

Titre: Élaboration d'une structure intégrée d'indicateurs de performance pour le pronostic des activités de chantier
Title: pour le pronostic des activités de chantier

Auteur: Thibaut Roland
Author:

Date: 2019

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Roland, T. (2019). Élaboration d'une structure intégrée d'indicateurs de performance pour le pronostic des activités de chantier [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/3964/>
Citation:

Document en libre accès dans PolyPublie Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/3964/>
PolyPublie URL:

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

Programme: Maîtrise recherche en génie industriel
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Élaboration d'une structure intégrée d'indicateurs de performance pour le
pronostic des activités de chantier**

THIBAUT ROLAND

Département de mathématiques et de génie industriel

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

Génie industriel

Août 2019

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Élaboration d'une structure intégrée d'indicateurs de performance pour le pronostic des activités de chantier

présenté par **Thibaut ROLAND**

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

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

Martin TRÉPANIER, président

Christophe DANJOU, membre et directeur de recherche

Robert PELLERIN, membre et codirecteur de recherche

Mario BOURGAULT, membre et codirecteur de recherche

Conrad BOTON, membre

REMERCIEMENTS

Ce mémoire a été réalisé au sein des chaires de recherche Jarislowsky – SNC-Lavalin en gestion de projets internationaux et la Chaire industrielle de recherche Pomerleau sur l'innovation et la gouvernance des projets de construction. Le financement apporté par ces organismes fut grandement apprécié et m'a permis de m'impliquer dans la réalisation de cette maitrise sans contraintes financières. Je remercie donc les deux titulaires de ces chaires industrielles, respectivement Robert Pellerin et Mario Bourgault.

Je remercie sincèrement mes directeurs et codirecteurs d'étude Christophe Danjou, Robert Pellerin et Mario Bourgault, professeurs à Polytechnique Montréal. Ils m'ont accompagné et guidé tout au long de ce projet de maîtrise. Je les remercie pour leur disponibilité et leur implication dans mon projet. Par ailleurs, je les remercie également pour les conseils judicieux qu'ils ont pu me fournir pendant la maîtrise et pendant la rédaction de ce mémoire. Ce fut un privilège de collaborer avec ces trois professeurs dans le cadre d'une maîtrise. Je les remercie pour cela.

Je tiens également à remercier tous les professionnels qui ont pris de leur temps pour répondre à mes questions et me permettre d'avancer dans la réalisation de ma maîtrise. Leur disponibilité m'a permis de mieux comprendre les enjeux de ma recherche. Ils ont par ailleurs été très accueillants et je les remercie pour cela.

Je tiens à dire merci tout particulièrement à mes camarades Nolwenn Cousin et Aristide Bled avec qui nous avons commencé sur le même thème en travaillant d'équipe. Ils ont été d'un grand soutien et nous avons passé de très bons moments lors de cette maîtrise. Ils m'ont permis d'apprécier encore plus le temps passé au bureau et à travailler en collaboration. Merci à vous.

Plus personnellement, je remercie ma partenaire Élise qui a su m'accompagner et me soutenir dans les moments plus difficiles tels que la rédaction du mémoire. Tout comme mes parents que je remercie aussi, ils m'ont encouragé dans cette aventure. Ensemble ils ont su me garder confiant, persévérand et motivé pour la réalisation de cette belle aventure.

RÉSUMÉ

L'industrie de la construction est soumise à de fortes contraintes et des facteurs variables externes omniprésents. Cependant, aussi particulière qu'elle puisse être, elle se doit d'être compétitive. Les performances d'un chantier de construction sont une priorité pour les entreprises. Pour cela, il lui faut en tout temps adapter ses manières de faire.

Les entreprises de construction peinent à augmenter leur productivité comme le font la majorité des domaines manufacturiers. Ayant pris du retard par rapport à l'automatisation et la numérisation, ces deux éléments sont maintenant vus comme des clés de sa modernisation. On la retrouve en effet à la fin du classement concernant l'adoption de ces technologies, comparativement au secteur de l'agriculture ou de la pêche (Barbosa et al., 2017). Les nouvelles technologies issues de l'industrie 4.0 offrent notamment un fort potentiel pour moderniser cette industrie (Oesterreich & Teuteberg, 2016). Cette dernière vise à collecter et connecter les données en temps réel dans l'objectif d'aider la prise de décision.

Cette maîtrise propose une méthode pour améliorer les processus de suivi et de gestion de la performance sur les chantiers de construction. La solution présentée dans ce mémoire est une structure intégrée d'indicateurs de performance permettant l'élaboration d'un pronostic de réussite d'une activité d'exécution. De façon spécifique, cette structure intègre les concepts de l'industrie 4.0. Cette solution s'inscrit donc parfaitement dans le besoin grandissant d'amélioration de la performance de cette industrie à la productivité stagnante.

Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé l'approche DRM (Design Research Methodology) proposée par Blessing et Chakrabarti (2009). Cette méthode est connue pour la mise en place de modèles empiriques ancrés dans la pratique. Cette étude s'appuie à la fois sur les processus d'un partenaire industriel et sur la littérature. L'objectif étant l'amélioration du *suivi* et de la *gestion de performance*, une revue de littérature sur ces trois notions sera effectuée. Les observations chez l'entreprise partenaire et la littérature nous permettront ensuite de définir les critères de performances sur lesquels agir. Puis, dans cette même démarche soutenue par l'approche DRM, nous utiliserons à la fois la littérature et des cas réels de l'entreprise partenaire pour établir le modèle de données et les technologies nécessaires à l'acquisition de ces données. Enfin, nous étudierons l'applicabilité des résultats de cette étude dans le cas de l'entreprise partenaire.

À notre connaissance, la littérature scientifique n'aborde pas de façon intégrée l'identification des indicateurs de performance et les technologies requises pour les capter. Ces indicateurs n'étant pas identifiés, ils ne sont donc pas générés et mis à jour, faute de capacité à le faire. Pour répondre à ce manque, la présente recherche met en place une structure intégrée d'indicateurs de performance pour le pronostic de succès des activités d'exécution. La structure repose sur quatre notions : les indicateurs, les données nécessaires à leur création, les outils pour acquérir ces données et enfin, les connexions entre tous ces indicateurs pour former un pronostic de succès sur l'activité observée. Le pronostic de succès se base sur les concepts de l'industrie 4.0. Le pronostic apportera aux utilisateurs une vision en temps réel de la probabilité de succès non pas du projet complet, mais de la tâche ou lot de tâches observé. Ce pronostic est un outil cherchant à établir une probabilité d'occurrence d'un résultat. Il permet donc une visibilité à court terme et moyen terme de la santé des activités. Toutes ces données étant mises à jour en temps réel.

ABSTRACT

The construction industry is subject to strong constraints and omnipresent external variable factors. However, as particular as it may be, it must be competitive. The performance of a construction site is a priority for companies. Hence, it must at all times adapt its ways of doing things.

Construction companies are struggling to increase their productivity as most manufacturing sectors do. Having fallen behind automation and digitization, these two elements are now seen as one of the keys to its modernization. It can be found at the end of the ranking for the adoption of these technologies, comparable to the agriculture or fishing sector (Barbosa et al., 2017). In particular, new technologies from industry 4.0 offer great potential for modernizing this industry (Oesterreich & Teuteberg, 2016). The latter aims to collect and connect data in real time in order to support decision-making

This mastery proposes a method to improve performance monitoring and management processes on construction sites. The solution presented in this paper is an integrated structure of performance indicators allowing the development of a prognosis for the success of an execution activity. Specifically, this structure integrates the concepts of industry 4.0. This solution is therefore perfectly in line with the growing need to improve the performance of this aging industry.

To achieve this objective, we used the DRM (Design Research Methodology) approach proposed by Blessing and Chakrabarti (2009). This method is known for the implementation of empirical models that are rooted in practice. This study is therefore based on both the processes of an industrial partner and the literature. As the objective is to improve performance monitoring and management, a literature review on these three concepts will be carried out. Observations at the partner company and in the literature will then enable us to define the performance criteria on which to act. Then, in the same approach supported by the DRM approach, we will use both the literature and real cases of the partner company to establish the given model and the technologies needed to acquire this data. Finally, we will study the applicability of the results of this study to the partner company.

To our knowledge, the scientific literature does not address in an integrated way the identification of performance indicators and the technologies required to capture them. As these indicators are not identified, they are not generated and updated due to a lack of capacity to do so. To address this shortcoming, this research sets up an integrated structure of performance indicators for the

prognosis of success of enforcement activities. The structure is based on four concepts: indicators, the data necessary for their creation, the tools to acquire this data and finally, the connections between all these indicators to form a prognosis of success on the observed activity. The prognosis of success called "success indicators" is based on industry concepts 4.0. The prognosis will provide users with a real-time view of the probability of success not of the complete project, but of the task or batch of tasks observed. This prognosis is a tool that seeks to establish a probability of occurrence of an outcome. It therefore provides short and medium-term visibility of the health of the activities. All this data is updated in real time.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XIV
LISTE DES ANNEXES.....	XV
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	4
2.1 Introduction	4
2.2 Stratégie de recherche documentaire.....	4
2.2.1 La notion de performance	5
2.2.2 Le suivi et la mesure des performances	8
2.2.3 Les solutions identifiées dans la littérature	8
2.3 Analyse des résultats	9
2.3.1 La notion de performance sur les chantiers.....	9
2.3.2 Mesure et suivi de la performance	19
2.3.3 La gestion de la performance	22
2.4 Analyse critique.....	25
2.5 Conclusion.....	27
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE.....	28
3.1 Objectifs de recherche	28

3.2	La Méthodologie DRM	29
3.3	Démarche détaillée	31
3.3.1	Phase descriptive 1 : Analyse de l'existant	31
3.3.2	Phase normative	32
3.3.3	Phase descriptive 2 : Applicabilité du modèle	33
3.4	Conclusion.....	34
CHAPITRE 4 ANALYSE DE L'EXISTANT.....		35
4.1	Introduction	35
4.2	Facteurs issus des entretiens et observations.....	35
4.2.1	Panel étudié	35
4.2.2	Résultat des entretiens et classification.....	36
4.2.3	Informations complémentaires issues des entretiens	41
4.3	Conclusion.....	43
CHAPITRE 5 ÉLABORATION DE LA STRUCTURE INTÉGRÉE.....		45
5.1	Introduction	45
5.2	Identification des données	46
5.2.1	Identification des indicateurs de performance	46
5.2.2	Détails des indicateurs.....	47
5.2.3	Modèle de données	48
5.3	Identification des outils et technologies d'acquisition	51
5.3.1	Stratégie de recherche	51
5.3.2	Les technologies 4.0 et moyens traditionnels d'acquisition.....	52
5.4	Élaboration des connexions au sein de la structure intégrée d'indicateurs	57

CHAPITRE 6 APPLICABILITÉ DU MODÈLE	61
6.1 Introduction	61
6.2 Comparaison des modèles de données	61
6.2.1 Données planifiées	61
6.2.2 Données réelles et connexions	64
6.2.3 Analyse des résultats	66
6.3 Discussion	67
CHAPITRE 7 DISCUSSION, CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	69
RÉFÉRENCES	73
ANNEXES	76

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 – Thèmes et mots-clés de recherche sur les facteurs de performance	6
Tableau 2.2 – Thèmes et mots-clés de recherche sur le suivi de la performance	8
Tableau 2.3 – Thèmes et mots-clés de recherche sur la gestion de la performance.....	9
Tableau 2.4 – Extrait adaptation des facteurs de délais identifiés par Aziz (2013)	12
Tableau 2.5 – Liste des groupes de délais par différents auteurs	14
Tableau 2.6 – Résumé des articles utilisés pour l'identification des facteurs de délais.....	15
Tableau 2.7 – Facteurs externes	16
Tableau 2.8 – Ressources humaines.....	16
Tableau 2.9 – Équipements	17
Tableau 2.10 – Matériaux.....	17
Tableau 2.11 – Finance	17
Tableau 2.12 – Management	18
Tableau 2.13 – Caractéristique du projet	18
Tableau 2.14 – Documents techniques.....	18
Tableau 2.15 – Comportements humains	19
Tableau 4.1 – Détails des personnes interrogées pour les entretiens semi-structurés	36
Tableau 4.2 – Résultat des entretiens semi-structurés.....	37
Tableau 5.1 – Indicateurs de performance généraux et sous-indicateurs.....	47
Tableau 5.2 – Modèle de données de la structure intégrée	49
Tableau 5.3 – Thèmes et mots-clés de recherche sur les technologies 4.0 de la construction.....	51
Tableau 5.4 – Moyens d'acquisition des données nécessaires à la structure	54
Tableau 6.1 – Comparaison du modèle de données : théorique vs pratique	62
Tableau A.1 – Classement des facteurs de retard (Aziz, 2013)	78

Tableau B.1 – Tableau récapitulatif des sources de délais.....	81
Tableau C.1 – Détails pour la sélection des indicateurs de performance.....	86
Tableau D.1 – Détails des facteurs de non-performance agrégés	88

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 – Stratégie de recherche pour la revue de littérature	4
Figure 2.2 – Stratégie de sélection des articles liés à la non-performance.....	7
Figure 2.3 – Représentation des notions de critères, facteurs et indicateurs de performance.....	11
Figure 2.4 – Bénéfices du BIM (Alenazi & Adamu, 2017)	24
Figure 3.1 – Méthode DRM appliquée au sujet de l'étude	30
Figure 5.1 – Schéma méthodologique de l'élaboration de la structure intégrée	46
Figure 5.2 – Diagramme entité-relation (Partie 1)	59
Figure 5.3 – Diagramme entité-relation (Partie 2)	60
Figure 6.1 – Légende de la visualisation d'applicabilité à l'entreprise partenaire.....	64
Figure 6.2 – Applicabilité de la structure « entité-relation » à l'entreprise partenaire (Partie 1) ..	65
Figure 6.3 – Applicabilité de la structure « entité-relation » à l'entreprise partenaire (Partie 2) ..	66

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

DRM : Design Research Methodology

KPI : Key Performance Indicator

CSF : Critical Success Factor

LPI : Leading Performance Indicator

EPC : Engineering/Procurement/Construction

BIM : Building Information Modeling

POD : Planning Of the Day (Réunion de coordination quotidienne)

BIM : Building Information Modeling

IA : Intelligence Artificielle

RFID : Radio Frequency Identification

MSP : Microsoft Project

NFC : Near Field Communication

GPS : Global Positioning System

RFIs : Requests for information

ERP : Entreprise Resource Planning

SST : Santé et Sécurité au Travail

UHF : Ultra Haute Fréquence

UAV : Unmanned aerial vehicle

LISTE DES ANNEXES

Annexe A Classemement des facteurs de retard(Aziz, 2013).....	78
Annexe B Tableau Récapitulaif des sources de délais.....	81
Annexe C Détails pour la sélection des indicateurs de performance	86
Annexe D Détails des facteurs de non-performance agrégés.....	88

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

L'industrie de la construction est un acteur majeur dans le paysage économique d'un pays. Dans les pays industrialisés, elle contribue à hauteur d'environ 10% au produit intérieur brut (Allmon, Haas, Borcherding, & Goodrum, 2000). Malgré son importance, ce secteur souffre encore de difficultés l'empêchant d'atteindre des niveaux de performance et de productivité observés dans d'autres industries. Il peine notamment à moderniser ses pratiques. Par exemple, les dépenses en recherche et développement sont nettement inférieures aux autres industries : environ 1% des recettes y sont dédiées, comparativement à l'automobile ou l'aérospatiale qui s'y consacrent à des niveaux variant de 3,5% à 4,5% (Agarwal, Chandrasekaran, & Sridhar, 2016). Cette difficulté peut s'expliquer en partie par la taille des firmes souvent très petites et par son environnement complexe : des projets changeants et uniques, un grand nombre de parties prenantes à intégrer ainsi que des contraintes extérieures aléatoires comme la météo ou les conditions du terrain. Ces difficultés constituent un frein important pour son développement et pour l'amélioration des performances sur les chantiers de construction. L'industrie de la construction doit donc maintenant porter son regard sur l'innovation pour rester performante, à l'image des industries manufacturières qui ont entamé leur virage numérique. Plusieurs firmes de construction s'engagent dans cette voie depuis quelques années et démontrent un intérêt grandissant pour les technologies numériques et l'automatisation dans l'objectif d'améliorer leurs performances.

La présente recherche s'inscrit dans ce besoin de modernisation de l'industrie de la construction. Plus précisément, cette étude vise la mise en place d'une solution permettant d'améliorer la mesure et le suivi de la performance sur les chantiers. La proposition sous-jacente à l'étude consiste à poser que cette amélioration passe par une connexion des facteurs de non-performances observés dans l'industrie et les outils du numérique issus de la 4e révolution industrielle également appelée « industrie 4.0 ».

La notion de performance est souvent utilisée pour caractériser l'atteinte des objectifs d'une organisation. Au niveau d'un projet, la performance de ce dernier constitue également une mesure d'atteinte des objectifs tels que fixés par les parties prenantes, notamment le client. On différentie généralement deux notions lorsque l'on réfère à la performance. D'une part, la gestion de la performance, et d'autre part, la mesure de la performance (Lebas, 1995). Ces deux notions sont étroitement liées. On mesure d'abord la performance grâce à des indicateurs spécifiques, puis on a

recours à diverses pratiques de gestion pour l'améliorer. La mesure de la performance permet en outre de connaître l'état de santé du projet. C'est pourquoi il est important de tenir à jour ces indicateurs afin de pouvoir réagir en cas d'écart avec ce qui est prévu. Ces indicateurs et donc la mesure de la performance constituent des outils importants d'aide à la décision (Rodriguez, Saiz, & Bas, 2009).

La singularité des projets de construction apporte une complexité dans la mise en place d'une gestion de la performance efficace. En effet, la collecte des données essentielles à la mesure et au suivi des indicateurs de performance est plus complexe dans ce domaine industriel. Sans cette collecte de données, le suivi et la prise de décision qui devrait en découler à travers la gestion de performance s'avèrent impossibles. C'est ici que l'industrie 4.0 peut apporter une solution, de par les outils modernes d'aide à la décision qu'elle contribue à déployer.

Le terme « industrie 4.0 » fait sa première apparition en 2011 en Allemagne (Drath & Horch, 2014). Il est aujourd'hui utilisé pour désigner la quatrième révolution industrielle. Cette 4e révolution industrielle se profile après plus de 250 ans d'industrialisation ayant commencé dans les années 1780 avec la machine à vapeur, symbole de la première révolution industrielle et de la mécanisation. Un peu plus d'un siècle plus tard, on assiste à l'arrivée du Fordisme et de l'électricité en Amérique, symbole de la production en ligne à grande échelle, constituant ainsi la seconde révolution. La troisième révolution industrielle représente l'arrivée de l'informatique, ce qui permettra d'automatiser l'industrie à partir des années 1970. La quatrième révolution industrielle à laquelle nous assistons actuellement s'appuie sur un ensemble de technologies numériques et d'une connectivité généralisée des objets (processus, produits, services). Dans ce contexte, les tenants de l'industrie 4.0 soutiennent qu'elle changera les modèles d'affaires et aidera la prise de décision en collectant et connectant les données en temps réel (Danjou, Pellerin, & Rivest, 2017). Notons que les technologies ne sont pas des technologies 4.0 en tant que telles. Ce sont leurs applications qui le sont. Par exemple, la technologie RFID (radio frequency identification) avait un usage militaire dès la Seconde Guerre mondiale. Ce sont donc les technologies et leur application qui sont qualifiées de « 4.0 » (Perrier et al., soumis). Par simplification, nous parlerons parfois de technologie 4.0 pour désigner la technologie avec son application.

Si l'industrie 4.0 est en pleine expansion dans le domaine manufacturier, son potentiel transformationnel atteint peu à peu celui de la construction. Quelques auteurs ont d'ores et déjà

amorcé ce mouvement en s'intéressant à ce qu'on appelle la « construction 4.0 », soit l'application des concepts et technologies liées à l'industrie 4.0 au domaine de la construction. La littérature scientifique propose déjà des recensements de technologies associées au 4.0 (Dallasega, Rauch, & Linder, 2018; Oesterreich & Teuteberg, 2016). On retrouve certaines technologies émergentes comme la réalité augmentée, mais aussi des technologies déjà éprouvées dans d'autres domaines, en particulier le domaine manufacturier comme la RFID utilisé dans le suivi logistique ou l'utilisation d'appareils mobiles (Oesterreich & Teuteberg, 2016). On remarque dans la littérature que ces technologies dites du 4.0 s'articulent dans le domaine de la construction autour du BIM : Building Information Modeling. Le BIM fait partie de la transformation numérique dans la construction (Zhao et al., 2017). C'est à la fois un outil de modélisation numérique et un processus de travail basé sur le partage d'information. Le BIM permet une collaboration directe et en temps réel entre toutes les parties prenantes impliquées dans des projets de construction.

Cette étude vise à **développer une approche pour établir un pronostic au niveau des activités de chantier**. Ce pronostic d'activité se basera sur le suivi d'un ensemble d'indicateurs de performance par activité. On élaborera ainsi une structure intégrée d'indicateurs de performance pour le pronostic d'activité de chantier. Notons que ce pronostic sera réalisé sur différents horizons dépendamment de l'activité observée. Cette étude repose sur quatre notions : l'identification des indicateurs de performance; l'identification des données à récolter pour alimenter ces indicateurs, les moyens nécessaires pour acquérir ces données et enfin les indicateurs de performance pour réaliser le pronostic global sur l'activité.

Pour répondre à cet objectif, ce mémoire est composé de 7 chapitres. Une revue de littérature a d'abord été effectuée pour connaître les besoins recensés dans le domaine académique en plus d'en soulever les limitations. Elle portera sur les notions de suivi et gestion de la performance dans l'industrie de la construction. Le chapitre 3 présente la méthodologie de la recherche. Le chapitre 4 s'appuie sur la revue de la littérature afin d'analyser la réalité de l'entreprise partenaire. Pour cela, des entretiens semi-structurés avec des membres de l'entreprise partenaire ont été effectués. Le chapitre 5 présente le modèle de données aligné sur les besoins identifiés dans les chapitres précédents. Ce mémoire présente dans le chapitre 6 une étude d'applicabilité à l'entreprise partenaire à ce projet. Enfin, ce mémoire se termine par une discussion générale des contributions développées dans ce mémoire en plus de soulever de nouvelles pistes de recherche au chapitre 7.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

La revue de littérature se décompose en trois parties. La première partie explique la stratégie de la recherche. La deuxième partie de ce chapitre présente ensuite les résultats de cette recherche bibliographique. Elle est divisée en trois sous parties : l'identification des facteurs de non-performance pertinents à prendre en compte dans le domaine de la construction, le suivi et la mesure des indicateurs de performance et enfin les solutions de gestion de la performance identifiée dans la littérature. La troisième partie du chapitre porte sur une analyse critique de cette recherche bibliographique. Celle-ci permettra de positionner la présente recherche en soulignant les lacunes de la littérature scientifique et en identifiant les opportunités.

2.2 Stratégie de recherche documentaire

La revue documentaire repose sur l'examen des principaux concepts qui constituent la question générale de recherche illustrée dans la Figure 2.1. Ainsi, trois notions principales sont visées dans la présente revue de littérature : les critères de performance pertinents à l'industrie de la construction, les moyens technologiques pour mesurer et effectuer le suivi des données de chantier et enfin, l'identification de solutions pour améliorer la gestion de cette performance. La Figure 2.1 ci-dessous identifie les questions auxquelles cette revue de littérature s'efforce de répondre.

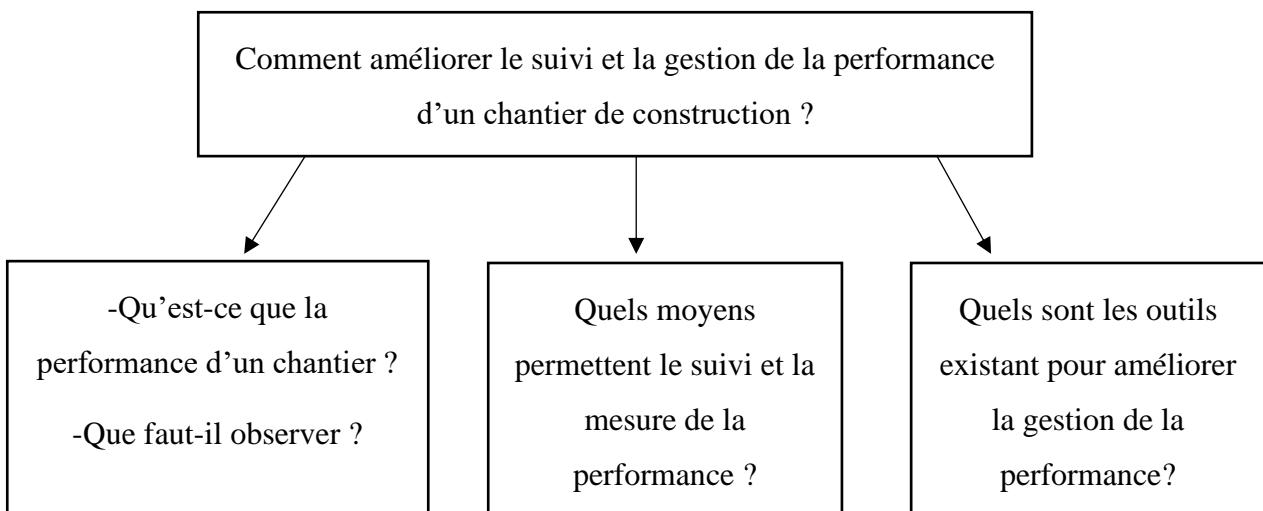


Figure 2.1 – Stratégie de recherche pour la revue de littérature

Pour effectuer cette revue littéraire, nous avons utilisé les bases de données de Compendex et Inspec disponibles à la bibliothèque de Polytechnique Montréal. Ces deux bases de données regroupent une proportion très importante de la littérature relative à l'ingénierie. L'utilisation de ces moteurs a permis de couvrir la majorité de la littérature associée au sujet étudié. Les mots-clés utilisés seront recherchés dans les index des auteurs, des résumés et des termes contrôlés correspondant aux mots-clés de l'auteur.

