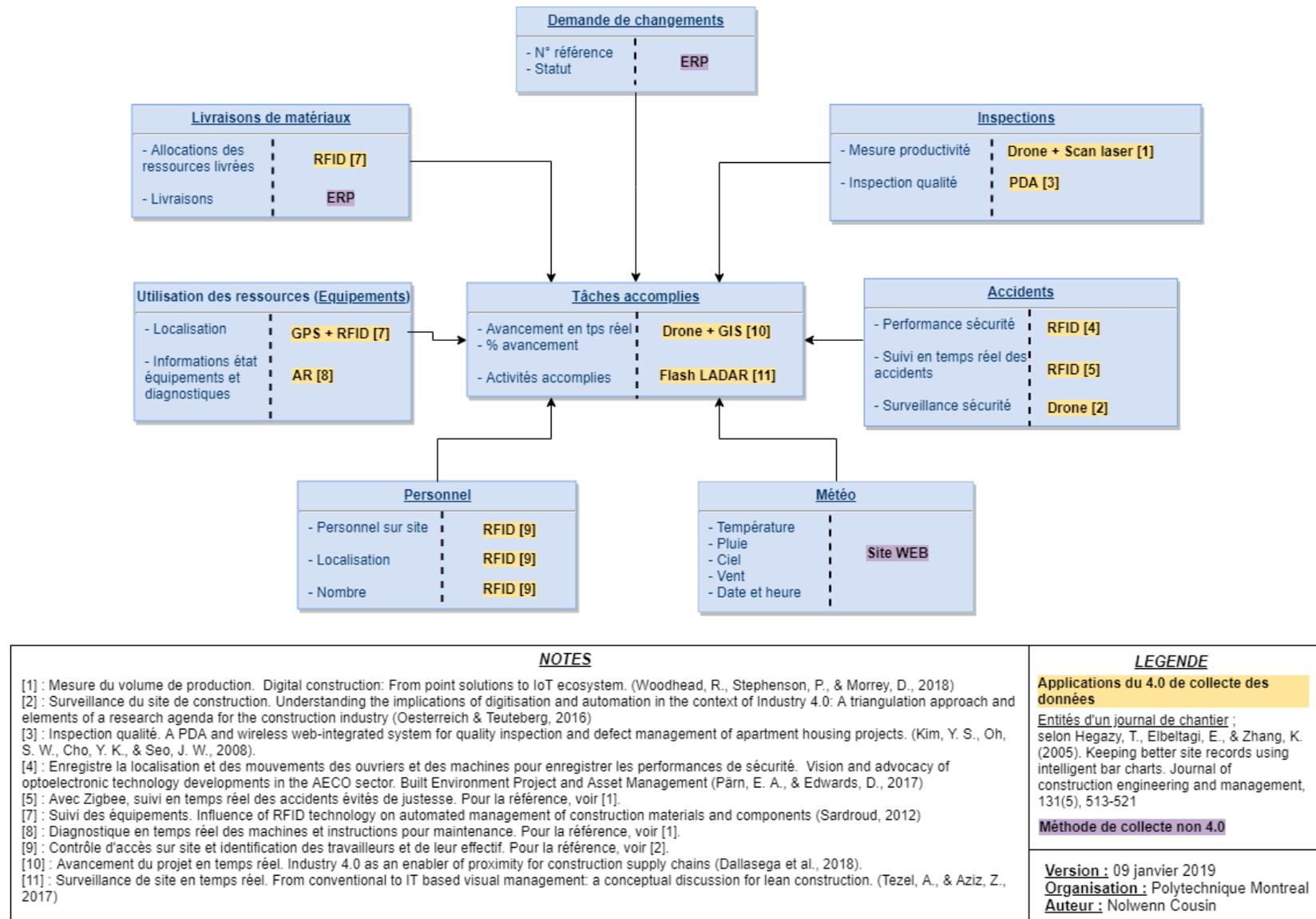


Figure 5.2 : Modèle de données des journaux de chantier intégrant des applications technologiques de collecte issues de l'Industrie 4.0

5.4 Conclusion

Ce chapitre est au cœur de la contribution de ce projet de recherche en répondant au premier objectif de recherche. En effet, il expose la construction du modèle de données des journaux de chantier. Ce modèle vise à faciliter l'amélioration du suivi des projets et de l'élaboration du *As-Built Schedule* en proposant l'ensemble des données à collecter et les méthodes de collecte issues de l'Industrie 4.0 permettant leur collecte. Il permet de servir de base à une démarche d'implantation de l'Industrie 4.0 dans le secteur de la construction. Le chapitre suivant propose d'utiliser ce modèle en vue de suggérer une démarche d'implantation et de tester son application dans le contexte spécifique du partenaire industriel.

CHAPITRE 6 CAS D'ÉTUDE

6.1 Introduction

Ce chapitre se base sur le modèle établi au chapitre précédent et s'intéresse à l'élaboration d'une démarche d'implantation (Section 6.2) et à l'application de cette démarche dans le contexte du partenaire industriel (Section 6.3). Ce chapitre constitue la dernière étape de la méthodologie DRM. L'objectif de cette étape est de montrer l'applicabilité du support, ici le modèle de données via la démarche d'implantation. Cette démarche progressive va permettre de mettre en place la démarche d'implantation générale à l'aide du modèle de données. Dans le contexte particulier du partenaire industriel, la démarche d'implantation s'appuie sur une priorisation des entités constituant le modèle à partir d'une étude de temps menée par un consultant chez le partenaire.