2.2.1 La notion de performance

La recherche relative à la performance sur les chantiers de construction a été effectuée en plusieurs étapes. Dans un premier temps, nous avons cherché à définir le terme de performance de manière générale, sans nous intéresser au domaine de la construction. Le moteur de recherche GoogleScholar a été utilisé dans cette phase préliminaire. L'utilisation des références citées dans les articles pertinents au sujet a été la stratégie de cette étape. Elle a permis d'éclairer la vision de performance et de critère de performance. Lors de cette étape, nous définissons donc les termes de performance, de critère, d'indicateur puis de facteurs de performance. Dans la deuxième partie, nous nous intéressons aux facteurs de performance ou plus précisément aux facteurs de non-performance. L'objectif étant d'améliorer la performance, la première partie de la revue nous a permis de nous rendre compte que les notions de non-performance et d'analyse de problèmes sont beaucoup plus documentées que l'inverse. C'est pourquoi nous utiliserons cette vision de non-performance.

La définition des termes mentionnés ci-dessus nous a également permis d'élaborer une phrase de recherche pertinente pour identifier les articles relatifs à la non-performance. Dans la gestion de projet de construction et également de manière générale, les critères principaux et les plus documentés sont : le respect de l'échéancier et des coûts. Pour obtenir des sources ou facteurs de non-performance associés à des activités d'exécution et pour restreindre la recherche, seule la notion de respect de l'échéancier sera étudiée. Les notions de dépassement de coût apportent beaucoup de résultats non pertinents à la présente recherche. Cette dernière s'intéressant particulièrement aux causes de non-performance associées aux activités d'exécution. La notion de coût apporte des résultats très généraux au projet dans sa globalité. Les résultats bibliographiques sur le dépassement de coût lorsqu'ils sont généraux au projet, ne mentionne pas les activités d'exécution trop bas niveau. Lorsqu'ils mentionnent les activités d'exécution, les dépassements de

coûts sont induits d'un non-respect d'échéancier. C'est pourquoi nous effectuons cette recherche sur la notion du respect de l'échéancier. En effectuant la recherche sur le critère de temps, nous pourrons connaître la majorité des facteurs agissant sur la performance en général. En effet, le problème de retard dans le domaine de la construction reste majeur et est très documenté. Les mots-clés utilisés sont présentés dans le Tableau 2.1 ci-dessous.

Tableau 2.1 – Thèmes et mots-clés de recherche sur les facteurs de performance

Mots-clés associés à l'industrie de la construction	Mots-clés associés à la non-performance des projets
Construction industry	Time overrun
Building industry	Overtime
Construction site	Delay causes
Construction sector	

Cette recherche a permis d'identifier 219 articles entre 2010 et 2019 une fois les doublons éliminés. Pour effectuer le recensement des facteurs de non-performance pertinents à cette recherche, une catégorisation a été effectuée dans un premier temps. Ensuite, les facteurs identifiés dans les articles retenus ont été agrégés en facteur global permettant une classification de 49 facteurs de non-performance.

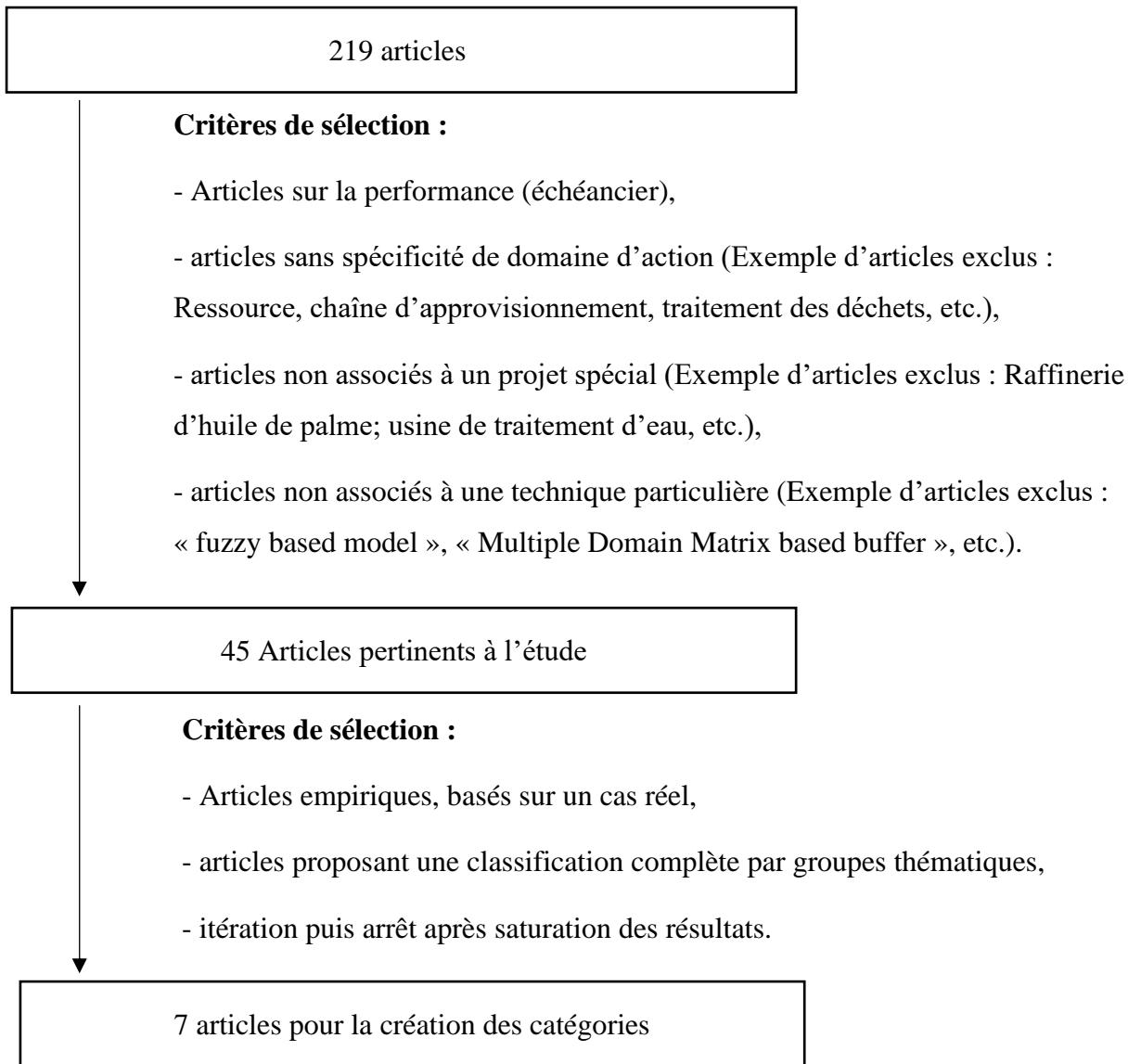


Figure 2.2 – Stratégie de sélection des articles liés à la non-performance.

Pour la deuxième partie consistant à identifier les facteurs de non-performance, nous avons recensé 12 autres articles provenant des 45 articles pertinents à l'étude. Deux revues de littérature seront utilisées combinées aux trois articles empiriques les plus complets de la recherche précédente. Par rapport au Canada, ces précédents articles évoluent dans des pays différents en terme politique, économique et social. Nous avons donc identifié sept autres articles empiriques de pays occidentaux correspondant davantage au contexte canadien.

2.2.2 Le suivi et la mesure des performances

Pour effectuer l'état de l'art de littérature concernant les moyens mis en œuvre pour suivre et mesurer la performance, nous avons utilisé les thèmes de la construction, de la mesure et du suivi de la performance. L'objectif était de déterminer s'il existait des études intégrant la notion de la performance et proposant des solutions techniques et concrètes de la mesurer (voir Tableau 2.2). La recherche a été effectuée entre 2005 et 2019. En effet, c'est sur cette plage que l'on observe une augmentation significative du nombre de publications. Une fois les doublons retirés, le résultat de la recherche compte 199 articles.

Tableau 2.2 – Thèmes et mots-clés de recherche sur le suivi de la performance

Mots-clés associés à l'industrie de la construction	Mots-clés associés à la mesure et au suivi de la performance
Construction industry	Performance measurement
Building industry	Performance monitoring
Construction site	Delay monitoring
Construction sector	Delay measurement

Lors de cette recherche, une quinzaine d'articles pertinents a été identifiée pour effectuer cette section de la revue de littérature. Les critères de sélection ont été les suivants :

- Études empiriques,
- Articles sur la mesure de la performance,
- Articles sans spécificité de domaine d'action, et
- Articles non associés à un projet spécial.

2.2.3 Les solutions identifiées dans la littérature

Pour cette troisième partie, nous avons à la fois utilisé les articles identifiés dans la première partie pour observer les recommandations et les solutions proposées, mais une autre recherche plus spécifique a également été effectuée. Pour cette recherche, nous avons utilisé le thème de la gestion de la performance en plus de celui de l'industrie de la construction présente dans toutes les recherches (voir Tableau 2.3). De la même manière que la première recherche, nous utiliserons les mots-clés associés aux délais.

Tableau 2.3 – Thèmes et mots-clés de recherche sur la gestion de la performance

Mots-clés associés à l'industrie de la construction	Mots-clés associés à la gestion de la performance
Construction industry	Performance management
Building industry	Improve performance
Construction site	Delay reduction
Construction sector	Delay management
	Control of delay

Cette recherche a permis d'identifier 250 articles entre 2005 et 2020.

2.3 Analyse des résultats

2.3.1 La notion de performance sur les chantiers

Pour cette première partie de la revue littéraire cherchant à comprendre la notion de performance dans l'industrie de la construction, nous la diviserons en deux parties : une première section permettra de définir la notion de performance en général et la seconde identifiera les facteurs de non-performance dans l'industrie de la construction en les classant thématiquement dans 9 catégories.

2.3.1.1 Définition

Définir la performance en tant que telle n'est pas simple, car il n'existe pas de définition universelle à ce terme. Elle est souvent utilisée pour caractériser une organisation dans l'atteinte de ses objectifs. Cette notion de performance se divise en deux étapes : la mesure (ou suivi) de la performance, puis la gestion de la performance (Lebas, 1995).

La mesure de la performance permet à l'organisation de mesurer le succès du projet. Mais la notion de succès varie très largement au sein d'une organisation, la perception n'étant pas la même en fonction de la partie prenante sondée. Chacune possède ses objectifs et des critères pour mesurer le succès de son projet. Ainsi, la performance est visualisée à différents niveaux pour différents types d'activité au sein d'une même organisation. Par exemple la performance peut être vue à un niveau stratégique, environnemental, opérationnel, humain, etc. (Turner & Zolin, 2012). La

performance dépend donc de son observateur et du milieu dans lequel il évolue. Le suivi de la performance, peu importe le niveau organisationnel, apporte des informations permettant de mesurer le succès futur du projet et de prendre des décisions en cas de déviance. Selon Lebas (1995), la mesure de la performance permet d'apporter des réponses aux questions suivantes :

- Où étions-nous?
- Où sommes-nous maintenant ?
- Où voulons-nous aller ?
- Comment y aller ?
- Comment savoir que nous y sommes?

La performance constitue donc un indicateur de succès pour son utilisateur, d'où l'appellation courante d'indicateurs de performance. Ce sont donc ces indicateurs qui permettront de répondre aux questions ci-dessus développées par Lebas (1995). Pour cela, les indicateurs de performance quantifient des facteurs de performance du projet. Autrement dit, l'indicateur de performance permet d'apprécier concrètement le ou les facteurs qu'il observe. Les indicateurs aident la prise de décisions contribuant ainsi à l'atteinte des objectifs fixés. Par exemple, le leadership d'un gérant de projet est un facteur de performance pouvant agir sur plusieurs critères de succès comme le coût et le temps. Et pour quantifier ce leadership, des indicateurs de performance porteurs de sens permettront de quantifier, mesurer ce facteur de performance. Les indicateurs peuvent être de différentes formes. Ils peuvent être objectifs, sous forme d'écart, de taux ou de valeurs porteuses de sens comme la rentabilité ou la charge de travail. Mais ils peuvent également être plus contextuels ou perceptuels comme la satisfaction client ou les impacts sociaux (Turner & Zolin, 2012).

À l'essor de la gestion de projet et de la mesure des performances, plusieurs auteurs identifient trois critères de succès principaux : le temps, le coût et la qualité. Le respect de ces trois dimensions assurerait le succès du projet (De Wit, 1988; Olsen, 1971). Ces trois critères sont appelés communément le « triangle de fer » en gestion de projet (Garbharran, Govender, & Msani, 2012). Reconnu par les auteurs, le triangle de fer est maintenant souvent associé à d'autres critères comme la dimension liée à la santé et sécurité (Maghsoodi & Khalilzadeh, 2018; Pires, Teixeira, & Moura, 2007) ou encore les dimensions sociale, environnementale, technologique, etc. (Rodriguez et al., 2009). Ce sont sur ces critères de succès que les facteurs de performance vont agir. C'est pourquoi on parlera dans la suite par exemple de facteurs de délais (agissant sur le critère du temps) ou de facteurs de surcoût (agissant sur le critère du coût). La Figure 2.3 ci-dessous schématise les liens entre les trois notions abordées ci-dessus. Les facteurs de performance peuvent s'apparenter à des causes, bien que le principe de causalité doive ici être considéré avec précaution. Ces derniers agissent sur des critères généraux appelés critères de décision ou critères de succès. Pour mesurer et ainsi faciliter la prise de décision corrective pour ces facteurs de performance, des indicateurs sont mis en place. Ces derniers supportent la prise de décision en apportant des informations claire et pertinente pour comprendre la situation observée.

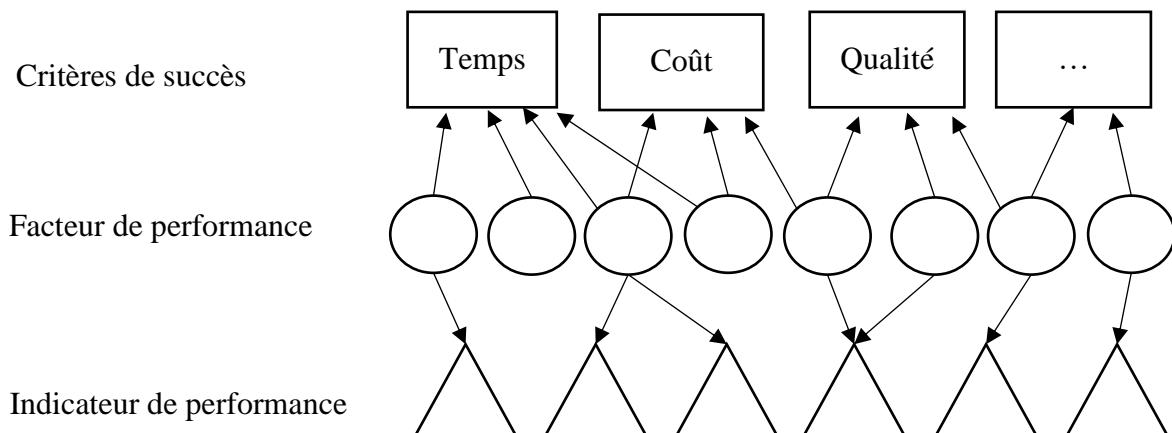


Figure 2.3 – Représentation des notions de critères, facteurs et indicateurs de performance

2.3.1.2 Facteurs de non-performance et formation de groupe

La section précédente nous a permis de définir les critères de performance les plus importants : le triangle de fer. C'est par ailleurs, ces trois critères (temps, coût et qualité) les plus documentés. En particulier la combinaison temps et coûts. En étudiant le critère du temps, cette recherche s'attarde

à répondre à la question suivante : quels sont les facteurs susceptibles de créer des délais dans le domaine de construction ?

Dans cette partie, la synthèse de la littérature identifiera différentes approches pour analyser des facteurs de délais effectués par les auteurs. La classification aura pour but de mettre en place un cadre de classification pour les facteurs de délais ou plus généralement de non-performance qui seront identifiés par la suite.

2.3.1.2.1 *Synthèse de la littérature*

Aziz (2013) a effectué une analyse des facteurs de délai dans l'industrie de la construction en Égypte. Il a identifié avec sa revue de littérature au total 99 sources de délais qu'il a classifiées en 9 catégories : (1) consultant ; (2) entrepreneur ; (3) conception ; (4) équipement ; (5) externe ; (6) main-d'œuvre ; (7) matériaux ; (8) propriétaire ; (9) projet. Aziz a ensuite effectué un travail de rangement par importance en sondant ces sources de délai sur un panel de 2500 professionnels du bâtiment. Les 20 facteurs de délai principaux sont mentionnés dans le Tableau 2.4 ci-dessous.

Tableau 2.4 – Extrait adaptation des facteurs de délais identifiés par Aziz (2013)

Rang	Description du facteur de délais	Catégorie relative
1	Retard dans les paiements (problèmes de financement)	Propriétaire
2	Différentes tactiques pour les pots-de-vin	Externe
3	Pénurie d'équipement	Équipement
4	Inefficacité de la planification et de l'ordonnancement des projets	Entrepreneur
5	Mauvaise gestion et supervision du site	Entrepreneur
6	Mauvais contrôle financier sur place	Entrepreneur
7	Reprises dues à des erreurs	Entrepreneur
8	Sélection d'entrepreneurs inappropriés	Propriétaire
9	Mesures en cas d'échec soudain	Externe
10	Planification inadéquate	Propriétaire
11	Équipe de projet incompétente	Entrepreneur
12	Expérience inadéquate de l'entrepreneur	Entrepreneur
13	Pannes fréquentes de l'équipement	Équipement
14	Crise financière mondiale	Externe
15	Complexité du projet (type de projet, échelle du projet, etc.)	Le projet
16	Litiges juridiques entre les participants au projet	Le projet
17	Ordres de modification.	Propriétaire
18	Méthodes de construction inappropriées	Entrepreneur
19	Main-d'œuvre non qualifiée ou inadéquate	Main d'œuvre
20	Conflits entre copropriétaires	Propriétaire

Le tableau complet comprenant les 99 facteurs de délais est disponible en Annexe A.

Habibi, Kermanshachi et Safapour (2018) se sont intéressés aux sources de délais et de surcoût en utilisant la notion de LPI (Leading Performance Indicator). Des indicateurs de rendement ont été mis en place là où des surcoûts ou délais ont été identifiés. D'autre part, ces auteurs ont choisi d'orienter leur recherche en fonction du cycle de vie du projet EPC (engineering, procurement, construction). Ils ont examiné pas moins de 200 articles sur le sujet pour ces différentes phases de construction et en ont ressorti les principales sources de délai et de surcoût sous forme de LPI. Ils concluent leur étude en soulignant que les principales causes de délai et dépassement de coût sont les (1) demandes de changement pour les phases d'ingénierie et de construction ; (2) le manque de ressource et (3) la fluctuation des prix affectent la phase d'approvisionnement. Les auteurs mentionnent également comme causes profondes de dépassement des coûts : (4) la mauvaise communication ; (5) les conditions économiques et (6) la météo.

Al-Aomar (2012); Dallasega, Rauch et Frosolini (2018) utilisent une approche basée sur le « Lean construction », soit l'amélioration continue dans l'industrie de la construction. Le Lean a pour principal objectif de supprimer les pertes. Les actions se veulent procurant des gains de temps, d'argent avec une meilleure qualité. Ces auteurs utilisent cette notion de Lean pour « chasser » les gaspillages dans le domaine de la construction. Dallasega, Rauch et Frosolini (2018) identifient huit sources de délais : (1) niveaux de stocks élevés et longs délais de livraison ; (2) interruptions dues à des matériaux manquants ; (3) problèmes identifiés à un stade tardif ; (4) calendriers peu fiables et mesure de l'avancement des travaux de construction ; (5) planification centralisée par le chef de projet ; (6) basé sur l'expérience des personnes plutôt que sur les systèmes/méthodes ; (7) manque de collaboration entre les participants et (8) manque de développement d'outils informatiques dans la construction. Al-Aomar (2012) identifie 5 catégories s'inscrivant dans une dimension Lean : (1) qualité (classement Sigma) ; (2) rapidité (indice de performance de l'échéancier) ; (3) coût (indice de performance du coût) ; (4) valeur (indice de valeur) et (5) déchets (indice de déchets). Il relève au total 27 sources de gaspillages dans étude de cas à Abu Dhabi.

(Ahmed, Azhar, Castillo, & Kappagantula, 2002) utilisent une classification par thème, criticité et responsable. Les catégories sont les suivantes : retards non excusables ; retards excusables non indemnifiables ; retards excusables et indemnifiables ; retards concomitants. Les auteurs ont porté leur attention sur les causes majeures de délais afin de connaître les répercussions sur les différentes parties prenantes (propriétaire, entrepreneur, consultant, client).

2.3.1.2.2 Classification

Un grand nombre d'auteurs classe les sources de délais identifiés par groupe. C'est le cas par exemple de Aziz (2013) comme vu précédemment. Le Tableau 2.5 identifie plusieurs articles proposant une classification des délais par groupe. Ces groupes mélangeant en général la responsabilité (Entrepreneur ; consultant ; concepteur ; etc.) ou des thèmes (Technique ; projet ; matériel ; etc.).

Tableau 2.5 – Liste des groupes de délais par différents auteurs

Références	Groupes
(Asgari, Kheyroddin, & Naderpour, 2018)	(1) Processus financiers (2) Processus interactifs (3) Ressources humaines (4) Ententes contractuelles (5) caractéristiques du projet
(Aziz, 2013)	(1) Consultant (2) Entrepreneur (3) Conception (4) Équipement (5) Externe (6) Main-d'œuvre (7) Matériaux (8) Propriétaire (9) Projet
(Doloi, Sawhney, Iyer, & Rentala, 2012)	(1) Lié au projet (2) Lié au site (3) Lié au processus (3) Lié aux humains (4) Lié à l'autorité (5) Questions techniques
(Gebrehiwet & Luo, 2017)	(1) Causes liées à la responsabilité (2) Causes liées à l'entrepreneur (3) Causes liées au consultant (4) Causes liées au concepteur (5) Causes liées aux matériaux de construction (6) Causes liées aux finances (7) Causes liées au travail (8) Causes liées au matériel (9) Causes liées aux conditions contractuelles (10) Causes externes
(Gündüz, Nielsen, & Özdemir, 2012)	(1) Consultant (2) Entrepreneur (3) Conception (4) Équipement (5) Externalité (6) Main-d'œuvre (7) Matériaux (8) Propriétaire (9) Projet
(Mahamid, 2016)	(1) Facteurs de coût (2) Facteurs humains (2) Facteurs professionnels (3) Facteurs de gestion (4) Facteurs de conception et de documentation (5) Facteurs matériels et équipements (6) Facteurs environnementaux.
(Sambasivan, Deepak, Salim, & Ponniah, 2017)	(1) Lié au client (2) Lié à l'entrepreneur (3) Lié au consultant (4) Lié au matériel (5) Lié à la main-d'œuvre et à l'équipement (6) Lié au contrat (6) lié à l'extérieur

Une catégorisation des sources délais et dépassement de coût est nécessaire. En nous basant sur le Tableau 2.5, nous utiliserons une catégorisation uniquement par thème. Les groupes sont les suivants : (1) facteurs externe ; (2) ressources humaines ; (3) équipements ; (4) matériaux ; (5) finance ; (6) management ; (7) caractéristiques du projet ; (8) documents techniques et (9) comportements humains.

2.3.1.2.3 *Facteurs de non-performance*

Cette classification thématique a été utilisée pour classer 43 facteurs de non-performances identifiés dans les articles présentés dans le Tableau 2.6.

Tableau 2.6 – Résumé des articles utilisés pour l’identification des facteurs de délais.

Numéro de référence pour l’identification des facteurs de délais	Auteurs
[1]	(Habibi et al., 2018)
[2]	(Mbala, Aigbavboa, & Aliu, 2018)
[3]	(Gebrehiwet & Luo, 2017)
[4]	(Mahamid, 2016)
[5]	(Aziz, 2013)
[6]	(Ahmed et al., 2002)
[7]	(Couto & Teixeira, 2007)
[8]	(Sullivan & Harris, 1986)
[9]	(Bordoli & Baldwin, 1998)
[10]	(Walker & Vines, 2000)
[11]	(Olawale, Yakubu & Sun, 2010)
[12]	(Pires et al., 2007)

Ces 12 articles retenus permettent d’établir une liste des facteurs de non-performance observés dans l’industrie de la construction. Cette liste comporte 43 facteurs triés dans les 9 thèmes établis précédemment. On s’intéresse dans les résultats qui suivent aux facteurs les plus factuels possible. De nombreux facteurs ont été agrégés pour n’en former qu’un. L’analyse complète est disponible en Annexe B. Par exemple, un manque de matériel peut provenir d’une erreur lors de la commande ; d’un problème de transport ; d’une erreur du fournisseur ou encore d’un problème de fabrication. Toutes ces causes seront reliées au facteur « Manque de matériel ».

Tableau 2.7 – Facteurs externes

Facteurs identifiés	Référence associée
Mauvaises conditions économiques	1;2;3;5;10
Conditions météorologiques	1;2;4;8;9
Lois, règlements	1;3;6;7
Condition du site	4;5;6;8;12
Permis de construire	5;6;7
Vandalisme	9
Exposition au public	4
Corruption	3

Les principaux facteurs externes agissant sur la performance du chantier sont d'un commun accord entre les articles : les conditions économiques, les aléas climatiques et les conditions imprévues.

Tableau 2.8 – Ressources humaines

Facteurs identifiés	Référence associée
Manques de qualification	1;2;3;4;5;6;7;8;9;10;11;12
Faible productivité	4;5;7
Manque de protections individuelles/ collectives	12
re-work	2;5;6;9
Manque de supervision des ouvriers	2;4

Le manque de qualification est la principale source de non-performance. Elle est mentionnée dans tous les articles. Cette qualification concerne toutes les parties prenantes. On retrouve les ouvriers, les contremaîtres, les cadres, les ingénieurs, les surintendants, etc. On retrouve également le manque de qualification des sous-traitants, des fournisseurs, etc.

Tableau 2.9 – Équipements

Facteurs identifiés	Référence associée
Manque d'équipement	4;9;12;20;37
Pannes	6;20;41;42;46
Manque de logiciels appropriés	37;45
Mauvais choix d'équipement	9;12;20
Retard dans la fourniture des services	20;9

Tableau 2.10 – Matériaux

Facteurs identifiés	Référence associée
Pénurie de matériaux de construction sur le chantier	1;2;3;4;5;6;7;8;9;11
re-work	4;6;9
Mauvaise qualité	3;4

La pénurie de matériaux est elle aussi mentionnée dans la plupart des articles. C'est le problème fondamental. Les articles mentionnent à la fois des retards dans la fabrication en usine, des retards d'approvisionnement, une mauvaise gestion, etc. Le même cas de situation se présente avec la mauvaise qualité des matériaux. La cause peut venir du matériel lui-même, d'un mauvais entreposage ou encore d'un problème lors de l'approvisionnement.

Tableau 2.11 – Finance

Facteurs identifiés	Référence associée
Retard de paiement	1;2;3;5;6;11
Différentes tactiques pour les pots-de-vin	5
Mode de financement et de paiement des travaux achevés	5

Tableau 2.12 – Management

Facteurs identifiés	Référence associée
Mauvaise communication et coordination	1;2;4;5;7;8;10;11
Mauvaise gestion et supervision du site	1;2;3;4;5;6;11
Lenteur dans la prise de décisions	1;4;5;6;7;8;9;10;12
Gestion et contrôle déficients des activités	7;11
Litiges contractuels	5;8;11
Changement fréquent de sous-traitants	5

On remarque que le thème du management est très documenté dans la littérature scientifique. L'industrie de la construction étant encore très basée sur le contact humain, ce facteur est omniprésent dans ce domaine. La littérature scientifique le définit bien souvent comme étant un facteur critique de succès. La communication prend en compte la relation entre toutes les parties prenantes. Les conflits entre ces dernières entrent également en compte dans ce facteur.

Tableau 2.13 – Caractéristique du projet

Facteurs identifiés	Référence associée
Planification déficiente des activités	1;2;3;4;5;7;11
Complexité	1;2;3;4;5;7;12
Accident dû à une activité risquée	2;12
Méthodes de construction inappropriées	5

La complexité du projet peut être un facteur de non-performance. On parle ici du type de projet (civil, bâtiment, etc.), de son envergure, du nombre de projet en parallèle, etc.

Tableau 2.14 – Documents techniques

Facteurs identifiés	Référence associée
Ordres de modification	1;2;4;5;6;7;8;9;11;12
Documents incomplets	6;7
Erreurs de conception	3;5;7;12
Délais pour les documents techniques	2;3;4;5;6;7;9
Complexité	8;10
Mauvaise qualité/conception	4

Une modification à mettre en place et qui n'était pas prévue peut provenir de différentes situations. Les articles identifient les changements imposés par le client comme étant les sources majoritaires et critiques dans la gestion des délais. Mais les problèmes peuvent provenir d'une erreur ; de documents incomplets ou de documents de mauvaise qualité.

Tableau 2.15 – Comportements humains

Facteurs identifiés	Référence associée
Relation d'équipe	2;10
Litiges/grèves	8;9
Motivation des employés	4

Comme nous l'avons souligné précédemment, le domaine de la construction est un domaine où l'humain joue un rôle fondamental. Ainsi les articles identifient naturellement, les facteurs liés aux comportements humains. Ceux-ci n'étant jamais considérés comme critique lorsqu'ils sont classés.

Le détail du contenu et de la classification des délais est disponible en Annexe B.

2.3.2 Mesure et suivi de la performance

Dans cette section, nous traitons du suivi de la performance. Ce suivi est fortement associé à la mesure de la performance qui en est le préalable ; de même, la mesure de la performance est l'un des deux volets de la performance tels que mentionnés précédemment (Lebas, 1995). L'AACE (2015) propose un guide sur le management de projet et souligne également l'importance de mesurer les performances et le progrès des chantiers. L'AACE définit cette notion comme étant le processus de mesures de dépenses ou de l'état des ressources d'un projet en prenant l'exemple des matériaux et des heures de travail. Dans cette partie, nous chercherons donc à identifier les moyens pour capter les informations nécessaires au suivi des facteurs de performance que nous avons définis précédemment. Nous utiliserons donc en partie les articles précédents, mais nous effectuerons également une recherche plus approfondie sur le suivi des performances.

Plusieurs articles proposent des recommandations pour améliorer la performance d'un chantier. L'une de ses recommandations est généralement l'amélioration du suivi. En effet, il est nécessaire de mesurer puis effectuer un bon suivi des performances pour pouvoir ensuite prendre des décisions (Lebas, 1995). Dans leur étude, Olawale & Sun (2015) identifient les outils utilisés dans l'industrie de la construction pour effectuer différentes tâches dont le suivi et le «reporting », des coûts et des

délais. Leur conclusion est que dans les entreprises qu'ils ont observées il n'existe pas de processus ou mécanisme formel associé au suivi des coûts et des délais. Ils proposent donc dans ce même domaine plusieurs recommandations pertinentes sur le besoin d'effectuer un suivi dans plusieurs domaines. De manière non exhaustive, ils citent entre autres les matériaux, les équipements, les ressources humaines, le transfert d'information, etc. On n'observe cependant pas dans leurs résultats de moyens techniques pour effectuer ce suivi. Même conclusion avec Ling et Li (2019) qui identifient le besoin d'effectuer un suivi des facteurs critiques sans proposer de moyen concret d'y parvenir. (Ling & Li, 2019).

Le guide de l'AACE propose des méthodes pour effectuer le suivi du progrès à des fins d'alimentation d'un indicateur sur la valeur ajoutée. Le guide explique quels éléments doivent être pris en compte. Ce sont 5 méthodes de suivi du progrès pour mesurer l'avancement d'un lot de travaux. De plus, l'AACE souligne l'importance de suivre les ressources (humaines et matériels) pour les analyses de la productivité ou encore le suivi des changements, les risques de ruptures. Au niveau technologique, le guide de l'AACE explique qu'il faut élaborer et tenir à jour les outils de mesure comme les logiciels, les formulaires, liste de contrôle ou les procédures. Ghanem et AbdelRazig (2006) proposent également l'utilisation de l'indicateur de la valeur acquise pour mesurer la performance. Les auteurs vont plus loin, en établissant un cadre technologique pour récolter les données nécessaires en temps réel. L'objectif est d'utiliser des technologies sans fil comme la RFID pour suivre le pourcentage de tâche effectué sur le chantier. Ils basent leur structure sur le suivi des ressources humaines et matérielles. Nous verrons dans la suite de cette revue de littérature que ce domaine a été largement couvert par la recherche scientifique.

Certains auteurs détaillent les données nécessaires pour réaliser les indicateurs de performance qu'ils ont identifiés. C'est le cas par exemple de Tripathi et Jha (2018) qui ont réalisé une étude empirique proposant 20 indicateurs de performance pour lesquels ils établissent une formule sous forme de rapport entre deux entités pour réaliser les indicateurs. Il n'est pas question dans cette étude des moyens nécessaires à la collecte des données.

Khoiry et al. (2018) proposent l'utilisation de certaines technologies pour faciliter et améliorer le suivi. De manière assez générale, il recommande l'utilisation d'outil de suivi qu'il ne cite pas et de logiciel comme Primavera ou MSP (Microsoft project). Par ailleurs, les auteurs recommandent

également l'utilisation d'équipements modernes non cités dans l'article (Khoiry, Kalaisilven, & Abdullah, 2018).

Dans leur recherche, Tezel, Barker et Aziz (2016) se sont intéressés aux problèmes relatifs à la qualité et l'exactitude des données de suivi de chantier et donc aux méthodes de mesure de la performance qui s'en alimente. Ils ont effectué une revue de littérature concernant ses problèmes de mesures largement identifiés dans la littérature. Ils expliquent que les données de chantier sont souvent disparates, incohérentes ou très subjectives. Elles nécessitent donc un intérêt particulier avec les technologies modernes qui apparaissent. Les auteurs suggèrent l'utilisation des appareils mobiles pour capter les informations ou toutes autres technologies de l'information minimisant les biais humains et les erreurs de collection. Ils citent entre autres l'utilisation de capteurs pour récolter des données physiques (température, humidité, etc.), le laser pour obtenir des données fiables du terrain ou de l'avancement d'une tâche, ou encore l'utilisation de technologies comme la RFID, le Bluetooth ou le NFC (near field communication) pour l'identification automatique et le suivi des ressources.

Cet aspect de suivi des ressources (humain ou matériel) a été largement étudié dans littérature. Les auteurs ayant abordé ce sujet identifient la même problématique : le besoin de contrôler la chaîne d'approvisionnement et les stocks sur le chantier de construction. Leur contribution permettrait une réduction des délais et une diminution des coûts. L'implication de la technologie RFID permettrait une localisation automatique des ressources (Kasim et al., 2019). Certains auteurs cherchent à optimiser la gestion des matériaux dans le but d'atteindre un approvisionnement en « Juste à temps » (Venugopal & Vardhana, 2019). Dallasega, Rauch et Frosolini (2018) proposent également un modèle permettant la mise en place du juste à temps dans le cas d'une production en entreprise avant l'assemblage sur le chantier. Cheng et Teizer (2010) proposent dans la notion de ressources humaines un moyen d'améliorer la sécurité des ouvriers un meilleur suivi des données de chantier. En mesurant en temps réel, certaines informations comme la localisation des ouvriers et celle des équipements, les accidents peuvent être évités. Dans leurs articles Cheng et Teizer suggèrent l'association de technologies innovantes (RFID, GPS, Ultra WideBand) pour améliorer la mesure de ces informations et ainsi améliorer la sécurité des chantiers.

2.3.3 La gestion de la performance

Dans cette partie nous allons aborder les solutions identifiées dans la littérature scientifique pour améliorer la gestion de la performance. Par gestion de la performance, nous entendons les processus d'amélioration ainsi que le suivi et la mesure de la performance en passant par la collecte des données. Cette partie s'intéresse particulièrement aux outils, processus et techniques utilisant les mesures et données permettant une prise de décision concrète, améliorant la performance elle-même. On s'intéressera aux articles cités précédemment (section 0), mais également à d'autres articles proposant des idées nouvelles et pertinentes à cette étude. L'objectif rapporté au sujet de ce mémoire et d'identifier dans la littérature des recommandations pour améliorer la gestion de la performance. La gestion de la performance s'inscrit dans le management de celle-ci.

Il y a différentes méthodes d'action pour réduire les délais. Ces délais peuvent être anticipés ou mitigés. L'anticipation des délais est une planification basée sur la possibilité d'occurrence. L'estimation des coûts et des durées est une tâche critique dans l'étape de planification. (Budayan, Dikmen, Birgonul, & Ghaziani, 2018). Un retard ou un dépassement de coût est par définition par rapport à une valeur définie auparavant. C'est lors de la planification que cette valeur est déterminée. D'où l'importance de prendre en compte les risques de retard ou de dépassement de coût sur les tâches. Cependant c'est le second aspect qui nous intéressera pour la suite de cette étude : comment mitiger les délais et non-performances ou les prévenir avant qu'ils surviennent ?

(Mahamid, 2016) a effectué une grande étude de cas en Arabie Saoudite avec plus d'une centaine de réponses sur ces questionnaires. Après avoir effectué un classement des causes de délais dans la construction saoudienne, il propose à la fin de son article 10 recommandations générales sur les bonnes manières de faire. Ces recommandations s'adressent à une ou plusieurs parties prenantes du projet. Elles sont donc ciblées. Par exemple Mahamid recommande aux entrepreneurs d'améliorer les systèmes de documentation du site et de livraison des matériaux. Ou encore, d'améliorer le système de motivation des travailleurs, ce qui contribuera à améliorer leur productivité. Il ne donne pas la façon ou une façon de mettre ces recommandations en place.

D'autres vont un peu plus loin dans leurs recommandations. En donnant des tâches concrètes à effectuer. C'est le cas de (Elhaniash & Stevovic, 2016). Ils ont effectué leur étude de cas au Zimbabwe. Ils proposent à la fin de leur étude 11 recommandations. Ces dernières sont plus développées. Ils intègrent des fréquences de tâches à effectuer comme une réunion hebdomadaire

avec le client. Leur recommandation pour la gestion des documents donne plusieurs stratégies précises. Citons par exemple le besoin pour l'expert-conseil de mettre l'accent sur l'inspection en temps opportun des documents de conception. De plus, ces auteurs intègrent également la notion de santé et sécurité dans leurs recommandations. Les auteurs mettent l'accent sur le détail des bonnes pratiques.

L'article de (Olawale, Yakubu & Sun, 2010), propose pas moins de 90 mesures d'atténuation. Elles sont classées en 4 catégories : mesures préventives, prédictives, correctives ou d'organisation.

(Khoiry et al., 2018) a effectué une revue de littérature sur les idées permettant de minimiser les délais dans l'industrie de la construction. Ils ont relevé pas moins de 143 idées et en ont identifié 27 comme étant les plus communes qu'ils ont triées en 4 catégories : gestion, relations interpersonnelles, techniques et technologiques. Cette étude aborde la notion intéressante de technologies.

Ces technologies sont définies par les auteurs comme étant fondées sur la quatrième révolution industrielle. Rappelons que dans l'industrie de la construction, le BIM est un outil moderne représentant cette révolution par son caractère technologique et connecté. Les auteurs identifient plusieurs intérêts du BIM : l'identification des conflits et l'aide à la visualisation. De surcroît, il recommande l'utilisation « de technologies électroniques modernes » pour surveiller et analyser l'activité sur le chantier. Les logiciels de gestion de projet sont cités pour leur intérêt à gérer la main-d'œuvre, planifier la construction du projet, établir le calendrier et surveiller la construction du projet.

D'autres auteurs abordent en particulier la notion de BIM. C'est le cas de (Alenazi & Adamu, 2017) qui propose une analyse des intérêts d'implanter le BIM dans l'objectif de réduire les délais relatifs aux clients. Pour cela ils effectuent une analyse des principales causes de délais puis identifient et regroupent 14 bénéfices du BIM (Figure 2.4). Pour les cinq « critical delay factors » relatifs aux clients qu'ils ont identifiés, ils associent un ou plusieurs bénéfices du BIM. Ils montrent ainsi dans leur étude que le BIM contribue à la réduction des délais.

- B1** : Améliorer la qualité de la conception et vérifier facilement la cohérence par rapport à l'intention de conception, ce qui évite des retards coûteux,
- B2** : Visualisation plus hâtive et plus précise d'un dessin ou modèle pour une meilleure compréhension des propositions,
- B3** : Soutenir la prise de décision concernant la conception,
- B4** : Améliorer la conception et l'installation des services du MEP (mécanique, électronique, plomberie) et de tout système de construction ainsi que leur coordination avec les autres systèmes de construction,
- B5** : Envoi hâtif des quantités et estimation des coûts pendant la phase de conception avec mise à jour continue au fur et à mesure que des changements sont apportés au modèle,
- B6** : Améliorer la compréhension de l'enchaînement des activités de construction et de la durée des projets,
- B7** : Améliorer la visualisation des détails de construction,
- B8** : Améliorer le processus de la chaîne d'approvisionnement,
- B9** : Accroître la capacité de résoudre les RFIs (Requests for information) en temps réel,
- B10** : Améliorer la communication (échange d'informations entre les intervenants),
- B11** : Réduire la durée du projet et les coûts de construction,
- B12** : Planification et estimation des coûts plus précise,
- B13** : Réaction rapide aux changements de conception (facilitation des ordres de modification),
- B14** : Détection des collisions (réduire les collisions).

Figure 2.4 – Bénéfices du BIM (Alenazi & Adamu, 2017)

(Lessing, Thurnell, & Durdyev, 2017) concluent leur étude en exprimant l'intérêt d'introduire le BIM dans l'industrie de la construction, mais nuancent en expliquant qu'il faudra de nombreuses années en plus pour atteindre une productivité suffisante à l'amélioration de la situation.

2.4 Analyse critique

La revue de littérature nous a permis de nous rendre compte de l'ampleur des études qui ont été effectuées dans le recensement des sources ou facteurs de non-performance sur les chantiers. Aziz (2013) à lui seul recense et pondère une centaine de facteurs identifiés en sondant 2500 professionnels. Cette part est donc très largement documentée et c'est pourquoi les résultats de cette identification de facteurs sont vite devenus redondants. En effet, c'est un défi depuis des années pour les entreprises de construction et également les pays qui œuvrent dans un domaine ayant un rôle majeur dans l'économie d'un pays (Allmon et al., 2000). Cependant, nous pouvons observer qu'en une dizaine d'années, les facteurs de non-performance dans l'industrie de la construction sont toujours les mêmes. La performance des chantiers ne s'améliore pas.

Le problème que l'on observe dans la littérature est le manque de moyens concrets permettant le suivi et la mesure de la performance. Sans ces indicateurs, les parties prenantes sont aveugles sur l'évolution et le chemin que prend un projet par rapport aux objectifs fixés. Les articles scientifiques identifient le besoin d'effectuer ce suivi, mais les technologies ou moyens mis en œuvre pour récolter les données nécessaires au suivi de ces performances ne sont pas abordés. L'étude de Olawale, Yakubu et Sun (2015) portant sur l'analyse des outils utilisés pour le suivi des performances, montre de plus qu'il n'existe pas de processus formel dans les entreprises. Au-delà des processus de suivi, il y a un problème de qualité et d'exactitude des données de chantier (Tezel et al., 2016). La plupart des auteurs qui abordent la notion de critères de performance ou d'indicateurs de performance soulignent simplement l'importance d'effectuer un suivi régulier et précis. C'est le cas de Ling et Li (2019) ou encore du guide de l'AACE. Ces auteurs proposent des méthodes, et expliquent comment former ces indicateurs, mais n'explique pas comment effectuer concrètement le suivi de ces indicateurs. Les recherches n'abordent jamais de façon intégrée les indicateurs de performance et les technologies nécessaires à leur captation. Les quelques auteurs mentionnant des technologies pour effectuer le suivi s'intéressent à un sujet spécifique et n'abordent pas la notion générale de problème de performance.

Notons que la notion du suivi des ressources a été amplement développée dans la littérature. On retrouve en effet de nombreux articles portant sur ce sujet et même plus largement sur le suivi de la chaîne d'approvisionnement. Dans ces articles, on retrouve le problème de performance lié à une gestion des ressources défectueuses et les solutions technique et technologique pour améliorer la

situation. C'est le cas de Kasim et al. (2019) ou Ghanem et AbdelRazig (2006) qui proposent des technologies pour effectuer un suivi et une localisation des ressources sur le chantier et avant l'arrivée du chantier. Les quelques auteurs identifiants des technologies pour résoudre le problème général de non-performance ne précisent pas leur utilisation. Khoiry et al. (2018) utilise le terme « d'outil de suivi » et des logiciels « Primavera et MSP ». Ces logiciels ne sont par ailleurs pas des outils de suivi, mais des supports informatiques pour effectuer ce suivi. On les considérera davantage comme des outils de gestion.

Pour des sujets bien spécifiques, on retrouve donc des technologies associées au problème soulevé. Mais de manière intégrée, la recherche connaît des lacunes. De plus, l'identification des technologies pour mesurer et suivre les indicateurs de performance n'étant pas effectués l'effort pour générer ces indicateurs et les mettre à jour n'est pas considéré dans la littérature scientifique.

Lorsque nous nous intéressons aux solutions de gestion permettant d'améliorer la performance sur le chantier, les articles ne mentionnent pas de moyens concrets. On observe dans la majorité des articles une liste de recommandations en fonction du critère de performance observé. Ces recommandations sont plus ou moins précises sur les bonnes façons de faire. Les recommandations les plus précises sans s'intéresser à un critère particulier proviennent des articles de Elhaniash et Stevovic (2016) et Olawale, Yakubu et Sun (2010) avec 90 mesures d'atténuation. Ces derniers n'intègrent cependant pas de vision technologique. Cet exemple peut être généralisé aux auteurs s'intéressant d'abord aux problèmes : les sources de non-performances. Ces auteurs mettent en place des recommandations très globales sur les bonnes manières de faire, mais ne donne pas d'information complémentaire pour atteindre ce niveau. Parce qu'il n'existe pas de processus et technologies de suivi et mesure de la performance, les auteurs sont dans l'impossibilité de proposer des solutions de gestion technologique. Ces dernières ayant besoin de données. Certains auteurs comme Khoiry et al. (2018) ou Lessing et al. (2017) mentionnent l'utilisation du BIM pour améliorer cette gestion de la performance. Le BIM est l'unique méthode ou technologie apportant une vision moderne de la gestion de la performance. Cependant le BIM n'est pas une solution en tant que telle. Le BIM permettra en effet d'améliorer le partage des informations, mais il repose principalement sur un modèle numérique du chantier. Beaucoup de facteurs de non-performance ne peuvent pas intégrer le BIM par manque de maturité et principalement par manque de données. Ces articles ne mentionnent pas ou très peu la façon dont ces données vont intégrer le BIM. Une fois de plus, les recommandations ne sont pas précises, techniques ou technologiques.

2.5 Conclusion

La performance des chantiers de construction est étudiée depuis plusieurs dizaines d'années. Les sources de délais ont été répertoriées par de nombreux auteurs. En effet, les retards ne peuvent être réduits si leurs causes sont identifiées. Cette revue de littérature porte à la fois sur les causes de délais et plus généralement de non-performances, les outils de suivi et les solutions identifiées par la littérature pour améliorer leur gestion. Malgré une identification complète depuis plusieurs années des facteurs de délais, ces derniers sont toujours présents dans ce domaine et restent identifiés comme étant une source de délais année après année. On remarque donc qu'il n'y a pas eu beaucoup d'améliorations. La gestion de la performance se retrouve bloquée par un manque de suivi et mesure de ces performances. La littérature n'aborde pas de façon intégrée l'identification des indicateurs de performances et les technologies requises pour les capter. Conséquemment, l'effort et la capacité de les générer et de les mettre à jour ne sont jamais considérés. La présente recherche portera ainsi sur ce manquement observé dans la littérature.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Le chapitre 3 présente les objectifs de recherche répondant à la problématique d'amélioration du suivi et de la gestion de la performance. Par la suite, la démarche scientifique utilisée pour réaliser la recherche sera présentée.

3.1 Objectifs de recherche

L'objectif principal est d'**élaborer une structure intégrée d'indicateurs de performance pour l'établissement d'un pronostic de succès sur les activités d'exécution**. Ce pronostic de succès sera sous la forme d'un indicateur appelé « indicateur de succès ». Ce dernier doit fournir un pronostic de succès sur une tâche ou un lot de tâches. Concrètement, le gestionnaire de projet ou la personne utilisant cet indicateur pourra savoir s'il y a des problèmes à venir sur l'activité observée. L'indicateur donnera uniquement des informations sur certains éléments. Un indicateur de succès favorable sur une activité n'implique pas que l'activité se déroule sans incident. En effet, certains éléments extérieurs peuvent intervenir pendant son déroulement sans pouvoir le prévenir. Par ailleurs, il est important de souligner que l'indicateur de succès prend en compte plusieurs sous-indicateurs. Ces derniers observent un élément précis. Par exemple, un sous-indicateur peut observer la présence des ressources matérielles.