6.2 Démarche d'implantation progressive

La démarche vise à faciliter l'implantation des applications technologiques de l'Industrie 4.0 en se basant sur le modèle de données des journaux de chantier dans l'objectif d'améliorer le processus de suivi des projets. L'implantation se doit d'être progressive dans la mesure où la plupart des industriels sont dans l'impossibilité technique et/ou financière d'installer du jour au lendemain l'ensemble des applications technologiques issues de l'Industrie 4.0 contenues dans le modèle.

La question est alors de savoir comment prioriser les entités du modèle du journal de chantier dans un objectif d'introduction progressive des applications technologiques du 4.0. Cette priorisation impose de connaître le contexte d'implantation. En effet, ce contexte pourrait rendre plus ou moins faciles certaines implantations ou encore pourrait déjà inclure des technologies. En priorisant les entités, cela permet d'indiquer les applications technologiques pouvant être amenées à être implantées en priorité. Plusieurs méthodes peuvent être employées pour cette priorisation selon le contexte.

La Figure 6.1 présente la démarche d'implantation progressive des applications technologiques de collecte 4.0 pouvant être adoptée par les organisations.



Figure 6.1 : Démarche d'implantation progressive des applications technologiques du 4.0

6.3 Application dans le contexte du partenaire industriel

La démarche vise à faciliter l'implantation des applications technologiques de l'Industrie 4.0 chez le partenaire industriel en se basant sur le modèle de données des journaux de chantier dans l'objectif d'améliorer le processus de suivi des projets.

6.3.1 Application de la démarche d'implantation progressive

6.3.1.1 Connaissance du contexte d'implantation

Le contexte du partenaire industriel ne permet pas d'éliminer ou de prioriser certaines entités, car les applications technologiques 4.0 de collecte ne sont actuellement pas présentes. En effet, la cartographie montre que l'activité de visualisation du progrès du chantier est réalisée par déambulation quotidienne sur le chantier. Le surintendant transmet ensuite l'information récoltée manuellement au chef de chantier, de manière informelle. Le choix des critères de priorisation ne peut donc pas reposer ou être influencé par la connaissance du contexte d'implantation.

6.3.1.2 Choix des critères de priorisation – Étude de temps

La question est alors de savoir comment prioriser les entités du modèle du journal de chantier dans un objectif d'introduction progressive des applications technologiques du 4.0 chez le partenaire industriel. En priorisant les entités, cela permet d'indiquer les applications technologiques pouvant être amenées à être implantées en priorité. Plusieurs méthodes peuvent être employées pour cette priorisation. Déterminer l'impact réel de l'implantation de plusieurs nouvelles technologies chez un professionnel peut s'avérer difficile c'est pourquoi, dans ce projet de recherche, le choix a été

fait de prioriser les entités les plus chronophages en termes de temps passé pour la collecte des données correspondantes par les acteurs du projet. Pour déterminer les activités les plus chronophages, une étude de temps menée par un consultant a été exploitée.

L'étude de temps utilisée pour la priorisation des entités a été menée par une firme de consultant durant deux à trois semaines. Un total de 45 employés a été interrogé sur une base de 55 questions. Les rôles interrogés sont l'assistant administratif, le surintendant, le chef de projet et le coordinateur de projet. Leurs activités ont été réparties en 11 catégories. L'ensemble des catégories et activités a été établi à la suite de réunions de travail, d'entrevues téléphoniques et de visites de chantiers avec les protagonistes impliqués. Le but de l'étude est de quantifier le temps passé par chacun des participants sur chacune des activités. Les résultats ont été collectés quotidiennement tout au long de l'étude.

Les catégories rassemblant les différentes activités sont les suivantes :

- Gestion des sous-traitants.
- Revue des courriels.
- Gestion documentaire.
- Planification.
- Gestion des demandes de changements.
- Gestion du site de construction.
- Gestion des approvisionnements.
- Activités administratives pour l'entreprise.
- Budgétisation.
- Approbations.
- Autres.

Chacune de ces catégories contient plusieurs activités. Dans le cadre du projet de recherche, les rôles de chef de projet et de surintendant sont les participants à l'étude responsable de la collecte des données présentes dans le modèle de données des journaux de chantier (Section 5.3).

Des tableaux regroupent ainsi le nombre d'heures passées par les participants sur chaque activité et donnent le pourcentage associé. Le tableau suivant présente un exemple de résultat de l'étude pour la catégorie gestion du site de construction pour les rôles de chef de projet et de surintendant.

Tableau 6.1 : Exemple de résultats obtenus pour la catégorie gestion du site pour les rôles de chef de projet et surintendant

Gestion du site de construction	Chef de projet		Surintendant	
	<i>Heures</i>	<i>%</i>	<i>Heures</i>	<i>%</i>
Réunions quotidiennes de santé, sécurité	4	1%	2	0%
Rencontres avec les professionnels	12	2%	10	2%
Obtention des permis et certifications	1	0%	0	0%
Réunions qualité (10-50-80)	1	0%	1	0%
Réception des équipements et matériaux	1	0%	5	1%
Inspections et visites de site	18	4%	37	8%
TOTAL	36	7%	55	13%

Le nombre d'heures représente la somme des heures déclarées chaque jour par l'ensemble des participants. Le tableau suivant présente le nombre d'heures totales référencées pour l'ensemble des activités pour les rôles de chef de projet et surintendant sur l'ensemble de l'étude. Ce sont ces totaux qui permettent d'établir les pourcentages présents sur le Tableau 6.1.

Tableau 6.2 : Nombre d'heures totales référencées pour l'ensemble des activités des rôles de chef de projet et surintendant

Rôle	Nombre d'heures
Chef de projet	486
Surintendant	433

6.3.1.3 Priorisation des entités du modèle

Pour pouvoir utiliser l'étude de temps, une association entre les catégories de l'étude et les entités du modèle a été réalisée. Les entités « météo » et « demandes de changement » ne nécessitent pas d'applications technologiques de l'Industrie 4.0 et ne sont donc pas concernées par la priorisation. Le Tableau 6.3 présente cette association :

Tableau 6.3 : Association entre les entités du modèle de données et les activités de l'étude de temps

Activités de l'étude de temps	Entités du modèle de données
Demande de changements / Directives du client	Demande de changement
Heures de productivité	Inspections
Santé et sécurité	Accidents
Affectation de l'équipement	Utilisation des ressources (équipements)
Feuille de temps	Personnel
Réception du matériel	Livraison de matériaux
Visite et inspections sur site	Tâches accomplies

Cette association permet de connaître le nombre d'heures total consacré par l'ensemble des chefs de projet et des surintendants pour une activité donnée et le pourcentage associé (calculé par rapport au nombre d'heures total de chaque rôle) dans chacune des entités du modèle.

Le tableau suivant présente les résultats obtenus par la firme de consultant dans leur étude de temps en fonction des différentes entités du modèle de données des journaux de chantier.

Tableau 6.4 : Résultats de l'étude de temps pour chaque entité du modèle

Entités du modèle de données	Nombre d'heures		Pourcentage	
	Chef de projet	Surintendant	Chef de projet	Surintendant
Demande de changement	39	4	8,02	0,92
Inspections	1	1	0,21	0,23
Accidents	10	13	2,06	3,00
Utilisation des ressources (équipements)	1	0	0,21	0
Personnel	13	7	2,67	1,62
Livraison de matériaux	1	5	0,21	1,15
Tâches accomplies	18	37	3,70	8,54

Le pourcentage est plus explicite que le nombre d'heures. En effet, celui-ci représente le pourcentage de temps passé sur une activité par l'ensemble des participants ayant un rôle donné. Il est donc représentatif du temps consacré à l'activité par rapport au reste des activités. Tandis que le nombre d'heures constitue juste la somme des heures pour une activité de tous les participants ayant un rôle donné. En remplaçant les pourcentages dans le modèle de données, la Figure 6.2 est obtenue. Les données en rouge représentent le pourcentage de l'activité des chefs de projet dédié à une activité, celles en vertes celui de l'activité des surintendants. Un pourcentage nul signifie qu'aucune heure n'a été consacrée à cette activité. La faible valeur des pourcentages s'explique par le fait que les activités ont été extrêmement détaillées et représentent des tâches précises. Proportionnellement au nombre d'heures total, les heures consacrées pour chacune des cinquante-quatre activités représentent une faible part.