Pour répondre à l'objectif principal, nous avons déterminé trois objectifs de recherche :

- Objectif de recherche 1 : déterminer les sources de non-performance impactant le chantier de construction;
- Objectif de recherche 2 : identifier les données nécessaires à l'alimentation des indicateurs en fonction de l'horizon d'observation;
- Objectif de recherche 3 : déterminer comment collecter les données nécessaires en identifiant des technologies 4.0 lorsque c'est possible;
- Objectif de recherche 4 : mesurer l'applicabilité du modèle en entreprise.

3.2 La Méthodologie DRM

Pour cette recherche de solution innovante permettant l'amélioration des processus de gestion de la performance, nous avons privilégié une approche mixte, à la fois empirique et expérimentale. La notion de recherche empirique faite se base sur des éléments factuels, formels. C'est le cas de la majorité des articles cités dans la revue de littérature, basé sur une étude formelle des facteurs de délais dans les pays étudiés. La partie expérimentale se rapproche dans notre cas à l'observation dans l'entreprise partenaire. Nous utiliserons donc la littérature pour déterminer les critères de performance ou encore les technologies applicables à la collecte des données. Mais nous travaillerons également avec l'entreprise partenaire pour valider ces résultats et acquérir des connaissances sur les données et processus présents sur un chantier de construction. Blessing et Chakrabarti (2009) proposent une démarche similaire connue sous le nom de DRM (Design Research Methodology). Cette démarche est principalement basée sur la réalisation d'itérations dans la recherche de solutions. La méthode propose une connexion entre ces itérations et l'approfondissement de la connaissance issu de l'approche empirique, d'où l'appellation « expérimentale ».

La notion de Design soulevé par les auteurs a un sens très large. Ils font référence aux activités qui développent ou génèrent un produit issu d'un besoin, d'une idée ou d'une technologie. Par ailleurs, les auteurs soulignent que le terme « produit » ne se résume pas à un objet industriel. Dans notre cas, la structure intégrée que nous cherchons à développer s'inscrit donc dans cette élaboration d'un produit répondant à un besoin. Ce besoin étant l'intégration de l'industrie 4.0 pour améliorer la performance de l'industrie de la construction.

Les auteurs proposent cette méthode pour répondre à trois problèmes observés dans la recherche :

- Le manque de vue d'ensemble des recherches existantes ;
- Le manque d'utilisation des résultats issue de la pratique ; et
- le manque de rigueur scientifique.

Cette démarche a donc été mise en place pour aider les chercheurs à structure leurs études de manière rigoureuse.

La démarche DRM est constituée de 4 phases :

- La définition du sujet : c'est une phase de clarification de la recherche. Le but étant de savoir quelle direction la recherche va prendre et de définir des objectifs.
- L'étude descriptive I : l'objectif est de comprendre le sujet et les facteurs influençant les critères précédemment définis.
- L'étude normative : cette phase a pour objectif la génération d'un scénario de la situation souhaitée, la situation idéale.
- L'étude descriptive II : lors de cette étape, on évalue l'application de la méthode développée dans la phase précédente.

Dans la démarche DRM, il est très courant d'effectuer les retours en arrière pour réadapter une des phases. Cette méthode est parfaitement adaptée à notre étude. En effet, cette dernière cherche à mettre en place une solution pour améliorer la performance des chantiers. La recherche sera donc faite conjointement avec une entreprise de la construction pour recueillir les informations manquantes dans la littérature. La Figure 3.1 ci-dessous présente la méthodologie DRM associée à cette étude.

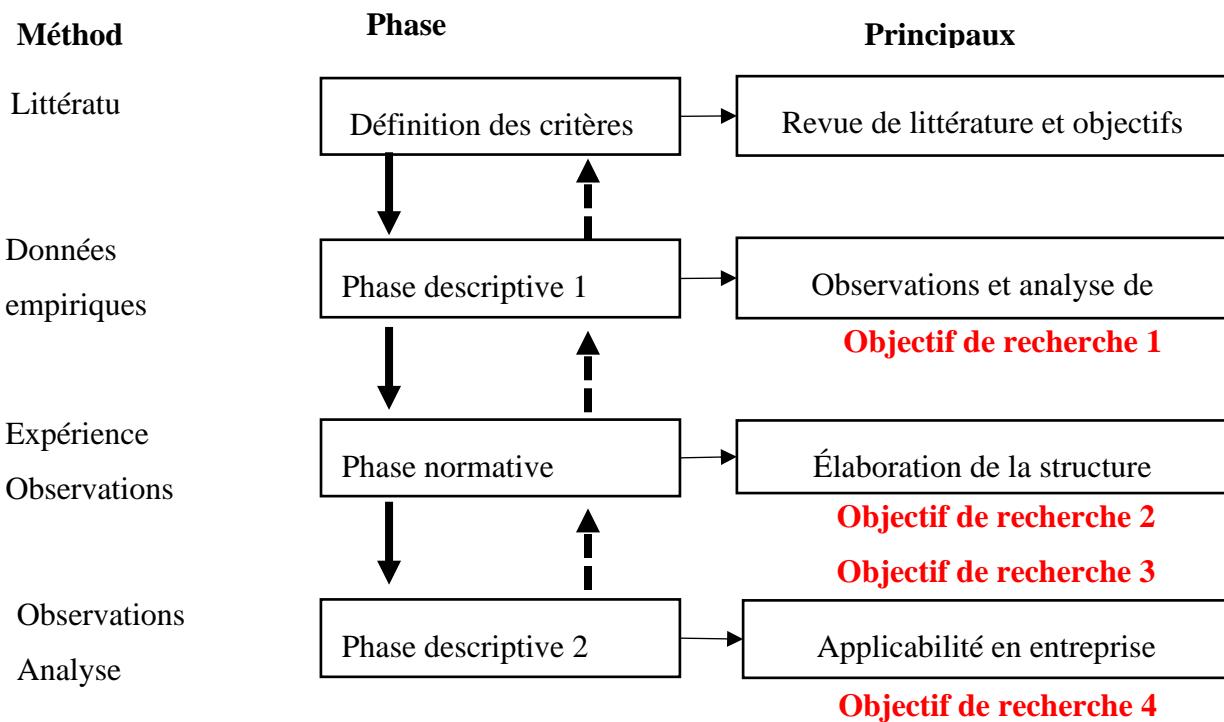


Figure 3.1 – Méthode DRM appliquée au sujet de l'étude

Nous allons maintenant détailler la démarche utilisée pour répondre à chaque objectif de recherche.

3.3 Démarche détaillée

La phase 1 de la démarche présentée dans la Figure 3.1 ci-dessus correspond au chapitre 2 de ce mémoire. La revue de littérature établie dans cette première phase sera utilisée dans les autres phases, en particulier la phase 2.

3.3.1 Phase descriptive 1 : Analyse de l'existant

L'objectif de recherche n°1 consiste à déterminer les sources de non-performance impactant le chantier de construction. Cet objectif est réalisé en étudiant deux aspects différents en parallèle : le théorique et la pratique. L'utilisation de cette méthode permet de se rapprocher de la réalité et des besoins concrets de l'entreprise partenaire. En effet, nous effectuerons également un cas d'étude avec cette entreprise pour leur proposer des recommandations personnalisées. Cette démarche s'inscrit parfaitement dans la méthode DRM associant les observations et données empiriques.

Du point de vue théorique, nous utilisons les données et sources de non-performance issues de la revue de littérature. Rappelons que cette dernière relève 43 facteurs classés dans 9 catégories thématiques, tels que proposés dans la revue de littérature (section 2.3.1.2.3). Toutes ces sources de non-performance peuvent être identifiées comme étant une opportunité d'action et d'amélioration au sein d'entreprise de construction. Pour ce faire, un cadre d'analyse sera développé afin de déterminer l'impact de chaque facteur sur un projet de construction. On s'intéressera à l'impact sur la période du cycle de vie du projet et les critères de décision touchés. Ce cadre est détaillé dans la suite de ce mémoire section 4.2.3.

Du point de vue pratique, l'objectif est de déterminer les sources de non-performances réellement observées dans l'entreprise partenaire, mais également de connaître leurs façons de faire. Ces observations permettront de valider les facteurs de non-performance issus de la littérature. Nous avons donc réalisé des entretiens semi-structurés avec quatre responsables de projets et un ingénieur de chantier de l'entreprise partenaire (Tableau 4.1). Ces entretiens étaient guidés pour mener à des pistes de discussion avec la personne interrogée. Les questions ont évolué au fil des entretiens, en fonction des réponses et des problématiques dégagées par les entrevues précédentes. Chaque projet de construction ayant sa singularité, des entretiens semi-structurés étaient une

méthode pertinente pour identifier les sources de non-performance sur un chantier. De plus, grâce à cette méthode nous avons également obtenu des informations sur les façons de faire, les besoins particuliers et les avis des personnes interrogés sur toutes ces informations. En complément de ces entretiens, une observation de 4 jours *in situ* de la réunion POD (planning of the day) a été réalisée afin d'observer l'évolution et la prise de décision concernant des problèmes sur le chantier.

Pour répondre à cet objectif n°1, les sources de non-performance issues des entretiens ont été classées par rapport aux 43 facteurs théoriques que nous avons identifiés. Cette classification est présentée section 4.2.2. Les sources de non-performance sont identifiées par un code couleur en fonction de si elles réfèrent uniquement aux chantiers de civil, uniquement aux chantiers de bâtiment, ou aux deux cas. A la suite de cette étape, nous reviendrons sur chacune des catégories de facteurs pour analyser les méthodes et façons de faire de l'entreprise partenaire. Cette étape permettra par la suite de créer le modèle théorique de données nécessaires à l'élaboration de la structure intégrée. Ces informations relatives à leur processus permettront de connaître quelles informations sont documentées ou non et la manière dont ces processus sont réalisés ou de quelle manière les données sont collectées.

3.3.2 Phase normative

3.3.2.1 Élaboration du modèle de données

L'objectif n°2 consiste à identifier les données nécessaires à l'alimentation des sous-indicateurs en fonction de l'horizon d'observation. Rappelons que chaque sous-indicateur alimentera l'indicateur de succès. Par exemple, le sous-indicateur « condition météorologique » viendra vérifier que les conditions météo sont adaptées aux besoins de l'activité. Cette information sera transmise à l'indicateur de succès principal.

Chaque sous-indicateur a pour but de répondre à une ou plusieurs problématiques. Ces problématiques sont issues des sources de non-performance. Les informations ou données que le sous-indicateur doit récupérer peuvent évoluer en fonction de l'horizon ou la portée d'observation de l'activité. Par exemple, la donnée à récupérer concernant des matériaux pour une activité à 2 semaines ne sera pas la même qu'une activité le jour même. Par ailleurs le moyen de capter des données ne sera pas le même en fonction de l'horizon du pronostic. Un pronostic à court terme se rapprochant du temps réel pourra être alimenté grâce à des technologies 4.0. Un pronostic sur du

plus long terme sera alimenté grâce à des connexions de données issues de sources plus traditionnelles comme l'ERP par exemple.

Cet objectif s'inscrit déjà dans l'élaboration de la structure finale. On retrouvera donc la réalisation de cet objectif dans le Chapitre 5 destiné à l'élaboration de la solution.

3.3.2.2 Identification des technologies et moyens d'acquisition

L'objectif n°3 est le dernier point avant d'atteindre la finalité de la structure intégrée. Cet objectif consiste à déterminer comment collecter les données nécessaires en identifiant des technologies 4.0 lorsque c'est possible.

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'implication des technologies associées au 4.0 est relative au temps réel. Ces technologies impacteront donc les horizons d'observation très proche du temps réel. Mais cet objectif a également pour but de connaître comment les autres données, sur une portée plus lointaine, pourront être récupérées. On s'intéresse ici à la question : où et comment récupérer cette donnée ?

De la même manière que l'objectif précédent, nous répondrons à celui-ci également dans le Chapitre 5 lors de l'élaboration de la solution. C'est à la suite de cela que nous obtiendrons la structure complète.

Cette structure permettra d'identifier les différents sous-indicateurs, les connexions entre ces derniers et les moyens de capter ou récupérer les informations nécessaires. Cette solution technologique permettrait à terme de connecter un grand nombre d'entités et d'informations pour simplifier, automatiser et éviter des erreurs pouvant être prévenues. En effet, le milieu de la construction est parsemé d'obstacles inattendus auxquels les gérants de chantier doivent faire face quotidiennement. Si un grand nombre d'informations était réuni et qu'une partie était automatisée dans leur collecte et leur mise à jour; les oubliés ou erreurs qui auraient pu être prédis le seront. Il sera ainsi possible de prendre des mesures correctives suffisamment tôt pour ne pas impacter le chantier et les critères performance (temps, coût, qualité, sécurité).

3.3.3 Phase descriptive 2 : Applicabilité du modèle

Le dernier objectif de recherche consiste à évaluer l'applicabilité du modèle. Cette étape consistera à comparer la structure intégrée d'indicateurs de performance avec le cas de l'entreprise partenaire.

Les données planifiées et les données réelles seront comparées pour évaluer la maturité de l'entreprise partenaire concernant l'adoption d'une structure intégrée de ce type. Par ailleurs, les connexions entre les informations seront également observées chez le partenaire industriel. Il sera ainsi possible de comprendre les différences entre la structure théorique et le fonctionnement actuel du partenaire. C'est à travers un diagramme d'entité-relation calqué sur le diagramme théorique que nous observerons ces différences.

3.4 Conclusion

Ce mémoire s'appuie donc sur quatre objectifs de recherche pour répondre à l'objectif général consistant à la mise en place d'une structure intégrée d'indicateur de performance pour le pronostic des activités d'exécutions. C'est en suivant la méthodologie DRM développée par Blessing et Chakrabarti (2009) que cette recherche sera effectuée. Cette méthodologie permet de combiner les approches empiriques et expérimentales de manière rigoureuse. La présente étude étant basée à la fois sur la littérature scientifique et la réalité du terrain grâce au partenaire industriel, cette approche DRM est particulièrement pertinente. Les différentes étapes mentionnées précédemment seront développées dans la suite de ce mémoire.

CHAPITRE 4 ANALYSE DE L'EXISTANT

4.1 Introduction

Ce chapitre s'inscrit dans l'atteinte de l'objectif de recherche n°1. Rappelons que cet objectif a pour but l'identification des sources de non-performances sur un chantier de construction. Cette identification est nécessaire pour la suite de l'étude; elle permettra d'établir la liste des indicateurs à étudier. En effet, ces indicateurs seront la base de la structure intégrée d'indicateurs de performance.

Pour effectuer cette analyse, nous allons utiliser deux moyens. La littérature scientifique, à travers les résultats de la revue de littérature, sera utilisée pour connaître les facteurs de non-performances à étudier. Pour nous rapprocher davantage de la réalité, nous étudierons les besoins de l'entreprise partenaire en parallèle. Les résultats de ces deux recherches seront ainsi comparés et permettront d'établir le support d'étude pour le reste de cette recherche. L'analyse des besoins de l'entreprise partenaire a été effectuée en réalisant des entrevues avec des membres de l'entreprise. Au total, six chefs de projet ont été rencontrés en entretiens, ainsi qu'un ingénieur de projet. Ces entretiens étaient de type semi-structure. Une partie des questions étaient les mêmes, et servaient principalement à mener le répondant à parler de ses problèmes et de son point de vue sur le sujet. Cette approche est régulièrement utilisée et recommandée dans le cas où un chercheur vise à obtenir des informations sur un phénomène peu ou mal compris (approche inductive), par opposition à une approche qui viserait à tester des hypothèses initialement tirées de la théorie (approche déductive). Les résultats de ces entretiens permettent de valider les facteurs de non-performance identifiés dans la littérature. Par ailleurs, ces observations sur le terrain permettent également d'obtenir des informations sur le déroulement des opérations dans l'industrie de la construction.

4.2 Facteurs issus des entretiens et observations

4.2.1 Panel étudié

Les personnes interrogées ne l'ont pas été en considérant uniquement le chantier dont elles étaient responsables au moment de l'entretien, mais également sur leur expérience globale liée à la problématique étudiée. Les entretiens ayant été effectués pendant la session d'hiver, le type d'activité possible s'en retrouve grandement limité. Par ailleurs, nous sommes particulièrement

intéressés aux projets de type « civil », car l'entreprise partenaire possède sa force propre, contrairement au domaine du bâtiment. Cet intérêt particulier pour le civil découle également de la possibilité de formuler des recommandations auprès de l'entreprise partenaire. Le Tableau 4.1 ci-dessous résume les différents membres de l'entreprise ayant été interrogés.

Tableau 4.1 – Détails des personnes interrogées pour les entretiens semi-structurés

Chantier	Poste	Type de chantier
Chantier 1	-Chef de projet	Civil
Chantier 2	-Chef de projet	Civil
Chantier 3	-Chef de projet -Ingénieur projet	Civil
Chantier 4	-Chef de projet	Bâtiment

Comme nous l'avons précisé dans la méthodologie, la visite du chantier 1 nous a permis de participer pendant 4 jours d'affilée aux réunions de coordination quotidiennes. Ces réunions regroupent toutes les parties prenantes du chantier. De manière non exhaustive : le chef de projet, le sous-gérant, le responsable SST (santé-sécurité), le surintendant, les ingénieurs, le responsable logistique, etc. La participation à ces réunions POD (planning of the day) a permis d'observer les problèmes et leurs résolutions.

Par ailleurs, un responsable de projet spécial et également un contact privilégié dans l'entreprise partenaire ont répondu à plusieurs questions sur le fonctionnement général des projets de construction.

4.2.2 Résultat des entretiens et classification

La classification des non-performances a été effectuée grâce à la littérature scientifique. Les résultats des entretiens et les sources de non-performance révélées ont donc été classés de la même manière, dans les 9 catégories identifiées. Ces entretiens sont qualitatifs : on cherche à déterminer et comparer la réalité par rapport à la littérature scientifique. On ne classera donc pas les sources de délais par nombre d'occurrences. Par ailleurs certaines d'elles ont été regroupées pour n'en former qu'une. Le Tableau 4.2 ci-dessous présente les facteurs de non-performance issus des entretiens. On différenciera les facteurs propres au civil en vert; ceux propres au bâtiment en rouge et ceux identifiés dans les deux domaines en noir. Ces derniers sont largement majoritaires.

Tableau 4.2 – Résultat des entretiens semi-structurés

Catégories issues de la littérature	Facteurs issus des entretiens semi-structurés
Facteurs externes	
Mauvaises conditions économiques (fluctuations des prix)	<ul style="list-style-type: none"> - Coût des matières premières, en particulier l'acier.
Conditions météorologiques	<ul style="list-style-type: none"> - Condition météo : peut limiter 25 à 50% de la productivité
Lois, règlements (et règles de sécurité)	<ul style="list-style-type: none"> - Réglementation sur les horaires d'activité
Condition du site (principalement l'état du sol ; obstructions)	<ul style="list-style-type: none"> - Obstacles non prévus. Généralement imprévisible ou manque de qualification de la personne en charge.
Permis de construire	<ul style="list-style-type: none"> - Attente d'autorisations
Vandalisme	
Exposition au public	<ul style="list-style-type: none"> - Manifestation contre le chantier
Corruption	<ul style="list-style-type: none"> - Peur d'accusation de corruption non-fondée
Ressources humaines	
Manques de qualification	<ul style="list-style-type: none"> - Mauvais choix du sous-traitant/entrepreneur impactant la qualité et la durée - Pénurie de main-d'œuvre qualifiée - Maître d'œuvre non qualifié. - Manque de disponibilité des ingénieurs/concepteurs
Faible productivité	<ul style="list-style-type: none"> - Elle n'est généralement pas mesurée
Manque de protections individuelles/collectives (Équipements et formations)	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en danger par non-respect des règles prescrites. (Dangers identifiés) - Non-port des équipements de sécurité
Re-Works (Humain)	<ul style="list-style-type: none"> - Manque de qualifications des ouvriers
Manque de supervision des ouvriers (mauvaise répartition)	

Tableau 4.2 – Résultat des entretiens semi-structurés (suite)

Catégories issues de la littérature	Facteurs issus des entretiens semi-structurés
Équipements	
Manque d'équipement (machines et leurs pièces)	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de réponses d'un sous-traitant - Répartition à très court terme, peu de marge de manœuvre en cas de problème (Civil)
Pannes (équipement ; manque d'entretien)	<ul style="list-style-type: none"> - Bris d'équipements critiques
Manque de logiciels appropriés	<ul style="list-style-type: none"> - Logiciel de gestion inadapté, redondance de tâches : utilisation d'Excel
Mauvais choix d'équipement (inefficace)	
Retard dans la fourniture des services (eau, électricité, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> - Manque de prévision des raccordements nécessaires - Négligence des équipements critiques (Civil)
Matériaux	
Pénurie de matériaux de construction sur le chantier	<ul style="list-style-type: none"> - Mauvaise prise en compte des priorités - Livraison incomplète : fréquent pour le béton - Mauvaise gestion de l'échéancier par les entrepreneurs (Bâtiment)
Re-Works (non approprié/utilisé à mauvais escient)	
Mauvaise qualité (matériel/stockage/approvisionnement)	<ul style="list-style-type: none"> - Non-respect du cahier des charges (Bâtiment)
Finance	
Retard de paiement pour les travaux achevés	<ul style="list-style-type: none"> - Retard de paiement d'un fournisseur (très rarement)
Mode de financement et de paiement des travaux achevés	<ul style="list-style-type: none"> - Longueur sur le paiement, attente d'être payé d'abord pour ensuite pouvoir payer (Bâtiment).

Tableau 4.2 – Résultat des entretiens semi-structurés (suite)

Catégories issues de la littérature	Facteurs issus des entretiens semi-structurés
	Management
Mauvaise communication et coordination entre les parties prenantes	<ul style="list-style-type: none"> - Intégration d'une partie prenante tierce pour qui ce chantier n'est pas une priorité - Manque de visibilité des échéanciers des parties prenantes - Mauvaise communication entre les responsables
Mauvaise gestion et supervision du site	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de suivi avec le garage de l'entreprise (Civil) - Gestion des coûts chronophage - Gestions des factures inadaptées, manque de visibilité avec l'outil actuel
Lenteur dans la prise de décisions (attente d'informations)	<ul style="list-style-type: none"> - Attente de devis
Gestion et contrôle déficients des activités (négliger les activités critiques)	
Litiges contractuels (désaccord ; malentendu)	<ul style="list-style-type: none"> - Litiges contractuels récurrents
Changement fréquent de sous-traitants	
	Caractéristiques du projet
Planification déficiente des activités	<ul style="list-style-type: none"> - Négligence des besoins en équipements critiques - Mauvaise planification : surprises évitables
Complexité	<ul style="list-style-type: none"> - Type de contrat
Accident dû à une activité risquée	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en danger par non-respect des règles prescrites - Non-port des équipements de sécurité
Méthodes de construction inappropriées	

Tableau 4.2 – Résultat des entretiens semi-structurés (suite et fin)

Catégories issues de la littérature	Facteurs issus des entretiens semi-structurés
Documents techniques	
Ordres de modification (Client)	<ul style="list-style-type: none"> - Changement de design ou caractéristique
Documents incomplets	<ul style="list-style-type: none"> - Perte des documents à la suite des nombreuses parties prenantes impliquées (paiement) - Documents incomplets, non vérifiés - Documents manquants (Bâtiment)
Erreurs de conception	<ul style="list-style-type: none"> - Plans erronés
Délais pour les documents techniques (et l'approbation)	<ul style="list-style-type: none"> - Obtenir les documents techniques à temps - Besoin de l'accord d'un ingénieur pour une modification de matériel (Civil) - Délais d'approbation de la méthodologie de travail (Civil)
Complexité	
Mauvaise qualité/conception (peu claire)	<ul style="list-style-type: none"> - Manque d'assiduité pour les check-lists ou test à effectuer sur les activités majeures
Comportements humains	
Relation d'équipe (conflits personnels : sociaux/culturels)	<ul style="list-style-type: none"> - Mauvaise entente des responsables nuisant à la bonne communication
Litiges/grèves	<ul style="list-style-type: none"> - Litige sur la qualité des travaux entre entrepreneurs (Bâtiment)
Motivation des employés	

Ces résultats montrent que la théorie à travers les sources de non-performances identifiées dans la littérature scientifique concordent avec la réalité de la situation dans l'entreprise partenaire. Par ailleurs, ces résultats permettent également d'avoir des cas concrets et explications de situations se présentant lors d'un chantier de construction.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la gestion des projets de civil et du bâtiment ne s'effectue pas de la même manière. L'entreprise partenaire ne travaille pas sur les chantiers de bâtiment avec leur force propre. On observe ainsi des problématiques différentes sur certains points, en particulier la gestion des ressources humaines et matérielles sur lesquelles ils ont moins de visibilité actuellement ou encore la gestion documentaire.

4.2.3 Informations complémentaires issues des entretiens

Dans l'objectif de détailler les informations du tableau et les façons de faire de l'entreprise partenaire, revenons sur les 9 catégories thématiques abordées pendant les entretiens. Dans cette section nous détaillons avec de nouvelles informations les facteurs identifiés pendant les entretiens. Ces informations sont complémentaires et permettent de comprendre certaines priorités, lacunes ou méthode de l'entreprise partenaire. Ces informations sont nécessaires à l'élaboration du modèle de données afin de connaître ce qui est documenté ou non. En effet, pour mettre en place l'indicateur de succès, il faut comparer une situation actuelle avec la situation planifiée ou désirée.

Facteurs externes : Dans le bâtiment, la météo est un élément critique jusqu'à la mise en place de l'étanchéité. Jusqu'à cette phase, de la même manière que le civil, la météo joue un rôle prépondérant. Il faut la surveiller continuellement en fonction des activités prévues pour éventuellement réajuster le plan. Les conditions météorologiques nécessaires au bon déroulement d'une tâche sont documentées, mais ne sont pas exigées. Les chantiers de construction sont régulièrement source de préjudice ou d'accusation de corruption sur les soumissions. Cette crainte d'accusation de corruption ralentit les prises de décision lors d'un projet public.

Ressources humaines : Les ressources humaines est une problématique principalement observée dans le civil, car l'entreprise partenaire travaille avec sa force propre. Cependant dans le bâtiment, même s'ils ne sont pas directement responsables de ces ressources, la problématique existe indirectement à travers les entrepreneurs spécialisés. La connaissance des qualifications de chacun est suivie pour des raisons principalement sécuritaires. Mais l'information existe. Par ailleurs les mesures de santé et sécurité sont également documentées pour le chantier en général et pour les activités individuelles également. Une politique de zéro accident est en place dans l'entreprise partenaire. Dans le bâtiment et le civil, le choix des entrepreneurs, fournisseurs, sous-traitant est souvent réglé par la politique du plus bas soumissionnaire. Cependant dépendamment de la tâche et de sa criticité, il est possible de choisir l'entreprise désirée. Il faut donc connaître la criticité des tâches pour calculer le risque. Par ailleurs le recensement des entreprises n'est pas partagé efficacement entre les différents projets. Comme nous l'avons déjà mentionné, l'expérience des gérants est primordiale pour un bon fonctionnement.

Équipement : La gestion des équipements s'effectue particulièrement sur les chantiers civils. La majorité des équipements appartiennent à l'entreprise partenaire et sont gérés via un garage. Ce dernier n'a pas de vision sur l'utilisation quotidienne des équipements sur les chantiers. Ils sont fournis selon un échéancier planifié. Les équipements spéciaux ou lourds sont gérés à l'interne du projet de construction et ne passent pas par le garage. Une fois de plus, le choix du fournisseur dépend du gérant ou du responsable et de son expérience. La criticité des équipements est documentée, mais c'est aux responsables du chantier de gérer leurs quantités et leur approvisionnement. Les besoins d'équipements sont documentés dès la planification du projet.

Matériaux : La gestion et l'achat des matériaux sont effectués à l'interne du chantier de construction dans le civil. Les besoins en matériaux sont documentés dès la planification du projet. Cependant certaines quantités doivent être revues pendant la construction pour donner suite à des modifications ou imprévus du terrain. Par exemple, dans les contrats publics, les soumissions sont effectuées sur les quantités estimées. Dans le bâtiment, il est du devoir de l'entrepreneur de respecter le contrat et les dessins d'atelier.

Finance : Les problèmes liés aux paiements sont rares, mais plus récurrents dans le bâtiment. En effet, le paiement d'un entrepreneur spécialisé s'effectue lorsque l'entreprise partenaire à elle-même été payée. Avec les délais de paiement et les intermédiaires, certains paiements peuvent être très longs et parfois trop longs pour des entrepreneurs ayant investi beaucoup d'argent dans le chantier.

Management : L'intégration de la tierce partie prenante au projet est toujours source de complication. Si cette dernière n'est pas prise en compte suffisamment tôt elle peut être une source importante de délais. C'est le cas par exemple lors d'une mauvaise planification d'obstacle sur le chantier. Le besoin d'intégrer une partie prenante tierce est donc nécessaire pour effectuer un déplacement d'équipement. Cependant le chantier de construction n'est pas la priorité de cette tierce partie et peu donc créer des délais. Il est donc important de prévoir leur implication. Les échéanciers des parties prenantes intégrées au projet ne sont pas connus ou difficilement accessibles par les responsables du projet. Dans le civil, une réunion quotidienne permet de clarifier les problèmes rencontrés et de planifier les jours à venir. L'échéancier est mis à jour toutes les semaines pour les trois semaines à venir.

Caractéristiques projets : Tous les aspects administratifs du projet de construction sont standardisés par l'entreprise partenaire. En début de projet, la planification est complète : les points d'inspection de qualité sont documentés sous forme de jalon; les méthodologies de travail sont établies principalement pour se protéger d'un litige contractuel. Tous ces documents sont validés par le client ou toute autre partie prenante avant le lancement du projet.

En fonction de la taille du projet, les responsabilités sont réparties différemment. Un chantier d'envergure nécessitera une personne responsable de la qualité et une autre des achats, fournisseurs. Dans un plus petit chantier, ces activités seront supportées par le gérant ou surintendant.

Documents techniques : La gestion documentaire est moins linéaire sur un chantier du bâtiment que sur un chantier de civil. Beaucoup d'éléments en parallèle entrent en jeu. Cette gestion documentaire est donc un élément plus critique que sur un chantier de civil ou les activités sont plus linéaires. Il existe un système pour la gestion des dessins, mais ce dernier ne permet le suivi que d'un dessin transmis. Un dessin nécessaire non transmis ne sera pas détecté. Cependant l'information a été créée lors de la soumission. La gestion du changement est très relative au type de changement. La principale difficulté pour l'entreprise partenaire est de ne pas être responsable des délais engendrés ou surcoûts lorsque le changement vient du client. D'autres changements peuvent apparaître en cas d'erreur ou d'omission d'un entrepreneur ou sous-traitant. Il arrive que omissions soit remarqué trop tard et engendre un délai et surcoût.

Comportements humains : Les interactions humaines sont rarement des sources de non-performance. Les chantiers de construction étant majoritairement basés sur le contact humain et l'expérience, il est primordial que les principaux responsables du projet s'entendent bien et aient une bonne communication. En revanche une mauvaise formation ou utilisation des ressources ou processus peut-être une source de non-performance.

4.3 Conclusion

L'analyse de l'existant a permis de soulever les éléments clés décrivant le fonctionnement des chantiers de construction dans l'entreprise partenaire :

- Le fonctionnement d'un chantier de construction est effectué à l'interne du projet. Très peu d'éléments sont centralisés avec l'entreprise. Les projets de construction deviennent en quelque sorte des entreprises « quasi-autonomes » gérant leurs finances, leurs fournisseurs, leurs équipements, leurs sous-traitants, etc.;
- La clé de la réussite de ces projets de construction est l'expérience des responsables, leur connaissance du milieu, des sous-traitants, des problèmes rencontrés, etc.; et
- les projets sont planifiés de manière rigoureuse. En effet, les informations sont définies dès le début du projet. On connaît les besoins en matériaux, équipements, méthodologie de travail, point qualité à vérifier, règles de sécurité, etc.

Par ailleurs, ces entretiens ont permis de corréler presque l'ensemble des facteurs identifiés dans la littérature scientifique avec la réalité. Nous retiendrons donc que la recherche documentaire était pertinente et à l'image de la réalité. Nous pourrons donc nous appuyer sur ces résultats pour l'élaboration de la structure intégrée qui fait l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE 5 ÉLABORATION DE LA STRUCTURE INTÉGRÉE

5.1 Introduction

Le chapitre cinq constitue le cœur de cette étude avec l'élaboration de la structure intégrée d'indicateur de performance. Cette structure a pour mission de répondre au besoin industriel d'améliorer la gestion et le suivi de la performance des chantiers de construction. En effet, cette industrie connaît des difficultés pour rester compétitive. L'intégration des technologies et des concepts de l'industrie 4.0 pourrait contribuer à pallier ce besoin grandissant.

Ce chapitre sera décomposé en 4 parties. La première partie a pour but de réaliser le modèle de données nécessaire à l'alimentation des indicateurs que nous aurons sectionnés. Ainsi, une première étape consistera à déterminer les indicateurs à observer en fonction des facteurs de non-performance que nous avons identifiés précédemment. Certains facteurs trop haut niveau ou n'agissant pas sur des activités d'exécution ne seront pas considérés pour la mise en place des indicateurs. Dans un second temps, nous déterminerons les données nécessaires à l'alimentation des indicateurs retenus. Ces données seront divisées en deux parties : une partie des données planifiées et une autre sur les données réelles devant être acquises pendant le projet. Ces deux types de données doivent être définis pour pouvoir établir les indicateurs de performance. En effet, l'indicateur donne une information de performance actuelle ou à venir du projet en se référant à une situation idéale, planifiée. Cette situation doit donc être définie avant le projet ou du moins avant la réalisation de la tâche dans un horizon qui ne sera pas observé par les indicateurs.

La deuxième partie permettra l'identification des technologies et moyens d'acquisition des données réelles sur le chantier. Pour cette partie nous effectuerons une recherche bibliographique pour connaître le paysage des technologies 4.0 associées à la construction. Nous pourrons par la suite déterminer quelle technologie sera nécessaire à la captation des données. Rappelons que les toutes les données de la structure ne seront pas acquises via des technologies du 4.0. En effet, les données provenant d'un horizon d'observation plus lointain pourront être acquises avec des moyens plus traditionnels, en particulier le système ERP de l'entreprise.

Enfin, la dernière partie sera l'élaboration finale de la structure intégrée. Elle permettra en particulier l'observation des connexions nécessaires au fonctionnement de la structure intégrée. Elle sera représentée grâce à un diagramme « entité-relation » permettant l'affichage des données de chaque entité et les connexions entre elles. La Figure 5.1 ci-dessous résume la méthode d'élaboration de la structure.

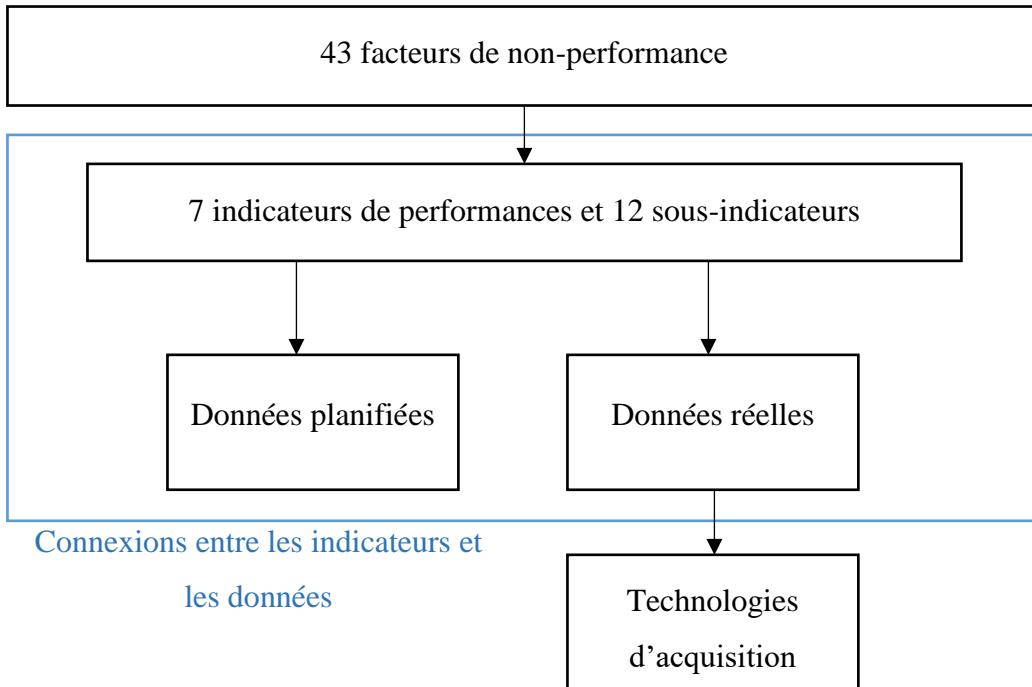


Figure 5.1 – Schéma méthodologique de l'élaboration de la structure intégrée

5.2 Identification des données

Les facteurs de non-performances ont été identifiés précédemment via la littérature scientifique que nous avons croisée avec des cas réels d'observation sur chantiers. Nous avons ainsi pu valider ces critères lors de l'analyse de l'existant Chapitre 4.

5.2.1 Identification des indicateurs de performance

Pour déterminer les indicateurs qui alimenteront le pronostic d'activité, nous utilisons les 43 facteurs de non-performance identifiés. Chaque facteur a été soit assimilé à un indicateur, soit rejeté du modèle de données. Ce rejet peut être dû à différentes raisons. Les principales raisons sont : la non-pertinence du facteur par rapport à la solution proposée, un facteur étant sous-jacent à un autre

ou encore un facteur agissant en dehors du cadre de l'activité d'exécution. Le détail de cette sélection est présenté dans un tableau en annexe C.

À la suite de cette sélection, 12 sous-indicateurs ont été générés puis intégrés à 7 indicateurs de performances généraux. Cette différentiation a été effectuée pour faciliter la visualisation de la structure intégrée. Les 7 indicateurs généraux correspondent principalement aux catégories des facteurs de non-performance. Ils sont présentés dans le Tableau 5.1 ci-dessous.

Tableau 5.1 – Indicateurs de performance généraux et sous-indicateurs

Indicateurs généraux	Sous-indicateurs		
Météo	Condition météo		
Ressources humaines	Qualification humaine	Productivité	Sécurité
Équipements	Disponibilité Équipement	État Équipement	
Matériaux	Disponibilité matériaux	Qualité matériaux	
Communication	Communication et coordination		
Gestion des documents	Documents techniques et autorisations	Règle de sécurité	
Avancement	Suivi et contrôle		

Les 12 sous-indicateurs sont intégrés à un indicateur général, mais ces derniers ne sont pas cloisonnés. En effet, de nombreuses connexions vont s'effectuer entre les différents indicateurs et les données qui leur seront nécessaires. Ces connexions seront établies à la section 5.4 de ce mémoire.

5.2.2 Détails des indicateurs

L'ensemble des indicateurs est spécifique à une activité d'exécution. Cette activité peut-être en cours ou à venir. Les indicateurs s'adaptent donc au niveau de la collecte des informations pour apporter une indication pertinente. La plupart des indicateurs de performance fonctionnent par jalon incrémentiel ou unités achevés (AACE, 2015).

- **Condition météo** : Comparaison des conditions nécessaires à la réalisation de la tâche avec la prévision ou les conditions actuelles.
- **Qualification humaine** : Comparaison ou validation des qualifications des employés ou parties prenantes pour l'exécution de l'activité.

- **Productivité** : Valeur de productivité des employés sur l'exécution d'une tâche. Cet indicateur nécessite également une comparaison en fonction de la tâche exercée.
- **Sécurité** : Cet indicateur regroupe l'aspect sécurité pour le contrôle des formations des personnes concernées, le port des protections et les autorisations.
- **Disponibilité Équipement** : Validation de la présence des équipements ou de l'atteinte du jalon planifié concernant l'approvisionnement.
- **État Équipement** : Statut de l'état de l'équipement observé.
- **Disponibilité matériaux** : Validation de la présence des équipements ou de l'atteinte du jalon planifié concernant l'approvisionnement.
- **Qualité matériaux** : Comparaison ou validation de la qualité des matériaux.
- **Communication et coordination** : Validation et statut des informations à transmettre.
- **Documents techniques et autorisations** : Statut des documents nécessaires aux jalons planifiés préalablement.
- **Règle de sécurité** : Cet indicateur visera à valider le respect des règles des sécurités sur le chantier.
- **Suivi et contrôle** : Taux d'avancement des tâches et contrôle de la qualité. Statut des activités aux jalons planifiés.

5.2.3 Modèle de données

Dans cette section, nous allons déterminer les données planifiées et réelles nécessaires à l'alimentation des indicateurs. Rappelons que chaque indicateur découle d'un ou plusieurs facteurs de non-performance. Ainsi, une analyse causale a été effectuée sur les facteurs concernés pour comprendre l'origine de la non-performance. Cette analyse a permis de savoir quelles informations seront nécessaires à acquérir à la fois pendant la planification et la construction. Pour effectuer cette analyse, la synthèse des facteurs de non-performance issue de la littérature (voir Annexe D) ainsi que la synthèse des entretiens semi-structurée (voir section 4.2.2) ont été utilisées. Le Tableau 5.2 ci-dessous présente les résultats de l'analyse causale rapportée aux indicateurs et les données identifiées comme nécessaires pour chacun des 12 sous-indicateurs.

Tableau 5.2 – Modèle de données de la structure intégrée

Indicateurs	Causes de non-performance	Données planifiées	Données réelles
Condition météo	-Condition météo inadaptée -mauvaise gestion des aléas climatiques	Conditions nécessaires	Conditions à venir Conditions actuelles
Règles de sécurité	-non-connaissance des règles -non-contrôle	Listes des règles	Check liste
Qualification humaine	-non-connaissance des qualifications -Pénuries de ressource qualifiée -mauvaise répartition des ressources -Manque de connaissance des disponibilités	Niveau requis Quantité requise	Niveau réel Disponibilité
Productivité	-Ressource non qualifiée -Mesure réelle inadaptée -Niveau attendu inconnu	Attendues ¹	Estimation réelle
Sécurité	-Manque d'exigences planifiées -Formation inadaptée -Manque de contrôle - Manque de connaissance des activités risquées - Manque de contrôle et de suivi sécuritaire pendant l'exécution de l'activité	Lieu d'activité Liste équipements	Position réelle Équipements portés
Disponibilité des équipements	-mauvaise planification des besoins -Retard dans la commande -Retard du fournisseur -Retard de la livraison -mauvais suivi des équipements sur le chantier -mauvaise répartition des équipements -Équipement non efficace	Liste équipements Criticité Quantité requise Délais moyens d'obtention	Quantité réelle Position réelle Date de demande Statut de la demande

¹ La productivité n'a pas obligatoirement besoin d'une référence planifiée. Elle peut se calculer uniquement avec des données réelles. Cependant dans certains cas, en particulier dans la construction, la productivité peut varier de manière normale. C'est le cas lorsqu'une activité peut à la fois être linéaire ou non. Par exemple, la pose de pavés sur une ligne droite ou avec des angles. C'est pourquoi des productivités attendues peuvent être importantes.

Tableau 5.2 – Modèle de données de la structure intégrée (suite et fin)

Indicateurs	Causes de non-performance	Données planifiées	Données réelles
État d'équipement	<ul style="list-style-type: none"> -mauvaise planification des équipements critiques -manque d'entretien -Panne non contrôlée -Manque de processus défini en cas de panne - Non suivi de l'état de l'équipement 	<ul style="list-style-type: none"> Liste des pannes Actions correctives associées Temps moyen de réparation Temps entre chaque entretien 	<ul style="list-style-type: none"> Condition Durée d'activité Entretiens réalisés
Disponibilité des matériaux	<ul style="list-style-type: none"> -mauvaise planification des besoins -Retard dans la commande -Retard du fournisseur -Retard de la livraison -mauvais suivi des matériaux sur le chantier -mauvaise répartition des matériaux 	<ul style="list-style-type: none"> Liste des matériaux Quantité requise Criticité Délais moyens d'obtention 	<ul style="list-style-type: none"> Quantité réelle Position réelle Date de demande Statut de la demande
Qualité des matériaux	<ul style="list-style-type: none"> -manque d'exigences qualité lors de la planification -pas de contrôle qualité -Transport inadapté -Stockage inadapté 	Qualité requise	Qualité réelle
Communication et coordination	<ul style="list-style-type: none"> - Non suivi des informations à transmettre - Non-connaissance des informations à transmettre -Destinataires mal identifiés 	<ul style="list-style-type: none"> Parties prenantes Informations à transmettre 	<ul style="list-style-type: none"> Check liste Date de transmission Statut de lecture/décision
Suivi, contrôle des activités	<ul style="list-style-type: none"> - Manque de suivi d'avancement du site - Manque de coordination 	<ul style="list-style-type: none"> Liste des attentes Qualité et Conditions requises Jalons 	<ul style="list-style-type: none"> Avancement Validation des travaux
Documents techniques et autorisation	<ul style="list-style-type: none"> - Mauvaise planification des exigences - Manque de contrôle des documents - Non-connaissance des documents nécessaires -Délais supérieurs à la normale -mauvaise anticipation du délai -manque de qualification 	<ul style="list-style-type: none"> Listes des documents/autorisations Délais moyens d'obtention Niveau d'exigence 	<ul style="list-style-type: none"> Date d'envoi Statut Validation du document

On observe dans l'analyse causale que le problème de planification est présent dans tous les facteurs. En effet, comme nous l'avons déjà mentionné un problème de performance se réfère à une situation attendue, une situation planifiée. Si la situation planifiée est incorrecte ou inadaptée,

une déviance entre le réel et le planifié va apparaître. L'indicateur de performance indiquera donc un problème. C'est pourquoi il est important d'effectuer une planification complète.

5.3 Identification des outils et technologies d'acquisition

Après avoir identifié les indicateurs de performance et les données nécessaires, nous allons maintenant nous intéresser aux moyens et technologies de captation des données réelles. Cette étape sera la dernière avant la mise en place de la structure intégrée d'indicateur de performance.

5.3.1 Stratégie de recherche

Pour déterminer les moyens d'acquérir les données nécessaires, nous avons effectué dans un premier temps un état de l'art des technologies de l'industrie 4.0. Le BIM est apparu dans les recherches comme un élément central de la construction 4.0. En effet, dans les articles scientifiques concernant ce domaine, le BIM est presque sans exception mentionné par les auteurs. Le BIM n'est donc pas considéré comme une technologie en tant que telle, mais comme une entité centrale aux concepts de la construction 4.0. Pour filtrer les articles concernant cette quatrième révolution industrielle, le terme BIM est intégré dans les concepts de recherche à côté des concepts de construction et de technologies du 4.0 présentés dans le Tableau 5.3 ci-dessous.

Tableau 5.3 – Thèmes et mots-clés de recherche sur les technologies 4.0 de la construction

Mots-clés associés à l'industrie de la construction	Mots-clés associés au BIM	Mots-clés associés au 4.0
Construction industry	BIM	industry 4.0
Building industry	Building information modeling	building 4.0
Construction site		technology 4.0
Construction sector		revolution 4.0
		construction 4.0
		digitisation
		digitalisation

Cette recherche a été effectuée sur les titres, résumés et mots-clés contrôlés des articles. Effectuée entre 2009 et 2019 sur la base de données Scopus², la recherche a permis l'identification de 188 articles. Les technologies et applications de ces technologies ont été extraites de ces articles pour correspondre au besoin de la présente recherche.

Une seconde recherche a été effectuée pour les moyens d'acquisition plus traditionnels. En effet, comme déjà été mentionné précédemment dans ce mémoire, certaines données sur un horizon d'observation plus lointain ne sont pas admissibles à la captation en temps réel des technologies 4.0. Les moyens plus traditionnels tels que les outils informatiques des entreprises comme l'ERP (Entreprise ressource planning) seront utilisés pour acquérir les données nécessaires. Pour ce type de données, nous avons utilisé les observations effectuées sur le terrain et l'article de You et Wu (2019), proposant une connexion des données existantes des entreprises de construction avec le BIM. Les données existantes dans l'article de You et Wu font partie du système ERP de l'entreprise. Ce dernier étant décomposé en quatre modules : gestion de projet, gestion des matériaux, gestion des finances et gestion des ressources humaines. Nous citerons donc ces modules comme origines des données nécessaires lorsque la donnée nécessaire existe dans ce système ERP.

5.3.2 Les technologies 4.0 et moyens traditionnels d'acquisition

Pour chacune des données nécessaires et identifiés dans le modèle de données, nous avons cherché dans les articles résultant de la recherche bibliographique décrite dans la section 5.3.1, les technologies 4.0 étant associées à cette application ainsi qu'un éventuel moyen traditionnel. Cette section du mémoire présente les résultats de cette recherche sous forme de tableau présenté ci-dessous (voir Tableau 5.4).

² Scopus est une base de données multidisciplinaire de l'éditeur Elsevier. Cette recherche a été effectuée dans une base de données différente des autres recherches littéraires, car celle-ci s'inscrit dans une recherche en collaboration avec deux autres étudiants ayant mené à la publication de deux articles sur les applications des technologies du 4.0.

Le tableau reprend les facteurs de non-performances et les données réelles à acquérir sur le chantier. Pour chacune des données, des technologies du 4.0 seront identifiées avec la référence scientifique qui l'accompagne si une application est détectée dans la littérature. De plus, un moyen d'acquisition traditionnel sera identifié lorsqu'il existe. Ce dernier est basé sur l'article de You et WU ou sur l'expérience acquise pendant cette recherche. Par ailleurs, certaines technologies innovantes identifiées en dehors de la recherche sur la construction 4.0 seront mentionnées pour répondre à un besoin d'informations. Les informations ont été récoltées via une recherche spécifique sur le sujet parfois de manière générale à l'industrie. Ces technologies hors cadre de recherche seront identifiées avec une étoile dans le tableau.