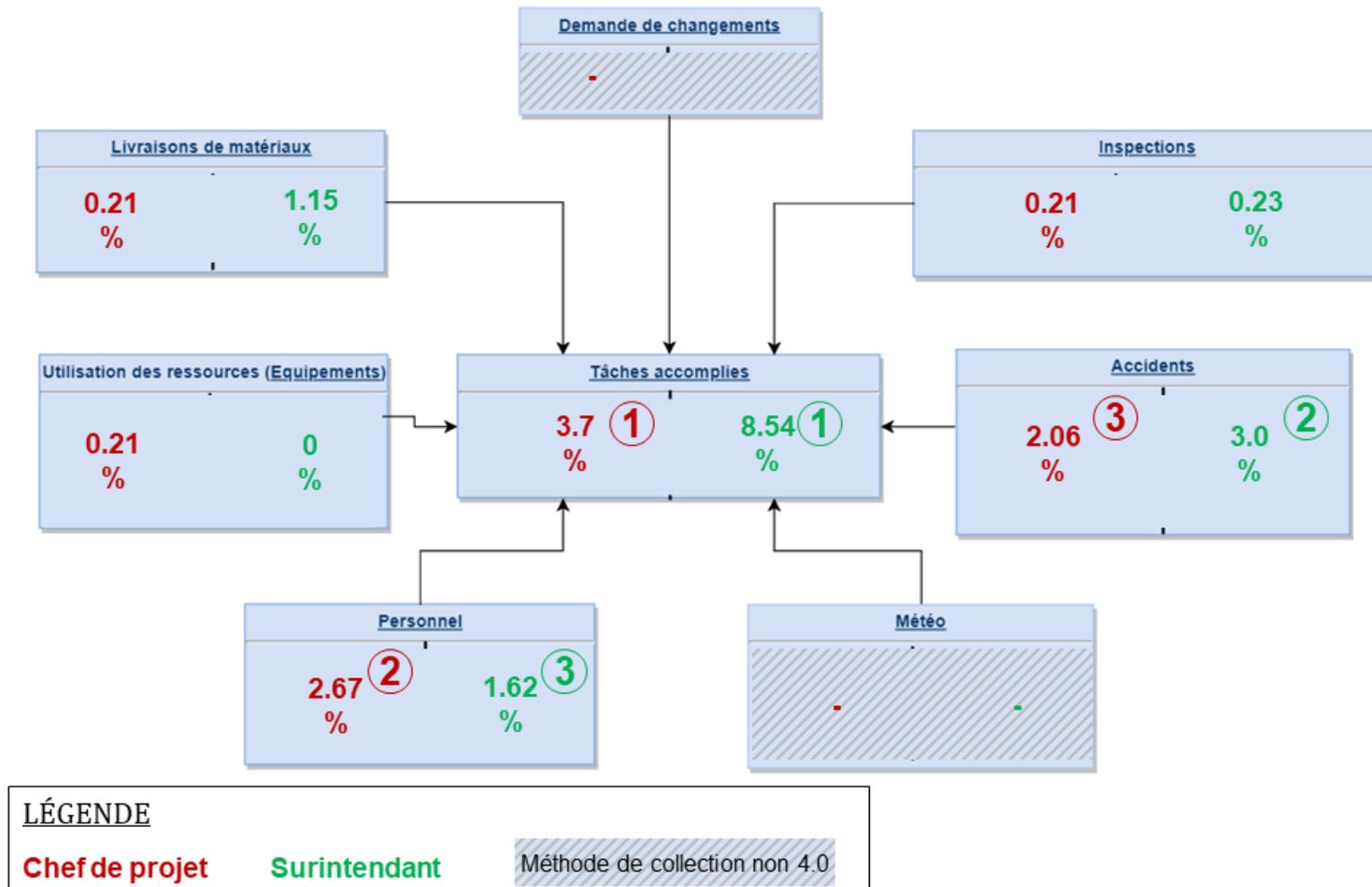


Figure 6.2 : Résultats de l'étude de temps intégrés au modèle de données des journaux de chantier

6.3.2 Interprétation

L'entité la plus chronophage pour les chefs de projet et les surintendants est la collecte de données concernant les tâches accomplies sur le chantier. Ce constat reflète l'importance de cette tâche dans le processus de suivi des projets. Les deux autres entités les plus chronophages sont « personnel » et « accidents ». Le rôle du partenaire industriel dans le projet implique une forte gestion du personnel. En effet, de nombreux sous-traitants sont présents sur les chantiers et nécessitent un suivi poussé du personnel présent sur le chantier afin d'assurer une bonne coordination. L'importance de l'entité « accidents » peut s'expliquer par l'attention portée à la santé et sécurité sur le chantier.

6.4 Conclusion

Ce chapitre, qui répond au second objectif de recherche, a montré que le modèle de données des journaux de chantier avec intégration des applications technologiques issues de l'Industrie 4.0 peut servir de base pour une application dans un contexte industriel en vue d'une implantation progressive dans une firme de construction. Pour faciliter cette démarche d'implantation, une priorisation des entités du modèle peut être effectuée. Elle est dépendante du contexte et peut s'appuyer, comme dans le cas d'étude présenté, sur une étude de temps.

CHAPITRE 7 DISCUSSION, CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'élaboration du *As-Built Schedule* au sein du processus de suivi des projets repose sur la collecte de données contenues dans les journaux de chantier. Ces données sont souvent inexploitable, car inexactes ou temporellement erronées pour cause de fréquence de collecte variable. L'analyse de la littérature a mis en évidence l'absence de description des données devant être collectées et incorporées aux journaux. L'état de l'art a aussi mis en évidence que si de nombreuses technologies de collecte sont mentionnées dans la littérature, elles ne sont pas liées aux journaux de chantier. Afin de répondre aux objectifs de recherche basés sur les manques de la littérature scientifique, ce mémoire présente un modèle de données des journaux de chantier intégrant les applications technologiques issues de l'Industrie 4.0.