Tableau 5.4 – Moyens d’acquisition des données nécessaires à la structure

Indicateurs de performance	Données réelles nécessaires	Technologie 4.0	Détails de l’application	Sources	Méthode traditionnelle
Condition météo	Conditions à venir				Internet
	Conditions actuelles				Capteurs météorologiques
Règles de sécurité	Checklist	IA(ChatBot)*		(Li, 2019)	ERP (HR) -Gestion des formations et de la sécurité
		Blockchain	Contrats intelligents / preuve de livraison	(Woodhead, Stephenson, & Morrey, 2018)	
Qualification humaine	Niveau réel				ERP (HR) -Informations sur les employés
	Disponibilité				ERP (project) -Planning de projet
Productivité	Estimation réelle	<i>Voir : Suivi, contrôle des activités / avancement</i>			ERP (projet) -Contrôle et analyse des coûts -Gestion de la construction
		RFID / code-barre	Localisation et mouvements pour capter la productivité (Humain et ressource)	(Pärn & Edwards, 2017)	
Sécurité	Position réelle	RFID+UHF	Localiser les ouvriers par rapport au matériel	(Woodhead et al., 2018)	
		Appareil mobile + WSN (wireless sensor networks)	Localiser les connexions par pièces	(Araszkiewicz, 2017)	
		GPS	Localisation via GPS (smartphone ou objet connecté)	(Dallasega, Rauch, & Linder, 2018; Tezel & Aziz, 2017)	
		RFID	Contrôle d'accès	(Oesterreich & Teuteberg, 2016)	
	Équipements portés	RFID	Contrôle d'équipements	(Oesterreich & Teuteberg, 2016; Pärn & Edwards, 2017)	

Tableau 5.4 – Moyens d'acquisition des données nécessaires à la structure (suite)

Indicateurs de performance	Données réelles nécessaires	Technologie 4.0	Détails de l'application	Sources	Méthode traditionnelle
Disponibilité des équipements	Quantité réelle	UAV/Photogrammétrie/appareils mobiles	Plan des éléments sur site	(Laine & Ikonen, 2011)	ERP (matériel) -Gestion de l'inventaire
		Balayage Laser	Mesure des volumes	(Woodhead et al., 2018)	
		RFID	Accès au site	(Dallasega, Rauch, & Linder, 2018; Wang, 2013)	
	Position réelle	RFID+UHF	Localisation du matériel	(Woodhead et al., 2018)	
		Appareil mobile + WSN (wireless sensor networks)	Localiser les connexions par pièces	(Araszkiewicz, 2017)	
		GPS	Localisation via GPS (smartphone ou objet connecté)	(Dallasega, Rauch, & Linder, 2018; Tezel & Aziz, 2017)	
		RFID	Contrôle d'accès	(Oesterreich & Teuteberg, 2016)	
	Date de demande	<i>Voir : communication et coordination</i>			ERP (matériel) -Gestion des commandes
	Statut de la demande	IA		Proposition de l'auteur	ERP (matériel) -Gestion des fournisseurs -Gestion des commandes -Gestion de l'approvisionnement
		Appareil mobile	Accès et suivi de l'information	(Santos, Costa, & Grilo, 2017)	
		Capteurs avancés/RFID	Suivi de la chaîne d'approvisionnement	(Dallasega, Rauch, & Linder, 2018)	
État des équipements	Condition	Appareil mobile et capteur avancés	Système embarqué sur les équipements	(Dallasega, Rauch, & Linder, 2018; Whyte & Hartmann, 2017; Woodhead et al., 2018)	
		Capteurs avancés et machine Learning*	Maintenance prédictive	(Truong, 2018)	
	Durée d'activité	Appareil mobile	Accès aux historiques	(Hu, Tian, Li, & Zhang, 2018; Laine & Ikonen, 2011)	
	Entretiens réalisés	RFID ou code barre	Enregistrement des données	(Hu et al., 2018)	

Tableau 5.4 – Moyens d’acquisition des données nécessaires à la structure (suite et fin)

Indicateurs de performance	Données réelles nécessaires	Technologie 4.0	Détails de l’application	Sources	Méthode traditionnelle	
Disponibilité des matériaux	Quantité réelle	<i>Voir : Manque d'équipement</i>				
	Position réelle					
	Date de demande					
	Statut de la demande					
Qualité des matériaux	Qualité réelle	RFID ou code barre	Enregistrement des données de vérification	(Hu et al., 2018)		
		Blockchain	Contrat intelligent	(Woodhead et al., 2018)		
Communication et coordination	Checklist	IA (chatbot)*	Relation client/fournisseur	(Spohrer, Vargo, Caswell, & Maglio, 2008)		
		Appareil mobile	Accès aux informations	(Araszkiewicz, 2017; Dallasega, Rauch, & Linder, 2018)		
		Blockchain	Contrat intelligent / preuve de livraison	(Woodhead et al., 2018)		
	Date de transmission	<i>Voir : communication et coordination / Checklist</i>				
	Statut de lecture/décision	<i>Voir : communication et coordination / Checklist</i>				
Suivi, contrôle des activités	Avancement	Balayage Laser et UAV (Unmanned aerial vehicle)	Suivi de l'avancement de la construction	(Adan et al., 2015; Dallasega, Rauch, & Linder, 2018; Pärn & Edwards, 2017; Woodhead et al., 2018)	ERP (projet) - Gestion de la construction	
		(IA) Machine learning	Analyse de données de chantier en temps réel	(Whyte & Hartmann, 2017)		
	Validation des travaux	<i>Voir : communication et coordination / Checklist</i>				
		UAV + laser scanning	Test et vérification des solutions dynamiques	(Getuli, Ventura, Capone, & Ciribini, 2017; Moum, 2010)		
Document et autorisation	Date d'envoi	<i>Voir : communication et coordination</i>				
	Statut					
	Validation du document					

Le Tableau 5.4 ci-dessus reprend les technologies et moyens d'acquisition des données nécessaires à la structure finale. Ces technologies sont des technologies de suivi. On retrouve également dans les articles cités dans le tableau, des technologies de gestion. Ces dernières ayant pour but d'améliorer la performance et non pas de la suivre. La présente recherche ne vise pas à étudier les technologies de gestion. En effet, l'extrant final de cette recherche étant lui-même un outil de gestion : la structure intégrée d'indicateur de performance.

5.4 Élaboration des connexions au sein de la structure intégrée d'indicateurs

Pour effectuer la dernière étape menant à la création de la structure intégrée, nous utilisons une représentation par diagramme entité-relation pour faire apparaître les différentes connexions entre les indicateurs et sous-indicateurs. L'utilisation de cette représentation permettra de visualiser les indicateurs sous forme d'entité. Les données nécessaires à leur alimentation seront sous forme d'attribut à l'entité ou sous forme d'entité si cette information peut être multiple. On affichera donc également les multiplicités.

Le diagramme est centré sur une activité observée dans le projet de construction. Pour ne pas surcharger le modèle entité-relation, seules les données issues du réel seront représentées dans le diagramme. Le diagramme similaire avec les données planifiées ne sera pas représenté. Le diagramme sera divisé en deux parties : Figure 5.2 et Figure 5.3. Par ailleurs, les multiplicités entre les classes seront également représentées sur les diagrammes.

L'activité observée, centrale à la solution proposée est visualisée en orange sur le diagramme. Les 8 indicateurs de performance principaux sont visibles en gris. Les autres informations sous forme d'entités ou attributs sont en bleues. Les statuts présentés ne sont pas exhaustifs et sont là principalement pour exemples³. Les connexions entre les informations sont effectuées de manière

³ Pour respecter fidèlement le modèle entité-relation, les différentes entités des attributs « statuts » ou « niveau » ne devrait en former que un seul. Les exemples sont présentés pour illustrer les attributs.

automatique. C'est-à-dire qu'il n'y a pas d'intermédiaires dans les connexions. Les connexions proposées dans les figures suivantes ont été établies à titre exploratoire. Elles permettent une illustration des possibilités, basées sur le cas de l'entreprise partenaire et de la compréhension des processus observés.

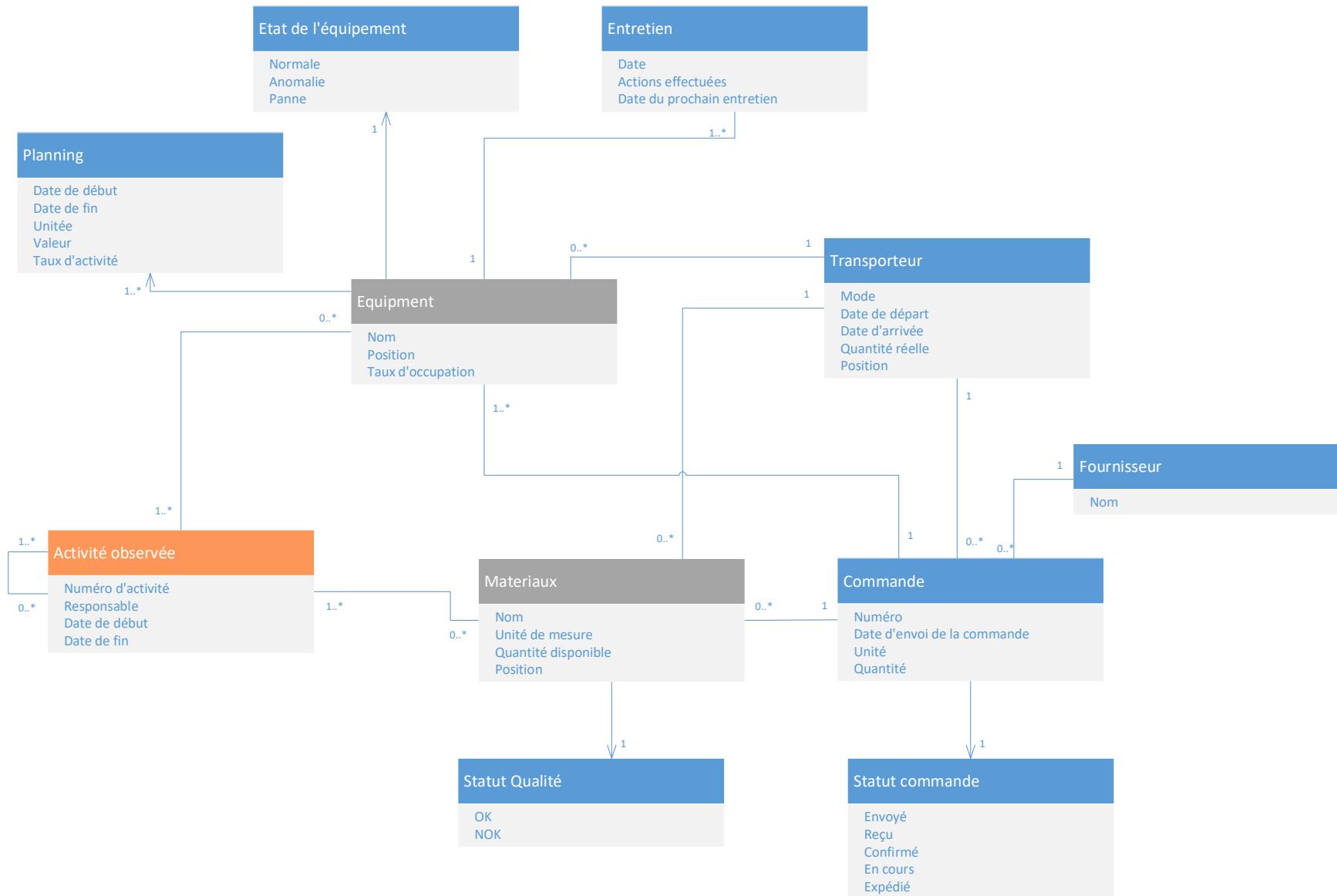


Figure 5.2 – Diagramme entité-relation (Partie 1)

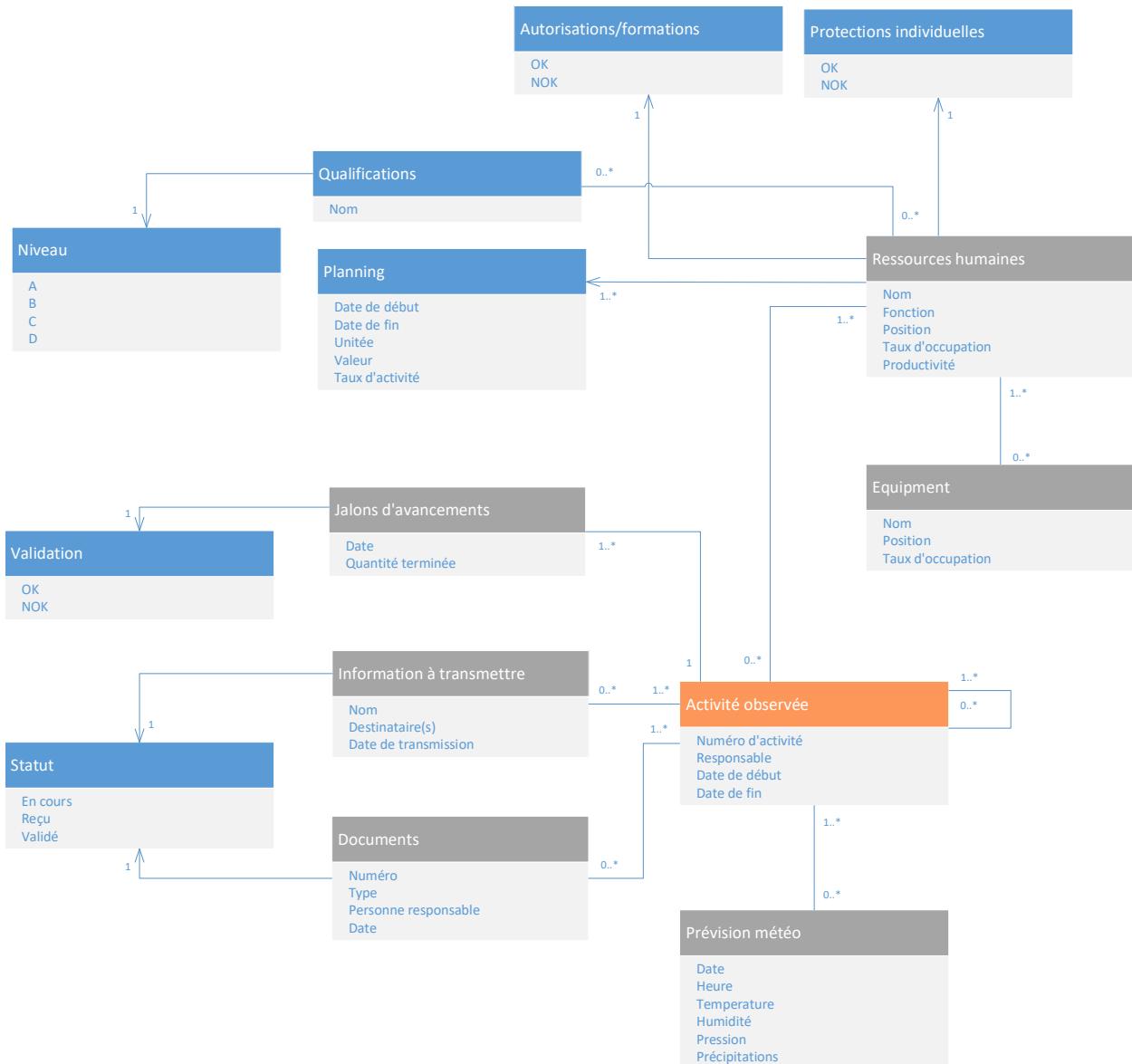


Figure 5.3 – Diagramme entité-relation (Partie 2)

Les deux figures ci-dessus concluent l'élaboration de la structure intégrée d'indicateur de performance. Les moyens d'acquisition des données n'apparaissant pas sur les diagrammes, il faut utiliser le Tableau 5.4 pour avoir l'intégralité des informations fournies par la structure mise en place dans cette recherche.

CHAPITRE 6 APPLICABILITÉ DU MODÈLE

6.1 Introduction

Après avoir réalisé la structure intégrée théorique, une étude d'applicabilité avec l'entreprise partenaire a été effectuée. Cette étape s'inscrit dans la deuxième phase descriptive de la méthodologie DRM. L'objectif de cette étude est de comparer la réalité de l'entreprise partenaire avec la structure théorique réalisée. Il a donc été possible de comprendre les enjeux et opportunités pour l'entreprise partenaire. Par ailleurs, cette étape a également permis de comprendre si la maturité des entreprises de construction était suffisante pour l'implantation d'une structure intégrée de ce type.

Pour effectuer cette étude d'applicabilité, les données des entretiens semi-structurés réalisés avec l'entreprise partenaire sont utilisées. Les résultats et détails de ces entretiens sont disponibles section 4.2.3. Par ailleurs l'expérience acquise est toutes les discussions réalisées dans le cadre de cette recherche sont utilisées pour effectuer cette étude. La comparaison est effectuée sur le modèle de données de la structure (voir Tableau 5.2). Par ailleurs, les technologies ne seront pas étudiées dans cette recherche. En effet, les technologies sont des exemples d'outils d'acquisition automatique pour les données identifiées. Il est donc nécessaire que ces données soient générées par l'entreprise partenaire avant de s'intéresser aux moyens d'acquisition. C'est pourquoi seule l'existence des données sera étudiée dans cette recherche. L'applicabilité est modélisée avec le même diagramme entité-relations présenté précédemment avec un code couleur pour les différences notables. Nous pouvons ainsi observer les différences de modèle et donc l'applicabilité de la solution de suivi proposée.

6.2 Comparaison des modèles de données

6.2.1 Données planifiées

Le Tableau 6.1 ci-dessous présente les différences entre le modèle théorique et le modèle issu de l'entreprise partenaire. Les éléments en rouge sont les éléments absents du fonctionnement et des processus de l'entreprise.

Tableau 6.1 – Comparaison du modèle de données : théorique vs pratique

Indicateurs	Données planifiées	Détails complémentaires
Condition météo	Conditions nécessaires	Données existantes, mais non exigées
Règles de sécurités	Listes des règles	Données connues et maitrisées par la personne responsable de la santé et sécurité
Qualification humaine	Niveau requis Quantité requise	Le niveau requis est documenté en particulier pour la sécurité. Il n'y a pas ou très rarement de niveau requis pour l'exécution d'une tâche.
Productivité	Attendu (pas obligatoire)	Données non existantes, car pas d'élément de comparaison sur des projets antérieurs.
Sécurité	Lieu d'activité Liste équipements	Données connues et maitrisées par la personne responsable de la santé et sécurité.
Disponibilité des équipements	Liste équipements Criticité Quantité requise Délais moyens d'obtention	L'ensemble de ces informations est connu et planifié dans les phases préliminaires du projet.
État d'équipement	Liste des pannes Actions correctives associées Temps moyen de réparation Temps entre chaque entretien	Données connues et maitrisées par les personnes responsables des équipements.

Tableau 6.1 – Comparaison du modèle de données : théorique vs pratique (suite et fin)

Indicateurs	Données planifiées	Détails complémentaires
Disponibilité des matériaux	Liste des matériaux Quantité requise Criticité Délais moyens d'obtention	L'ensemble de ces informations est connu et planifié dans les phases préliminaires du projet. Lorsque la demande des matériaux est effectuée par un sous-traitant, ces données sont également connues pour les matériaux critiques.
Qualité des matériaux	Qualité requise	Données documentées et imposées dans les soumissions lorsqu'il y a une soumission.
Communication et coordination	Parties prenantes Informations à transmettre	Les parties prenantes sont connues, mais il n'existe pas de liste des informations à transmettre.
Suivi, contrôle des activités	Liste des attentes Qualité/Condition requise Jalons	Données planifiées dès les phases préliminaires du projet. Les jalons qualité et les méthodologies de travaux sont également documentés et validés avant les soumissions ou les travaux.
Documents techniques et autorisation	Listes des documents et autorisations Délais moyens d'obtention Niveau d'exigence	Il n'existe pas de liste des documents nécessaires à une activité. Les documents obligatoires sont documentés dans les soumissions uniquement. Seuls les documents entrés dans le système apparaissent. Pour ces documents, les délais d'obtention et le niveau d'exigence sont documentés.

Ce tableau permet d'observer que la phase de planification est presque complète. Ce point est très important et souligne le fait que les informations existent déjà dans l'entreprise partenaire. Ces informations sont souvent connues de certains responsables uniquement. On retrouve la notion de silo d'information au sein d'un projet. Ces données étant pour la plupart documentées, il est important de les centraliser et les numériser afin de pouvoir réutiliser ces informations. Ainsi,

lorsque davantage de données seront récoltées en temps réel, il sera aisé de mettre en place un indicateur de performance en comparant ces données avec les besoins planifiés au préalable.

6.2.2 Données réelles et connexions

Pour illustrer l'applicabilité de la structure théorique au cas du partenaire industriel, la visualisation « entité-relation » des Figure 5.2 et Figure 5.3 sera adaptée à l'entreprise partenaire. On retrouve cette applicabilité dans les figures ci-dessous. Un code couleur présenté dans la Figure 6.1 ci-dessous permettra de visualiser les différences entre les deux modèles. Deux éléments ont été modifiés : les connexions entre les données et les données elles-mêmes.

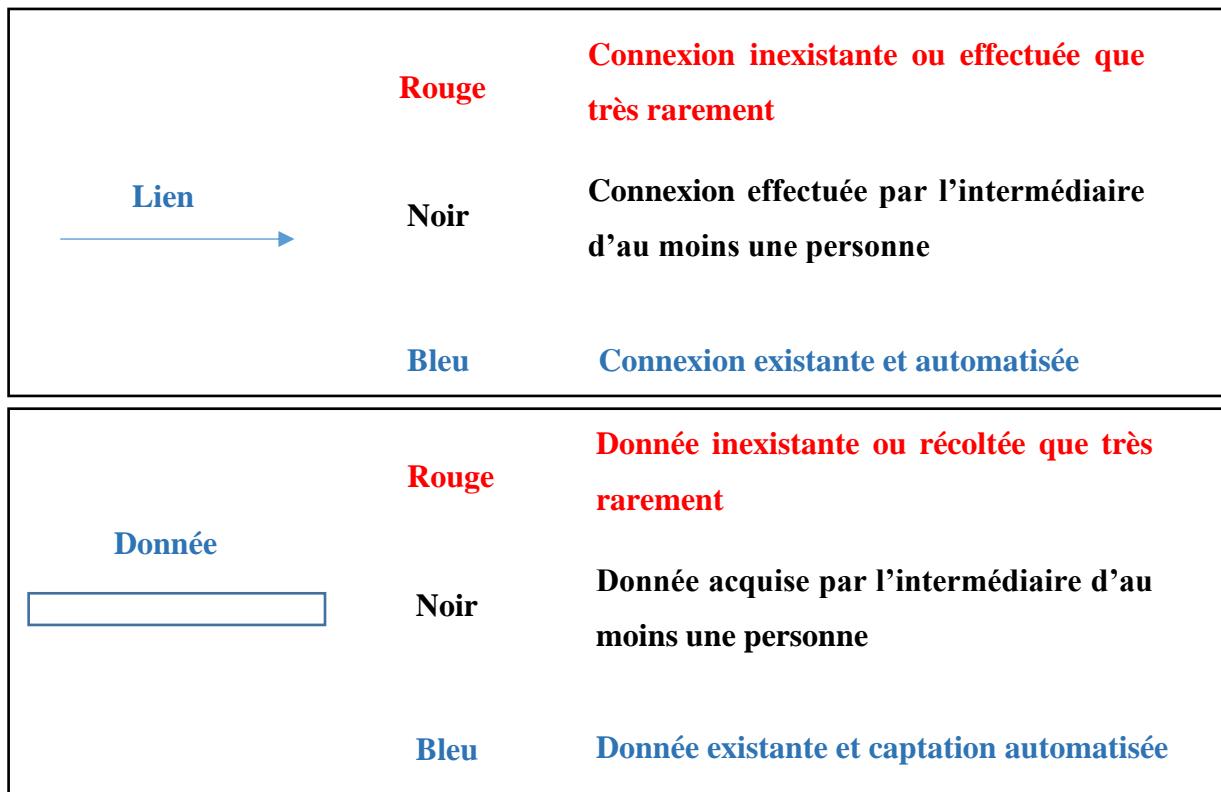


Figure 6.1 – Légende de la visualisation d'applicabilité à l'entreprise partenaire