Scientifiquement, ce mémoire contribue à l'amélioration du processus de suivi d'avancement des projets de construction. Le modèle de données des journaux de chantier proposé répond à l'objectif de recherche de détailler l'ensemble des données devant figurer dans un journal de chantier. Il présente huit entités dont les données doivent être collectées pour servir de base à l'élaboration du *As-Built Schedule*. Le deuxième volet de la contribution scientifique de ce mémoire est la participation au développement de l'Industrie 4.0 dans le secteur de la construction. Il participe en effet à l'amélioration du processus de suivi des projets en proposant un modèle de données des journaux de chantier jusqu'à lors inexistant intégrant des méthodes de collecte de l'Industrie 4.0. L'absence de lien entre les méthodes de collecte et les données des journaux de chantier a été mise en évidence par l'état de l'art même si les méthodes de collecte issues de l'Industrie 4.0 sont déjà détaillées et classifiées par plusieurs auteurs. Le modèle proposé permet ce lien en associant sous chacune des entités, à chacune des données, une méthode de collecte issue de l'Industrie 4.0. Cette association permet de faire en sorte que les données collectées sur le chantier soient exploitables, car temporellement à jour et exactes grâce aux applications technologiques 4.0 qui permettent l'automatisation de leur collecte.

Une contribution pratique pour l'industrie de la construction est aussi apportée par ce mémoire. Le modèle de données vise en effet à faciliter l'implantation d'applications technologiques de l'Industrie 4.0 dans le cadre du suivi des projets de construction. En détaillant les méthodes de collecte 4.0 pouvant être implantées et le but de leur implantation, le modèle de données des journaux de chantier peut servir de base à l'implantation de l'Industrie 4.0 dans le secteur. En effet,

comme le montre le cas d'étude mené avec le partenaire industriel, il est possible par l'intermédiaire d'une étude de temps de prioriser les entités du modèle et donc de déterminer les applications technologiques à implanter en premier. Le cas d'étude présenté dans ce mémoire propose une priorisation selon les entités qui sont les plus chronophages en termes de collecte par les acteurs de l'équipe projet. Cependant, d'autres outils pourraient être employés selon le contexte de l'entreprise. Les entreprises peuvent donc utiliser le modèle présenté comme un outil de base en vue d'une amélioration de leur processus de suivi de projet via l'intégration d'applications technologiques issues de l'Industrie 4.0.

En ce qui concerne les limitations, le modèle intègre des applications technologiques issues de l'Industrie 4.0 et vise à faciliter leur implantation, mais ne tient pas compte des difficultés pouvant être liées à celle-ci. Le cas d'étude s'est focalisé sur un mode de priorisation. Cependant, certaines applications technologiques s'avèrent certainement plus faciles à implanter que d'autres. Cette facilité d'implantation peut être évaluée selon plusieurs critères par exemple la notion de coût financier, la résistance au changement, la demande en moyens techniques, la demande en formation, etc. Des études d'impact et de coût seraient donc intéressantes à mener lors de recherches futures dans cette perspective d'implantation.

BIBLIOGRAPHIE

- Association for the Advancement of Cost Engineering. (2011). *AACE® International Recommended Practice*
- Battikha, M., & Alkass, S. (1994). A cost-effective delay analysis technique. *AACE International Transactions, 1994*, DCLA. 1.
- Bidet-Mayer, T., & Ciet, N. (2016). *L'industrie du futur: une compétition mondiale: La Fabrique de l'Industrie*.
- Blessing, L. T., & Chakrabarti, A. (2009). *DRM: A Design Reseach Methodology*: Springer London.
- Brettel, M., Friederischen, N., Keller, M., & Rosenberg, M. (2014). How virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape : An Industry 4.0 Perspective. *International Journal of Information and Communication Engineering, 8*.
- Chin, S., Kim, K., & Kim, Y. S. (2005). Generate-select-check based daily reporting system. *Journal of Computing in Civil Engineering, 19*(4), 412-425.
- Dallasega, P., Rauch, E., & Linder, C. (2018). Industry 4.0 as an enabler of proximity for construction supply chains: A systematic literature review. *Computers in Industry, 99*, 205-225.
- Danjou, C., Pellerin, R., & Rivest, L. (2017). Le passage au numérique: Industrie 4.0: des pistes pour aborder l'ère du numérique et de la connectivité.
- Drath, R., & Horch, A. (2014). Industrie 4.0: Hit or Hype? *Ieee Industrial Electronics Magazine, 8*(2), 56-58.
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*: John Wiley & Sons.
- Halaška, M., & Šperka, R. (2018). *Process Mining—the Enhancement of Elements Industry 4.0*. Communication présentée à 2018 4th International Conference on Computer and Information Sciences (p. 1-6).
- Hamledari, H., McCabe, B., Davari, S., & Shahi, A. (2017). Automated Schedule and Progress Updating of IFC-Based 4D BIMs. *Journal of Computing in Civil Engineering, 31*(4).
- Hegazy, T., Elbeltagi, E., & Zhang, K. H. (2005). Keeping better site records using intelligent bar charts. *Journal of Construction Engineering and Management-Asce, 131*(5), 513-521.
- Ibrahim, M., Germain, C., Guevremont, M., Forcier, M., & Moselhi, O. (2013). *Automated development of construction schedules using onsite data acquisition*. Communication présentée à ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (vol. 30, p. 1).
- Isaac, S., & Navon, R. (2012). *Combining automatically and manually collected data for project monitoring and control*. Communication présentée à ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (vol. 29).