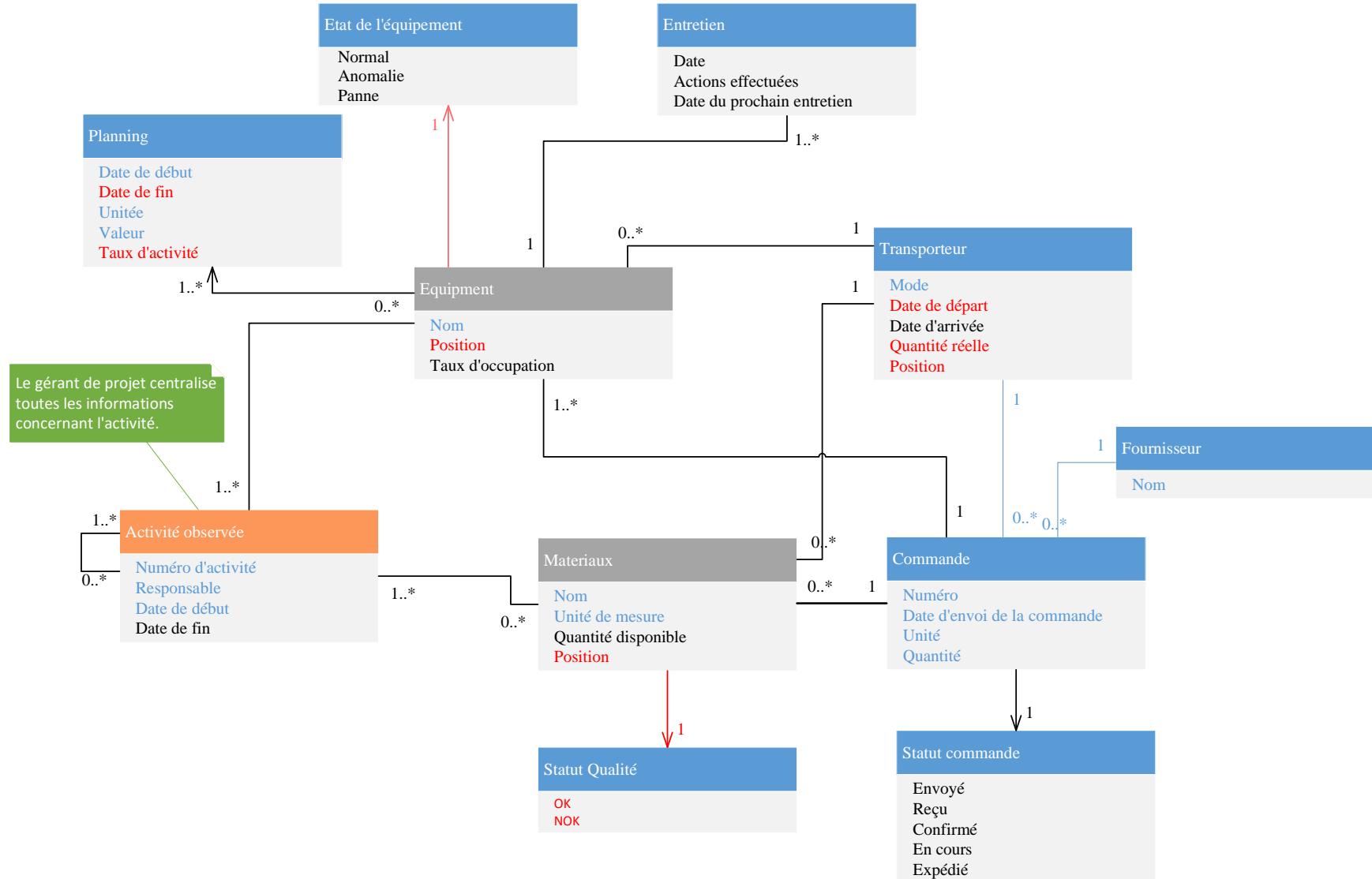


Figure 6.2 – Applicabilité de la structure « entité-relation » à l'entreprise partenaire (Partie 1)

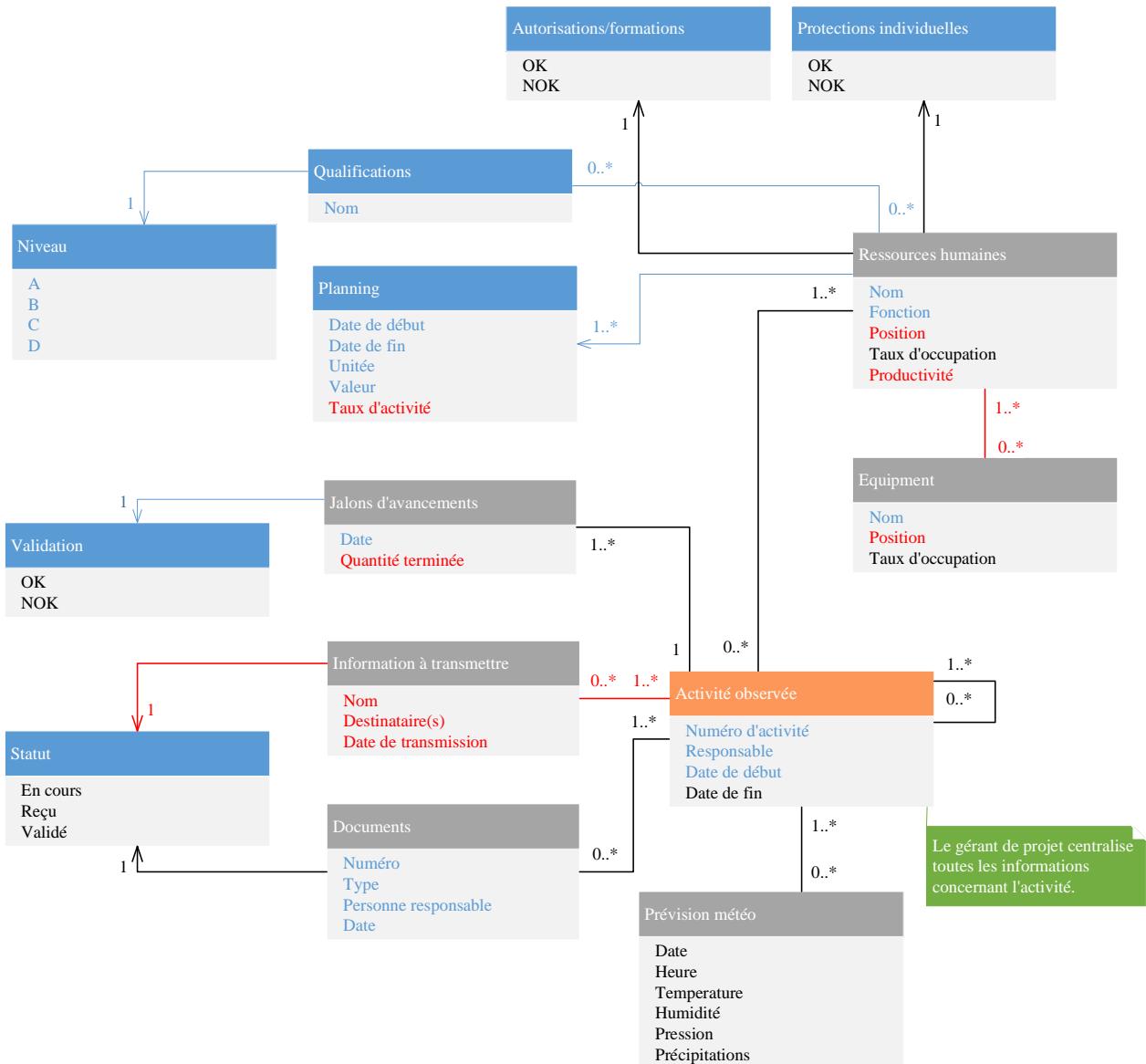


Figure 6.3 – Applicabilité de la structure « entité-relation » à l’entreprise partenaire (Partie 2)

6.2.3 Analyse des résultats

La première observation notable est le manque presque général de connexion automatique des données. Toutes les données existantes passent par un intermédiaire humain. Par ailleurs, toutes les données sont centralisées par le gérant de construction ou le sou gérant avant d’atteindre l’activité observée. On retrouve dans ce fonctionnement l’importance primordiale du gérant et son expertise. La dimension humaine des projets de construction est donc visible à travers toutes les connexions passant obligatoirement par un responsable ou une partie prenante. Il en est de même pour les

connexions entre les activités elles-mêmes et la recherche de conflit. Le gérant ou le sous-gérant est responsable de vérifier ces conflits et d'effectuer la connexion avec les données récoltées. Par ailleurs, la présente recherche ne se concentre pas sur les fréquences de captations des données. Cette fréquence est intrinsèque à la durée d'activité et effectuée au minimum une fois par jour. Dans la structure issue de l'entreprise partenaire, cette collecte d'information est moins fréquente. N'existant pas de processus défini de collecte des informations, la fréquence de collecte se fait lorsque le besoin se fait ressentir.

La sécurité est primordiale dans le domaine de la construction et la politique de zéro accident instauré par l'entreprise partenaire l'illustre parfaitement. Les données concernant la sécurité sont parfaitement planifiées et une personne responsable de la sécurité est de manière générale toujours présente sur le chantier. Ces informations sont donc collectées par l'intermédiaire d'un employé. Ces informations sont ensuite transmises au gérant du projet.

Toutes les données collectées sont disponibles sur un logiciel, ou une plateforme Internet. C'est le cas par exemple, des échéanciers, des ratios de production, des informations des employés, des conditions de sécurité et des formations, du partage des documents, la gestion des factures, etc. Tous ces logiciels sont majoritairement utilisés par les gérants et responsables de chantier, mais ne permettent pas la sortie d'information. On voit ainsi apparaître des silos d'informations au sein d'un projet de construction.

6.3 Discussion

On observe dans l'entreprise partenaire plusieurs difficultés pour appliquer cette structure intégrée d'indicateur de performance. Tout d'abord le manque de sortie possible des informations dans les logiciels utilisés cause une difficulté. La structure intégrée se base sur une connexion générale de toutes ces données. Peu importe des logiciels intermédiaires, ces données doivent pouvoir être récupérées. Pour pallier cette situation, l'humain entre en jeux dans la majorité des connexions. Un grand nombre d'informations est transmis de manière informelle, il n'y a donc pas de moyen de réutiliser ces informations par la suite. Un besoin de formalisme est donc important pour l'industrie de la construction.

Par ailleurs, certaines données nécessaires et pertinentes ne sont pas acquises. Le manque de technologies peut être la cause, mais le support d'acquisition inexistant et la réutilisation n'étant

pas possible, l'utilisation d'une technologie dédiée à la collecte de cette information n'est pas la priorité. De manière générale les technologies d'acquisition n'ont pas été abordées dans cette applicabilité. En effet, ces données sont récoltées manuellement lorsqu'elles existent et les logiciels mentionnés précédemment peuvent être un frein à l'implantation de technologies d'acquisition. En effet, les logiciels ne permettent pas l'automatisation. Un employé doit insérer les informations manuellement dans ces derniers.

Cependant, l'entreprise partenaire fait preuve d'une planification rigoureuse. Cette planification essentielle à la mise en place d'indicateurs porteurs de sens permettra à terme de mettre en place des indicateurs rapidement lorsque les informations seront capables de circuler. Ainsi, l'élément essentiel pour l'implantation d'une telle structure est la suppression des silos d'information pour faire place à une accessibilité de toutes les données.

CHAPITRE 7 DISCUSSION, CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les projets particuliers et singuliers de l'industrie de la construction soumettent cette dernière à de fortes contraintes et variables externes parfois aléatoires. Cette industrie doit cependant avancer dans cet environnement contraignant en restant compétitive et en améliorant ses performances à l'image des autres industries, en particulier le domaine manufacturier. L'industrie de la construction vieillissante doit donc adapter ces manières de faire et suivre la tendance industrielle de se tourner vers les outils du numérique offrant de nouvelles perspectives pour chacun. La majorité des industries à l'instar du domaine manufacturier ont entamé leur virage numérique dans l'objectif d'améliorer leurs performances lorsque la main-d'œuvre vient à manquer. Elles peuvent ainsi rester compétitives. On observe depuis quelques années, un intérêt grandissant de l'industrie de la construction dans ce virage numérique. Elle cherche de nouveaux procédés et outils permettant d'améliorer leur performance. Basé sur l'industrie 4.0, le virage numérique devra à terme connecter et capter le maximum de données sans l'intervention humaine omniprésente dans la construction. Ces connexions alimenteront des indicateurs existant ou nouveau permettant d'améliorer la prise de décision en temps réel. La prise de décision pouvant être effectuée et réfléchie par un humain ou par une machine.

Notre recherche se basant à la fois sur la littérature scientifique et sur le cas du partenaire industriel nous a permis de comprendre la situation et les difficultés de cette industrie au niveau des activités d'exécutions d'un chantier. Malgré de nombreux outils technologiques adaptés au domaine de la construction, il est difficile pour cette industrie d'améliorer ses performances, car elles ne possèdent pas de vision d'ensemble reliant leurs difficultés à des solutions techniques et technologiques. Les technologies utilisées de manière individuelle peuvent faciliter une tâche dans l'immédiat mais ne permettront pas d'effectuer un virage numérique pour toute l'entreprise. Dans ce projet, l'entreprise partenaire a clairement identifié ce besoin d'obtenir une vision générale de leur besoin et des solutions existantes. A court terme, la firme partenaire pourra lancer des projets numériques précis sur certains domaines prioritaires. A long terme, l'entreprise pourra moderniser ces processus industriels et entamer un véritable virage numérique sur les activités d'exécutions de chantier.

Cette recherche avait pour objectif principal la mise en place d'une structure intégrée d'indicateur de performance permettant la génération d'un pronostic de succès sur les activités d'exécutions. Ce pronostic pouvant être vu comme un indicateur intégré permettra d'améliorer la prise de décision en temps réel et ainsi améliorer la performance sur les chantiers de construction. Pour cela, cette étude s'est basée une revue la littérature (Chapitre 2) qui a mis en lumière les sources de non-performances principales sur les chantiers. Une méthodologie de recherche basée sur une approche mixte, à la fois empirique et expérimentale, a été effectuée (Chapitre 3). Par la suite, pour comprendre la situation actuelle de l'entreprise partenaire, nous avons effectué une analyse de l'existant (Chapitre 4). Grâce à ces premiers chapitres, nous avons pu mettre en place et détailler la structure intégrée (Chapitre 5) et vérifier son applicabilité à l'entreprise partenaire (Chapitre 6).

L'élaboration de la structure intégrée s'est basée sur 5 étapes distinctes. La première fut d'identifier les sources de non-performance. Nous avons utilisé pour cela une recherche bibliographique et des cas concrets de l'entreprise partenaire. Nous avons ainsi identifié et intégré 42 facteurs de non-performance en neuf catégories thématiques. Nous avons par la suite créé huit indicateurs de performance permettant de surveiller et quantifier ces facteurs de non-performance. La troisième étape fut d'identifier les données nécessaires à l'alimentation des indicateurs. Ces données sont séparées en deux catégories : les données planifiées et les données réelles. La comparaison de ces deux types de données permettra la création des indicateurs. L'étape suivante fut d'associer des moyens d'acquisition aux données nécessaires. Ces moyens d'acquisition peuvent être innovants et issus de l'industrie 4.0 pour des données en temps réel ou issu de moyen plus traditionnel comme les systèmes de gestion (type ERP) des entreprises. Enfin, la dernière étape permettant la réalisation de la structure fut l'établissement des connexions entre les indicateurs et les données. Ainsi, ces cinq étapes ont permis la réalisation de la structure intégrée.

D'un point de vue scientifique la principale contribution est la connexion des sources de non-performances à des solutions numériques concrètes. Cette recherche propose une structure intégrée sous forme de digramme entité-relation identifiant les connexions et les besoins de données pour chaque entité d'un chantier de construction nécessitant un intérêt particulier. Elle apporte une vision globale des besoins ainsi que de possibles solutions sur un chantier. A notre connaissance, il n'existe pas dans la littérature de modèles intégrant des connexions entre indicateurs de performances pertinents à l'amélioration de la performance avec des technologies et outils issus du

numérique. Cette structure n'apporte pas une solution finale générale mais soulève un grand nombre de points à développer pour leur mise en place de manière concrète.

D'un point de vue pratique, cette recherche apporte à l'entreprise partenaire une vision d'ensemble des possibilités d'actions pour effectuer leur virage numérique. L'entreprise pourra s'appuyer sur le modèle de données et les technologies associées pour entreprendre de nouveaux projets de numérisation. Par ailleurs cette recherche propose dans le chapitre 6 des pistes d'actions préalables avant d'envisager un virage numérique complet. Il s'agit d'une suppression des silos d'informations, une automatisation de la récolte des données existantes et une possibilité de réutilisation de ces données (format, emplacement).

Les limites de cette recherche sont principalement la justesse de la comparaison de la structure intégrée théorique avec le cas du partenaire industriel. Le modèle a été reproduit sur les connaissances et la compréhension acquises lors des entretiens et observations sur le chantier. Sans contraintes temporelles, d'autres entretiens auraient été effectués pour la réalisation du modèle de l'entreprise. Par ailleurs, après avoir effectué les entretiens semi-structurés qualitatifs permettant l'identification des sources de délais, une étude quantitative pour prioriser les besoins de l'entreprise aurait été effectuée sans la contrainte de temps. La dernière limite notable de cette recherche est l'identification des moyens d'acquisition traditionnelle. Une étude plus précise et une corrélation avec les systèmes de gestions de l'entreprise partenaire auraient été effectuées sans contraintes temporelles et de confidentialité quant à l'utilisation de certains logiciels.

La présente étude est une recherche exploratoire et nécessite donc un approfondissement de plusieurs notions. Tout d'abord les besoins en données qui sont dans la présente recherche basée sur la compréhension qu'il a été fait du milieu de la construction. Un approfondissement de ce besoin apporterait une vision plus complète des besoins de donner et par la suite associer des moyens d'acquisition. La liste des outils d'acquisition issue de l'industrie 4.0 est assez complète, car provient d'une recherche plus large effectuée au préalable. En revanche, les outils d'acquisition traditionnelle pour être étudié davantage et une recherche connectant ces deux types d'outils seraient une avancée intéressante pour le virage numérique qu'entreprennent les firmes de construction. Elles pourraient ainsi connecter leurs outils actuels aux nouveaux moyens d'acquisition 4.0. Enfin, pour chaque source de non-performance identifiée, une recherche plus

complète serait nécessaire pour pouvoir effectuer une transition numérique relative à cette source de délais.

RÉFÉRENCES

- AACE. (2015). *Total Cost Management Framework: An Integrated Approach to Portfolio, Program, and Project Management: a Continuing Project of the AACE Technical Board*: AACE international.
- Adan, A., Quintana, B., Vazquez, A. S., Olivares, A., Parra, E., & Prieto, S. (2015). Towards the automatic scanning of indoors with robots. *Sensors (Basel)*, 15(5), 11551-11574. doi:10.3390/s150511551
- Agarwal, R., Chandrasekaran, S., & Sridhar, M. (2016). The digital future of construction. *Voices, Global Infrastructure Initiative, McKinsey & Company, Mumbai*. [Google Scholar].
- Ahmed, S. M., Azhar, S., Castillo, M., & Kappagantula, P. (2002). Construction delays in Florida: An empirical study. *Final report. Department of Community Affairs, Florida, US*.
- Al-Aomar, R. (2012). A lean construction framework with Six Sigma rating. *International Journal of Lean Six Sigma*, 3(4), 299-314.
- Alenazi, E. O., & Adamu, Z. A. (2017). Building information modelling for construction delay management.
- Allmon, E., Haas, C. T., Borcherding, J. D., & Goodrum, P. M. (2000). US construction labor productivity trends, 1970–1998. *Journal of construction engineering and management*, 126(2), 97-104.
- Araszkiewicz, K. (2017). Digital Technologies in Facility Management – The state of Practice and Research Challenges. *Procedia Engineering*, 196, 1034-1042. doi:10.1016/j.proeng.2017.08.059
- Asgari, M., Kheyroddin, A., & Naderpour, H. (2018). Evaluation of Project Critical Success Factors for Key Construction Players and Objectives. *International Journal of Engineering-Transactions B: Applications*, 31(2), 228-240.
- Aziz, R. F. (2013). Ranking of delay factors in construction projects after Egyptian revolution. *Alexandria Engineering Journal*, 52(3), 387-406.
- Barbosa, F., Woetzel, J., Mischke, J., Ribeirinho, M. J., Sridhar, M., Parsons, M., . . . Brown, S. (2017). Reinventing construction: a route to higher productivity. *McKinsey Global Institute*.
- Blessing, L. T., & Chakrabarti, A. (2009). *DRM: A Design Research Methodology*: Springer.
- Bordoli, D. W., & Baldwin, A. N. (1998). A methodology for assessing construction project delays. *Construction Management & Economics*, 16(3), 327-337.
- Budayan, C., Dikmen, I., Birgonul, M. T., & Ghaziani, A. (2018). A computerized method for delay risk assessment based on fuzzy set theory using MS Project™. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 1-12.
- Cheng, T., & Teizer, J. (2010). *Real-time data collection and visualization technology in construction*. Communication présentée à Construction Research Congress 2010. Innovation for Reshaping Construction PracticeAmerican Society of Civil Engineers.
- Couto, J. P., & Teixeira, J. M. C. (2007). The evaluation of the delays in the portuguese construction industry.

- Dallasega, P., Rauch, E., & Frosolini, M. (2018). A Lean Approach for Real-Time Planning and Monitoring in Engineer-to-Order Construction Projects. *Buildings*, 8(3), 38.
- 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. doi:10.1016/j.compind.2018.03.039
- 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.
- De Wit, A. (1988). Measurement of project success. *International journal of project management*, 6(3), 164-170.
- Doloi, H., Sawhney, A., Iyer, K., & Rentala, S. (2012). Analysing factors affecting delays in Indian construction projects. *International journal of project management*, 30(4), 479-489.
- Drath, R., & Horch, A. (2014). Industrie 4.0: Hit or hype?[industry forum]. *IEEE industrial electronics magazine*, 8(2), 56-58.
- Elhaniash, F. E. A., & Stevovic, S. (2016). Towards factors affecting delays in construction projects: A case of Libya. *International Journal of Applied Research*, 1078-1081.
- Garbharran, H., Govender, J., & Msani, T. (2012). Critical success factors influencing project success in the construction industry. *Acta Structilia*, 19(2), 90-108.
- Gebrehiwet, T., & Luo, H. (2017). Analysis of delay impact on construction project based on RII and correlation coefficient: Empirical study. *Procedia Engineering*, 196, 366-374.
- Getuli, V., Ventura, S. M., Capone, P., & Ciribini, A. L. C. (2017). BIM-based Code Checking for Construction Health and Safety. *Procedia Engineering*, 196, 454-461. doi:10.1016/j.proeng.2017.07.224
- Ghanem, A., & AbdelRazig, Y. (2006). A framework for real-time construction project progress tracking. *Earth and space*, 188(112), 1-8.
- Gündüz, M., Nielsen, Y., & Özdemir, M. (2012). Quantification of delay factors using the relative importance index method for construction projects in Turkey. *Journal of management in engineering*, 29(2), 133-139.
- Habibi, M., Kermanshachi, S., & Safapour, E. (2018). *Engineering, Procurement and Construction Cost and Schedule Performance Leading Indicators: State-of-the-Art Review*. Communication présentée à Proceedings of Construction Research Congress, ASCE, New Orleans, Louisiana.
- Hu, Z.-Z., Tian, P.-L., Li, S.-W., & Zhang, J.-P. (2018). BIM-based integrated delivery technologies for intelligent MEP management in the operation and maintenance phase. *Advances in Engineering Software*, 115, 1-16. doi:10.1016/j.advengsoft.2017.08.007
- Kasim, N., Sarpin, N., Mohd Noh, H., Zainal, R., Mohamed, S., Manap, N., & Yahya, M. Y. (2019). *Automatic Materials Tracking Practices Through RFID Implementation in Construction Projects*. Communication présentée à MATEC Web of Conferences (vol. 266, p. 05001).
- Khoiry, M. A., Kalaisilven, S., & Abdullah, A. (2018). *A Review of Minimizing Delay in Construction Industries*. Communication présentée à E3S Web of Conferences (vol. 65, p. 03004).