- Isikdag, U. (2015). BIM and IoT: A Synopsis from GIS Perspective. *Isprs Joint International Geoinformation Conference 2015*, 40-2(W4), 33-38.
- Jazayeri, J. M. (1994). *Using Computer Programs to Develop As-Built Schedules*. Communication présentée à Computing in Civil Engineering (p. 191-196).
- Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., & Wahlster, W. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group*: Forschungsunion.
- Kettinger, W. J., Teng, J. T. C., & Guha, S. (1997). Business process change: A study of methodologies, techniques, and tools. *Mis Quarterly*, 21(1), 55-80.
- Kim, C., Kim, B., & Kim, H. (2013). 4D CAD model updating using image processing-based construction progress monitoring. *Automation in Construction*, 35, 44-52.
- Kim, Y. S., Oh, S. W., Cho, Y. K., & Seo, J. W. (2008). A PDA and wireless web-integrated system for quality inspection and defect management of apartment housing projects. *Automation in Construction*, 17(2), 163-179.
- Knoke, J. R., & Jentzen, G. H. (1996). Developing an as-built schedule from project records. *AACE International Transactions*.
- Matthews, J., Love, P. E., Heinemann, S., Chandler, R., Rumsey, C., & Olatunj, O. (2015). Real time progress management: Re-engineering processes for cloud-based BIM in construction. *Automation in Construction*, 58, 38-47.
- Oesterreich, T. D., & Teuteberg, F. (2016). Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in Industry*, 83, 121-139.
- Omar, T., & Nehdi, M. L. (2016). Data acquisition technologies for construction progress tracking. *Automation in Construction*, 70, 143-155.
- Park, J., & Cai, H. B. (2017). *Framework of Dynamic Daily 4D BIM for Tracking Construction Progress through a Web Environment*. New York: Amer Soc Civil Engineers.
- Parn, E. A., & Edwards, D. (2017). Vision and advocacy of optoelectronic technology developments in the AECO sector. *Built Environment Project and Asset Management*, 7(3), 330-348.
- Pučko, Z., Šuman, N., & Rebolj, D. (2018). Automated continuous construction progress monitoring using multiple workplace real time 3D scans. *Advanced Engineering Informatics*, 38, 27-40.
- Randall, T. (2011). Construction Engineering Requirements for Integrating Laser Scanning Technology and Building Information Modeling. *Journal of Construction Engineering and Management-Asce*, 137(10), 797-805.
- Rivard, S. (2000). *Le développement de systèmes d'information : Une méthode intégrée à la transformation des processus*, 4e édition. Quebec: Les Presses de l'Université du Québec.
- Russell, A. D. (1993). Computerized Daily Site Reporting. *Journal of Construction Engineering and Management-Asce*, 119(2), 385-402.

- Sardroud, J. M. (2012). Influence of RFID technology on automated management of construction materials and components. *Scientia Iranica*, 19(3), 381-392.
- Shrestha, K. J., & Jeong, H. D. (2017). Computational algorithm to automate as-built schedule development using digital daily work reports. *Automation in Construction*, 84, 315-322.
- Thipparate, T. (2014). Fuzzy critical chain risk management for quantifying impact of variation in non-critical activity duration on project duration. *International Journal of Project Organisation and Management*, 6(1-2), 48-66.
- Tserng, H.-P., Ho, S.-P., & Jan, S.-H. (2014). Developing BIM-assisted as-built schedule management system for general contractors. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(1), 47-58.
- Valdes, D., & Perdomo, J. L. (2013). Using Mobile Computers to Automate the Inspection Process for Highway Construction Projects.
- Watson, A. (2011). Digital buildings—Challenges and opportunities. *Advanced Engineering Informatics*, 25(4), 573-581.
- Woldesenbet, A., Jeong, D. H. S., & Oberlender, G. D. (2011). Daily Work Reports—Based Production Rate Estimation for Highway Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(4), 481-490.
- Woodhead, R., Stephenson, P., & Morrey, D. (2018). Digital construction: From point solutions to IoT ecosystem. *Automation in Construction*, 93, 35-46.
- Wu, W. W., Yang, H. J., Chew, D. A. S., Yang, S. H., Gibb, A. G. F., & Li, Q. M. (2010). Towards an autonomous real-time tracking system of near-miss accidents on construction sites. *Automation in Construction*, 19(2), 134-141.
- Yang, J.-B., & Tsai, M.-K. (2010). Computerizing ICBF method for schedule delay analysis. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(8), 583-591.
- Yang, J.-B., & Yin, P.-C. (2009). Isolated collapsed but-for delay analysis methodology. *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(7), 570-578.

ANNEXE A – NOMBRE DE PUBLICATION SCIENTIFIQUES SUR LE BIM PAR AN

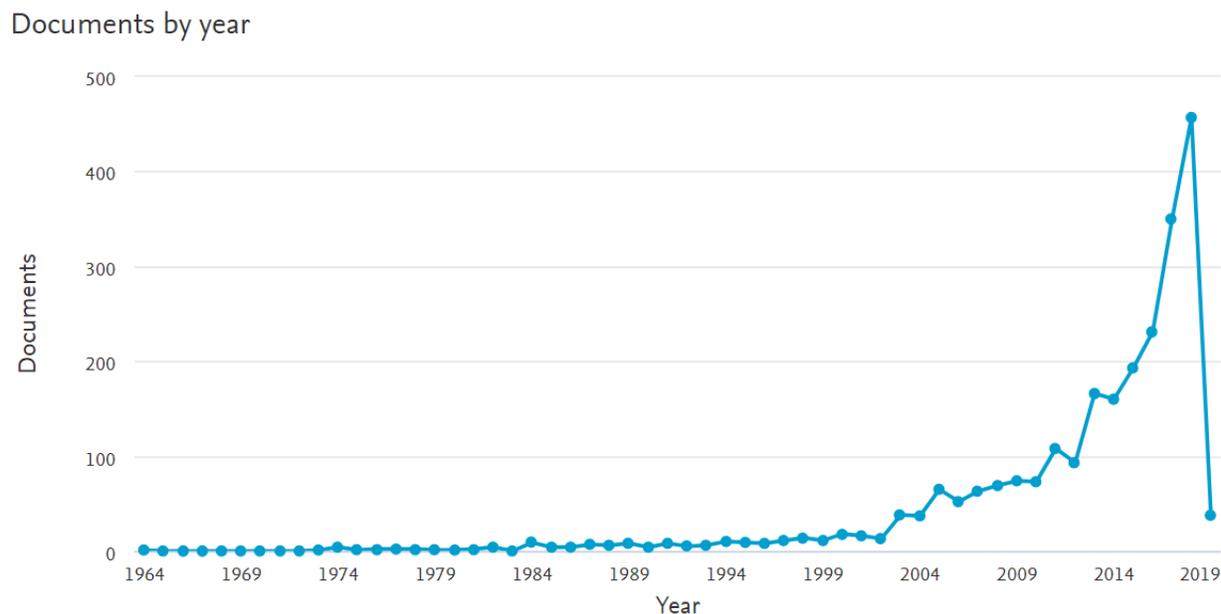


Figure A.1 : Nombre de publications scientifiques sur le BIM par an, tiré de SCOPUS®

Le graphique ci-dessus présente l'évolution du nombre de publications scientifiques en fonction des années. Il a été obtenu sur SCOPUS en utilisant la phrase de recherche suivante : (TITLE-ABS-KEY (("construct* indus*" OR "indus* construct*" OR "build* indus*" OR "indus* build*" OR "innovat* construct*" OR "innovat* build*" OR "construct* site*" OR "building system*" OR "construction sector*")) OR TITLE-ABS-KEY ("BIM" OR "building information model*") AND TITLE-ABS-KEY ("4.0" OR "digit*")).

ANNEXE B – PHRASE DE RECHERCHE DES APPLICATIONS TECHNOLOGIQUES 4.0 DE COLLECTE DE DONNÉES

La phrase de recherche utilisée sur SCOPUS® est la suivante :

```
( TITLE-ABS ( "construct* indus*" OR "indus* construct*" OR "build* indus*" OR "indus*
build*" OR "innovat* construct*" OR "innovat* build*" OR "construct* site*" OR "building
system*" OR "construction sector*" ) OR AUTHKEY ( "construct* indus*" OR "indus*
construct*" OR "build* indus*" OR "indus* build*" OR "innovat* construct*" OR "innovat*
build*" OR "construct* site*" OR "building system*" OR "construction sector*" ) OR ( TITLE (
"BIM" OR "building information model*" ) OR ABS ( "BIM" OR "building information model*"
) OR AUTHKEY ( "BIM" OR "building information model*" ) ) ) AND ( ( TITLE ( "indus* 4.0"
OR "build* 4.0" OR "techno* 4.0" OR "revolution* 4.0" OR "construct* 4.0" ) OR ABS ( "indus*
4.0" OR "build* 4.0" OR "techno* 4.0" OR "revolution* 4.0" OR "construct* 4.0" ) OR
AUTHKEY ( "indus* 4.0" OR "build* 4.0" OR "techno* 4.0" OR "revolution* 4.0" OR
"construct* 4.0" ) OR TITLE ( "digi* construct*" OR "digit* build*"
) OR ABS ( "digi* construct*" OR "digit* build*" ) OR AUTHKEY
( "digi* construct*" OR "digit* build*" ) ) ) AND ( PUBYEAR >
2009 ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE, "English" ) ) )
```

ANNEXE C – PROCESSUS DE SUIVI D’AVANCEMENT DU PROJET CARTOGRAPHIE

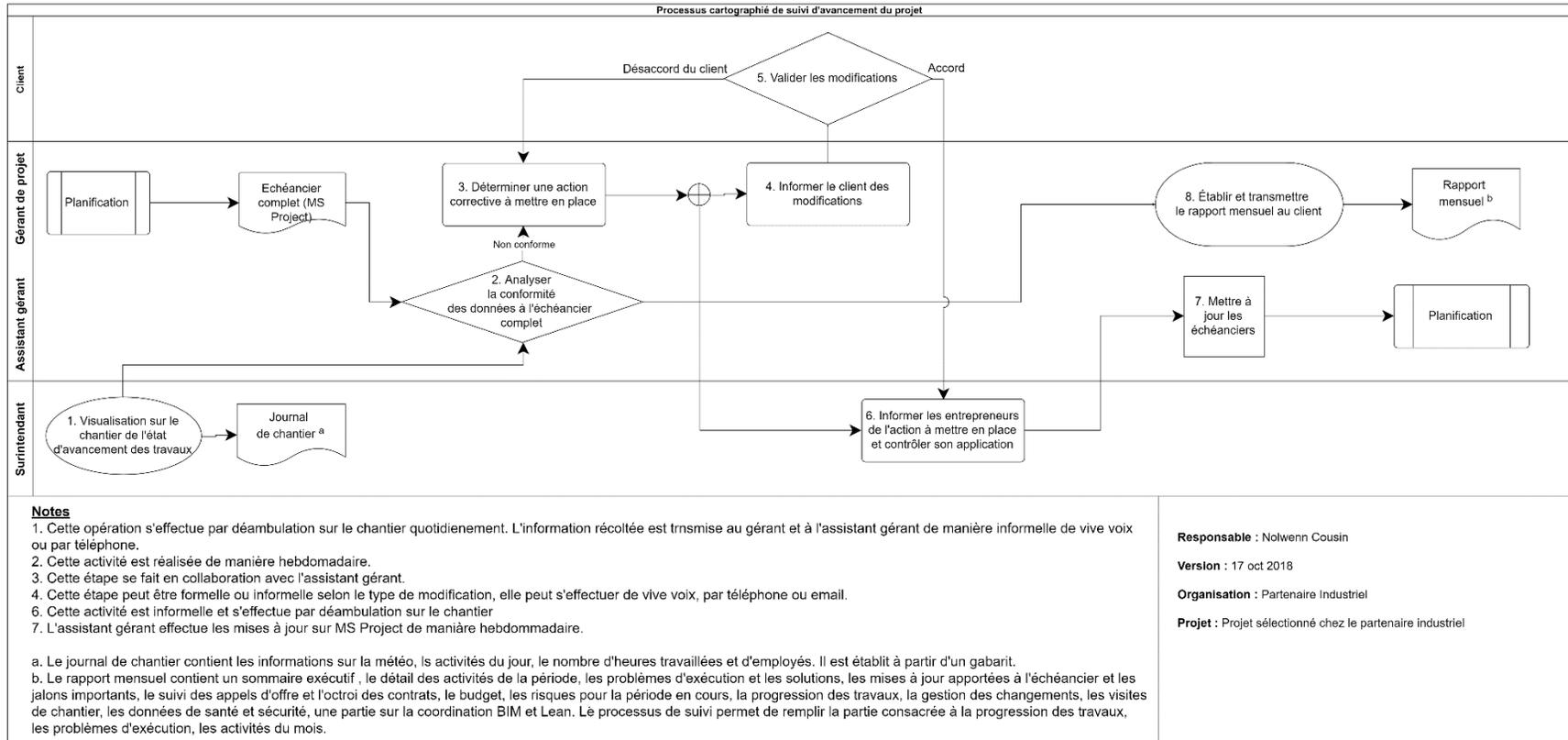


Figure C.1 : Processus de suivi d’avancement du projet cartographié

ANNEXE D – RÉSUMÉ PAR LES AUTEURS CONCERNANT LES JOURNAUX DE CHANTIER

Tableau D.1 : Grille d'analyse des articles de la vue de littérature sur les journaux de chantier

Auteur, Date	Problèmes liés aux journaux de chantier	Données à collecter	Méthodes de collecte des données
Pučko et al. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> - La qualité des données de suivi dépend de l'expérience de la personne qui effectue le suivi - Activité chronophage - Source d'erreur - Fréquence variable 	Changements sur le site de construction	<ul style="list-style-type: none"> - Technologies d'imagerie - Scan Laser - Identification (RFID) - Ultra-Wideband (UWB) - GPS - Réseaux de capteurs sans fil
Park et Cai (2017)	-	Progrès journaliers, équipements, information sur le travail, activités du jour, météo	<ul style="list-style-type: none"> - Systèmes basés sur le web
Hamledari et al. (2017)	Les équipes de management du projet et les sous-traitants ne font pas les rapports d'avancement du chantier à une fréquence suffisante.	-	<ul style="list-style-type: none"> - Technologies géospatiales - Nuages de points en 3D via numérisation laser - reconstruction 3D basée sur l'image
Omar et Nehdi (2016)	<ul style="list-style-type: none"> - Inexactitudes - Activité chronophage - Travail intensif 	-	<ul style="list-style-type: none"> - Technologies TI - Technologies géospatiales - Technologies d'imagerie - Réalité augmentée
Isaac et Navon (2012)	Les données qui doivent en principe être utilisées pour le suivi et le contrôle du projet le sont en réalité uniquement pour les litiges et réclamations.	Matériaux, équipements, travailleurs, durée des activités, sécurité et qualité	<ul style="list-style-type: none"> - Techniques d'imagerie - Radiofréquence et code-barres - GPS
Hegazy et al. (2005)	<ul style="list-style-type: none"> - Incomplets - inexactitudes - Données perdues 	Météo, travailleurs, utilisation des ressources, travail accompli, inspections, accidents, livraisons, changements	-