- Laine, R., & Ikonen, J. (2011). *A construction plan image service for smart phones*. Communication présentée à Proceedings of the 12th International Conference on Computer Systems and Technologies (p. 292-297).
- Lebas, M. J. (1995). Performance measurement and performance management. *International journal of production economics*, 41(1-3), 23-35.
- Lessing, B., Thurnell, D., & Durdyev, S. (2017). Main factors causing delays in large construction projects: Evidence from New Zealand. *Journal of Management, Economics and Industrial Organization*, 1(2), 63-82.
- Li, R. Y. M. (2019). Automated and Intelligent Tools in the Construction Industry. Dans *Construction Safety Informatics* (p. 103-119): Springer.
- Ling, F. Y. Y., & Li, Q. (2019). *Managing the Development & Construction of Public Hospital Projects*. Communication présentée à IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (vol. 471, p. 022001).
- Maghsoodi, A. I., & Khalilzadeh, M. (2018). Identification and Evaluation of Construction Projects' Critical Success Factors Employing Fuzzy-TOPSIS Approach. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(5), 1593-1605.
- Mahamid, I. (2016). Factors contributing to poor performance in construction projects: studies of Saudi Arabia. *Australian Journal of Multi-Disciplinary Engineering*, 12(1), 27-38.
- Mbala, M., Aigbavboa, C., & Aliu, J. (2018). *Causes of Delay in Various Construction Projects: A Literature Review*. Communication présentée à International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (p. 489-495).
- Moum, A. (2010). Design team stories. *Automation in Construction*, 19(5), 554-569. doi:10.1016/j.autcon.2009.11.007
- 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. doi:10.1016/j.compind.2016.09.006
- Olawale, Y., & Sun, M. (2010). Cost and time control of construction projects: inhibiting factors and mitigating measures in practice. *Construction management and economics*, 28(5), 509-526.
- Olawale, Y., & Sun, M. (2015). Construction project control in the UK: Current practice, existing problems and recommendations for future improvement. *International Journal of Project Management*, 33(3), 623-637.
- Olsen, R. P. (1971). *Can project management be defined?*
- Pärn, 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. doi:10.1108/bepam-11-2016-0081
- Perrier, N., Roland, T., Bled, A., Bourgault, M., Danjou, C., Pellerin, R., & Cousin, N. Construction 4.0 : A survey of research trends. *Automation in Construction*. (Soumis)

- Pires, B., Teixeira, J. M. C., & Moura, H. M. P. (2007). Management functions and competitiveness in the Portuguese construction industry.
- Rodriguez, R. R., Saiz, J. J. A., & Bas, A. O. (2009). Quantitative relationships between key performance indicators for supporting decision-making processes. *Computers in Industry*, 60(2), 104-113.
- Sambasivan, M., Deepak, T., Salim, A. N., & Ponniah, V. (2017). Analysis of delays in Tanzanian construction industry: Transaction cost economics (TCE) and structural equation modeling (SEM) approach. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 24(2), 308-325.
- Santos, R., Costa, A. A., & Grilo, A. (2017). Bibliometric analysis and review of Building Information Modelling literature published between 2005 and 2015. *Automation in Construction*, 80, 118-136. doi:10.1016/j.autcon.2017.03.005
- Spoehr, J., Vargo, S. L., Caswell, N., & Maglio, P. P. (2008). *The service system is the basic abstraction of service science*. Communication présentée à Proceedings of the 41st Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS 2008) (p. 104-104).
- Sullivan, A., & Harris, F. (1986). Delays on large construction projects. *International journal of operations & production management*, 6(1), 25-33.
- Tezel, B., & Aziz, Z. (2017). From conventional to IT based visual management: a conceptual discussion for lean construction. *Journal of Information Technology in Construction*, 22, 220-246.
- Tezel, B., Barker, C., & Aziz, Z. (2016). Using quantitative approaches to enhance construction performance through data captured from mobile devices. Dans *Research Methodology in the Built Environment* (p. 99-112): Routledge.
- Tripathi, K., & Jha, K. (2018). An empirical study on performance measurement factors for construction organizations. *KSCE journal of civil engineering*, 1-15.
- Truong, H.-L. (2018). *Integrated Analytics for IIoT Predictive Maintenance using IoT Big Data Cloud Systems*. Communication présentée à 2018 IEEE International Conference on Industrial Internet (ICII) (p. 109-118).
- Turner, R., & Zolin, R. (2012). Forecasting success on large projects: developing reliable scales to predict multiple perspectives by multiple stakeholders over multiple time frames. *Project Management Journal*, 43(5), 87-99.
- Venugopal, P., & Vardhana, B. H. (2019). Optimized Inventory Control on Construction Materials by Application of E-Technology Transfer along JIT. *Journal of Testing and Evaluation*, 47(6).
- Walker, D. H., & Vines, M. W. (2000). Australian multi-unit residential project construction time performance factors. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 7(3), 278-284.
- Wang, D. T. (2013). *Analysis and Application of BIM Technology in the Project Goal Control*. Communication présentée à Advanced Materials Research (vol. 671, p. 2978-2981).

- Whyte, J. K., & Hartmann, T. (2017). How digitizing building information transforms the built environment. *Building Research & Information*, 45(6), 591-595. doi:10.1080/09613218.2017.1324726
- Woodhead, R., Stephenson, P., & Morrey, D. (2018). Digital construction: From point solutions to IoT ecosystem. *Automation in Construction*, 93, 35-46. doi:10.1016/j.autcon.2018.05.004
- You, Z., & Wu, C. (2019). A framework for data-driven informatization of the construction company. *Advanced Engineering Informatics*, 39, 269-277.
- Zhao, L., Li, J., Yang, H., Xavior, A., Cai, J., & You, L. (2017). A Research on Development of Construction Industrialization Based on BIM Technology under the Background of Industry 4.0. *MATEC Web of Conferences*, 100, 02046. doi:10.1051/matecconf/201710002046

ANNEXE A CLASSEMENT DES FACTEURS DE RETARD(AZIZ, 2013)

Tableau A.1 – Classement des facteurs de retard (Aziz, 2013)

Rank	ID	Delay factor description	Related category item	Overall Relative Importance Index (ORII) %
1	78	Delay in progress payments (funding problems)	Owner	85.880
2	42	Different tactics patterns for bribes	External	85.688
3	38	Shortage of equipment	Equipment	84.256
4	13	Ineffective project planning and scheduling	Contractor	83.912
5	16	Poor site management and supervision	Contractor	83.896
6	21	Poor financial control on site	Contractor	82.304
7	17	Rework due to errors	Contractor	82.122
8	93	Selecting inappropriate contractors	Owner	82.120
9	48	Sudden failures actions	External	82.112
10	87	Inadequate planning	Owner	79.792
11	12	Incompetent project team	Contractor	79.632
12	10	Inadequate contractor experience	Contractor	79.616
13	34	Frequent equipment breakdowns	Equipment	79.264
14	46	Global financial crisis	External	78.744
15	94	Complexity of project (project type, project scale, etc.)	Project	78.368
16	97	Legal disputes between project participants	Project	78.200
17	75	Change orders.	Owner	77.856
18	11	Inappropriate construction methods	Contractor	77.496
19	64	Unqualified/inadequate experienced labor	Labor	77.480
20	76	Conflicts between joint-ownership	Owner	77.472
21	85	Slowness in decision making	Owner	77.320
22	3	Delay in approving major changes in scope of work by consultant	Consultant	77.304
23	18	Unreliable subcontractors	Contractor	77.152
24	61	Shortage of labor	Labor	76.944
25	86	Suspension of work by owner	Owner	76.944
26	23	Design changes by owner or his agent during construction	Design	76.769
27	28	Misunderstanding of owner's requirements by design engineer	Design	76.768
28	88	Mode of financing and payment for completed work	Owner	76.767
29	24	Design errors and omissions made by designers	Design	76.752
30	73	Shortage of construction materials	Material	76.432

Tableau A.1 – Classement des facteurs de retard(Aziz, 2013) (suite)

31	31	Incomplete project design	Design	76.416
32	59	Low productivity of labor	Labor	76.272
33	45	Delay in providing services from utilities (water, electricity, etc.)	External	76.240
34	25	Insufficient data collection and survey before design	Design	76.232
35	33	Equipment allocation problem	Equipment	76.072
36	1	Lack of consultant experience in construction projects	Consultant	75.872
37	32	Defective design made by designers	Design	75.864
38	26	Lack of design team experience in construction projects	Design	75.536
39	96	Ineffective delay penalties	Project	75.368
40	70	Late delivery of materials	Material	75.176
41	27	Mistakes and delays in producing design documents	Design	75.160
42	80	Improper project feasibility study	Owner	74.968
43	52	Unexpected surface& subsurface conditions (soil, water table, etc.)	External	74.816
44	49	Price fluctuations	External	74.800
45	9	Frequent change of subcontractors	Contractor	74.648
46	43	Delay in obtaining permits from municipality	External	74.448
47	37	Low efficiency of equipment	Equipment	74.264
48	8	Poor communication and coordination between owner and contractor	Consultant	74.104
49	5	Inaccurate site investigation	Consultant	74.080
50	68	Delay in manufacturing materials	Material	73.928
51	74	Unreliable suppliers	Material	73.920
52	77	Delay in approving design documents	Owner	73.560
53	98	Original contract duration is short	Project	73.184
54	67	Damage of sorted materials	Material	72.512
55	7	Late in reviewing and approving design documents	Consultant	72.504
56	20	Inappropriate contractor's policies	Contractor	72.488
57	39	Slow mobilization of equipment	Equipment	72.320
58	15	Poor communication and coordination between owner and consultant	Contractor	72.304
59	71	Poor procurement of construction materials	Material	71.936
60	95	Inadequate definition of substantial completion	Project	71.920
61	69	Escalation of material prices	Material	71.776
62	79	Delay in site delivery.	Owner	71.616
63	72	Poor quality of construction materials	Material	71.600
64	35	Improper equipment	Equipment	71.424

Tableau A.1 – Classement des facteurs de retard(Aziz, 2013) (suite et fin)

65	2	Conflicts between consultant and design engineer	Consultant	71.080
66	22	Complexity of project design	Design	71.072
67	19	Inadequate site investigation	Contractor	71.064
68	99	Unfavorable contract clauses	Project	71.056
69	54	Inadequate production of raw material in the country	External	70.898
70	62	Slow mobilization of labor	Labor	70.888
71	30	Unclear and inadequate details in drawings	Design	70.715
72	66	Changes in material types and specifications during construction	Material	70.712
73	89	Long period between design and time of bidding/tendering	Owner	70.710
74	6	Inadequate project management assistance	Consultant	70.000
75	84	Poor communication and coordination between consultant and contractor	Owner	69.792
76	41	Changes in government regulations and laws	External	69.664
77	83	Lack of incentives for contractor to finish ahead of schedule	Owner	69.280
78	63	Labor strikes due to revolutions	Labor	69.264
79	55	Inappropriate government policies	External	68.584
80	57	Absenteeism	Labor	67.648
81	81	Lack of capable representative	Owner	67.488
82	36	Inadequate modern equipment	Equipment	67.312
83	4	Delay in performing inspection and testing	Consultant	67.128
84	14	Obsolete technology	Contractor	66.792
85	58	Low motivation and morale of labor	Labor	66.790
86	91	Additional work	Owner	66.056
87	92	Bureaucracy in bidding/tendering method	Owner	65.904
88	90	Inappropriate contractual procedure	Owner	65.856
89	53	Unfavorable weather conditions	External	65.536
90	29	Poor use of advanced engineering design software	Design	65.160
91	44	Delay in performing final inspection and certification by third party	External	64.808
92	50	Problem with neighbors	External	63.896
93	82	Lack of owner experience in construction projects	Owner	62.864
94	40	Accidents during construction	External	61.440
95	47	Loss of time by traffic control and restriction at job site	External	60.896
96	60	Personal conflicts among labor	Labor	60.712
97	56	Thefts done on site	External	60.536
98	51	Slow site clearance	External	60.392
99	65	Labor injuries on site	Labor	58.216

ANNEXE B TABLEAU RÉCAPITULATIF DES SOURCES DE DÉLAIS

Tableau B.1 – Tableau récapitulatif des sources de délais

Articles	1	2	3
Pays d'étude	Différent pays	Différent pays	China; Thailand; India; Nigeria; Ghana; Egypt; Saudi Arabia; UAE and Iran
External	<ul style="list-style-type: none"> -Price fluctuations -Poor economic conditions -Severe weather condition -Laws and regulations 	<ul style="list-style-type: none"> -Effects of bad weather on construction activities -Price fluctuations 	<ul style="list-style-type: none"> -Corruption -Inflation/price increases in material -Government funding processes
Labor	<ul style="list-style-type: none"> -Shortage of site labor 	<ul style="list-style-type: none"> -Shortage of skilled labor -Labour absenteeism -Lack of labour supervision 	<ul style="list-style-type: none"> -Unqualified/inexperienced workers
Equipment	<ul style="list-style-type: none"> -equipment Shortage (Machinery and its parts) 	<ul style="list-style-type: none"> -Frequent breakdowns of construction plant and equipment 	<ul style="list-style-type: none"> -Unavailability of utilities in site -Low efficiency and productivity of equipment -Insufficient or shortage of equipment
Material	<ul style="list-style-type: none"> -Shortage of Construction Material 	<ul style="list-style-type: none"> - Shortage of materials on site -Late delivery of construction materials 	<ul style="list-style-type: none"> -Lack of quality materials -Slow delivery of material
Finance	<ul style="list-style-type: none"> -Design change -Slowness in making decisions by owner -Delay in approval stage -Financial issues by client 	<ul style="list-style-type: none"> -Design change -Late payment by the owner for the completed work 	<ul style="list-style-type: none"> -Late release budget or funds
Management	<ul style="list-style-type: none"> -Poor communication between stakeholders -Poor site management and supervision 	<ul style="list-style-type: none"> -Poor site management -Accidents due to poor site safety - Poor communication and coordination 	<ul style="list-style-type: none"> -Late in approving and receiving of complete work -Poor site management and performance
Project-characteristics	<ul style="list-style-type: none"> -Project size -Inaccuracy and deficiencies in cost estimates 	<ul style="list-style-type: none"> -project complexities -Unrealistic project scheduling -Project size 	<ul style="list-style-type: none"> -Ineffective project planning and scheduling -Improper project feasibility study
Technical documents			<ul style="list-style-type: none"> -Late design and design documents -Unclear and inadequate details and specification of design -Design mistakes and errors
Human behavior		<ul style="list-style-type: none"> -Personal conflicts among labours 	

Tableau B.1 – Tableau récapitulatif des sources de délais (suite)

Article	4	5
Pays d'étude	Saudi Arabia	Egypte
External	<ul style="list-style-type: none"> -Wastes around the place -public exposure of the project -project location -site conditions -Weather 	<ul style="list-style-type: none"> -Global financial crisis -Insufficient data collection and survey before design -Unexpected surface& subsurface conditions (soil, water table, etc.) -Price fluctuations -Delay in obtaining permits from municipality
Labor	<ul style="list-style-type: none"> poor labour productivity lack of subcontractors skill lack of contractor experience lack of labour experience lack of trade skill poor distribution of labour too few supervisors/foremen 	<ul style="list-style-type: none"> -Rework due to errors -Selecting inappropriate contractors -Incompetent project team -Inadequate contractor experience -Unqualified/inadequate experienced labor -Unreliable subcontractors -Shortage of labor -Low productivity of labor
Equipment	<ul style="list-style-type: none"> -Equipment shortage -poor equipment choice/ineffective 	<ul style="list-style-type: none"> -Shortage of equipment -Frequent equipment breakdowns -Delay in providing services from utilities (water, electricity, etc.) -Equipment allocation problem -Low efficiency of equipment
Material	<ul style="list-style-type: none"> -poor resource management -unappropriate/misuse of material -poorly scheduled delivery of material to site -poor quality of materials -poor storage of materials 	<ul style="list-style-type: none"> -Shortage of construction materials -Late delivery of materials -Delay in manufacturing materials
Finance	<ul style="list-style-type: none"> -slow in making decision -Design changes 	<ul style="list-style-type: none"> -Delay in progress payments (funding problems) -Different tactics patterns for bribes -Poor financial control on site -Mode of financing and payment for completed work
Management	<ul style="list-style-type: none"> -poor site management -poor planning and scheduling -poor communication among project participants 	<ul style="list-style-type: none"> -Ineffective project planning and scheduling -Poor site management and supervision -Inadequate planning -Legal disputes between project participants -Frequent change of subcontractors -Poor communication and coordination
Project-characteristics	<ul style="list-style-type: none"> -project complexity 	<ul style="list-style-type: none"> -Complexity of project (project type, project scale, etc.) -Inappropriate construction methods -Suspension of work by owner

Tableau B.1 – Tableau récapitulatif des sources de délais (suite)

Article	6	7	8
Pays d'étude	USA	Portugal	UK
External	<ul style="list-style-type: none"> -Different Site Conditions -Subsurface Soil Conditions -Building Permits Approval Process -Changes in Laws and Regulations -Safety Rules 	<ul style="list-style-type: none"> -Excessive dependency on authorizations from several institutions and ruling bodies -Difficulties in obtaining licenses and permits from authorities 	<ul style="list-style-type: none"> -Bad weather -Ground problems - Physical obstructions (e.g., unexpected presence of services)
Labor	<ul style="list-style-type: none"> -Lack of Qualified Craftsmen 	<ul style="list-style-type: none"> -Deficient, labour planning, management and control -Shortage of skilled labourers -Low productivity 	<ul style="list-style-type: none"> - Shortage of appropriate (a) labour or tradesmen. (b) foreman or supervisors. (c) senior staff
Equipment		Deficient, equipment planning, management and control	-Breakdowns
Material	<ul style="list-style-type: none"> -Material/Fabrication Delays -Material Procurement 	Deficient, material planning, management and control	<ul style="list-style-type: none"> -Materials procurement or delivery delay - Plant shortage or procurement problem
Finance	<ul style="list-style-type: none"> -Delayed Payments 	<ul style="list-style-type: none"> -Frequent change orders during construction 	<ul style="list-style-type: none"> -Waiting for information from the client or his representative -Variation orders
Management	<ul style="list-style-type: none"> -Inspections -Contract Modifications 	<ul style="list-style-type: none"> -Deficient, activity planning, management and control -Neglect critical activities -Deficient coordination among participants 	<ul style="list-style-type: none"> -Joint venture co-ordination problems. -Significant contractual disputes
Project-characteristics		<ul style="list-style-type: none"> -Tendency to use procurement systems with a bias toward the cheapest solution -Overly optimistic planning 	
Technical documents	<ul style="list-style-type: none"> -Design Development -Change Order -Decision in development stage -Shop Drawings Approval -Incomplete Documents 	<ul style="list-style-type: none"> -Incomplete designs, ambiguities, errors, omissions, inadequate or inconsistent detailing, etc. -Errors in design due to the lack of knowledge of local conditions and environment -Delays while preparing technical documents by designers while construction is in progress 	-Design complexity
Human behavior			-Industrial disputes/strikes

Tableau B.1 – Tableau récapitulatif des sources de délais (suite)

Article	9	10	11	12
Pays d'étude	USA	Australia	UK	Portugal
External	-Effects of weather -Change in the circumstances inwhich the work is being carriedout resulting in lower productivity than planned -Vandalism	-Economic environmental complexit		external factors site conditions
Labor	-availability oflabour or a specialist subcontractor who are unable to start -Restrictions in the supply of labour -Inadequate labour		-Low skilled manpower	Workforce
Equipment	-Unscheduled breakdowns of plant		-Lack of appropriate software	-lack of equipment maintenance
Material	-The delivery of plant or materialscheduled for a specific date without which the work cannotproceed -Restrictions in the supply of plant or materials -Inadequate materials -Re-working as a result ofworkmanship or materials notbeing in accordance with the specification		-Dependency on imported materials	Material
Finance		-CR's experience with the building proces s (client representitive team) -CR's ability to make authoritative decision -CR's organizational structure to accept risk -CR and design team communication decision-making effectiveness		client responsability

Tableau B.1 – Tableau récapitulatif des sources de délais (suite et fin)

Management		<ul style="list-style-type: none"> -CM's effectiveness in team management to achieve synergy -CM and design team communication for decision making -Number of concurrent projects -CM's experience in this type of building -CM management systems and procedure 	<ul style="list-style-type: none"> -Conflict between project parties -Financing and payment for completed works -Contract and specification interpretation disagreement -Weak regulation and control 	<ul style="list-style-type: none"> -contractor management -lack of individual/collective protection -Lack of specific training
Project-characteristics	<ul style="list-style-type: none"> -Postponement of the works -Increase in the work content of an activity -New or additional work incorporated into the project subsequent to the production of the original programme 		<ul style="list-style-type: none"> -Inaccurate evaluation of projects time/duration -Complexity of works -Risk and uncertainty associated with projects -Project fraud and corruption 	-high risk of activities
Technical documents	<ul style="list-style-type: none"> -The release of information without which the activity cannot proceed -Changes in specification of materials or techniques which result in activities no longer able to be carried out concurrently 	<ul style="list-style-type: none"> -Design team's confidence in the contribution -Design buildability complexity -Design team's mechanistic-oriented management style -Design team's people-oriented management style -Decision-making communication within the design team 	<ul style="list-style-type: none"> -Design changes -- Discrepancies in contract documentation 	<ul style="list-style-type: none"> design errors or omissions cardinal changes imposed by third parties
Human behavior	-Strikes and lockouts			

ANNEXE C DÉTAILS POUR LA SÉLECTION DES INDICATEURS DE PERFORMANCE

Tableau C.1 – Détails pour la sélection des indicateurs de performance

Facteur de non-performance	Indicateurs créés	
Facteurs externes		
Mauvaises conditions économiques (fluctuations des prix)	Pas d'actions possibles	
Conditions météorologiques	Condition météo	
Lois, règlements (et règles de sécurité)	Document et autorisations	Règle de sécurité
Permis de construire		
Condition du site (principalement l'état du sol ; obstructions)	Pas d'actions possibles sinon problème de qualification	
Vandalisme	Hors cadre des activités d'exécution	
Exposition au public	Hors cadre des activités d'exécution	
Corruption	Hors cadre des activités d'exécution	
Ressources humaines		
Manques de qualification	Qualification humaine	
Faible productivité	Productivité	
Manque de protections individuelles/ collectives (Équipements et formations)	Sécurité individuelle	
Re-Works (Humain)	Facteur sous-jacent d'un autre (qualification)	
Manque de supervision des ouvriers (mauvaise répartition)	Disponibilité humaine	
Équipements		
Manque d'équipement (machines et leurs pièces)	Disponibilité Équipement	
Pannes (équipement ; manque d'entretien)	État Équipement	
Manque de logiciels appropriés	Hors cadre des activités d'exécution	
Mauvais choix d'équipement (inefficace)	Pas d'actions possibles sinon problème de qualification	
Retard dans la fourniture des services (eau, électricité, etc.)	Disponibilité Équipement	
Matériaux		
Pénurie de matériaux de construction sur le chantier	Disponibilité matériaux	
Mauvaise qualité (matériel/stockage/approvisionnement)	Qualité matériaux	
Re-Works (non approprié/utilisé à mauvais escient)	Facteur sous-jacent d'un autre (qualification humaine)	
Finance		

Tableau C.1 – Détails pour la sélection des indicateurs de performance (suite et fin)

Retard de paiement pour les travaux achevés		
Différentes tactiques pour les pots-de-vin		
Mode de financement et de paiement des travaux achevés		
Management		
Mauvaise communication et coordination entre les parties prenantes	Communication et coordination	
Litiges contractuels (désaccord ; malentendu)		
Lenteur dans la prise de décisions (attente d'informations)		
Mauvaise gestion et supervision du site	Suivi et contrôle	
Gestion et contrôle déficients des activités (négliger les activités critiques)		
Changement fréquent de sous-traitants	Facteur non pertinent	
Caractéristiques du projet		
Planification déficiente des activités	Hors cadre des activités d'exécution	
Complexité	Facteur non pertinent	
Accident dû à une activité risquée	Sécurité individuelle	Règle de sécurité
Méthodes de construction inappropriées	Document et autorisations	
Documents techniques		
Ordres de modification (Client)	Pas d'actions possibles directes. Agir sur la communication, les documents et suivi et contrôle.	
Documents incomplets	Document et autorisations	
Erreurs de conception		
Délais pour les documents techniques (et l'approbation)		
Complexité	Facteur non pertinent	
Mauvaise qualité/conception (peu claire)	Facteur sous-jacent d'un autre (incomplet ou erreur)	
Comportements humains		
Relation d'équipe (conflits personnels : sociaux/culturels)	Hors cadre des activités d'exécution	
Litiges/grèves	Hors cadre des activités d'exécution	
Motivation des employés	Productivité	

ANNEXE D DÉTAILS DES FACTEURS DE NON-PERFORMANCE AGRÉGÉS

Tableau D.1 – Détails des facteurs de non-performance agrégés

Facteurs issus de la littérature	Facteurs agrégés
	Conditions externes
<ul style="list-style-type: none"> -Price fluctuations -Poor economic conditions -Price fluctuations -Global financial crisis -Inflation/price increases in material -Government funding processes -Price fluctuations 	Mauvaises conditions économiques (fluctuations des prix)
<ul style="list-style-type: none"> -Severe weather condition -Effects of bad weather on construction activities -weather -Bad weather -Effects of weather 	Conditions météorologiques
<ul style="list-style-type: none"> -Laws and regulations -Changes in Laws and Regulations -Safety Rules -Excessive dependency on authorizations from several institutions and ruling bodies 	Lois, règlements (et règles de sécurité)
<ul style="list-style-type: none"> -Wastes around the place -project location -site conditions -Insufficient data collection and survey before design -Unexpected surface& subsurface conditions (soil, water table, etc.) -Different Site Conditions -Subsurface Soil Conditions -Ground problems -Physical obstructions (e.g., unexpected presence of services) 	Condition du site (principalement l'état du sol ; obstructions)
<ul style="list-style-type: none"> -Delay in obtaining permits from municipality -Building Permits Approval Process -Difficulties in obtaining licenses and permits from authorities 	Permis de construire
-Vandalism	Vandalisme
-public exposure of the project	Exposition au public
-Corruption	Corruption
-Project fraud and corruption	

Tableau D.1 – Détails des facteurs de non-performance agrégés (suite)

	Ressources humaines
<ul style="list-style-type: none"> -Shortage of site labor -Shortage of skilled labor -Labour absenteeism -lack of subcontractors skill -lack of contractor experience -lack of labour experience -lack of trade skill -Unqualified/inexperienced workers -Selecting inappropriate contractors -Incompetent project team -Inadequate contractor experience -Unqualified/inadequate experienced labor -Unreliable subcontractors -Shortage of labor -Lack of Qualified Craftsmen -Shortage of skilled labourers -Shortage of appropriate (a) labour or tradesmen. (b) foreman or supervisors. (c) senior staff -availability of labour or a specialist subcontractor who are unable to start -Restrictions in the supply of labour -Inadequate labour -Low skilled manpower -Workforce 	<p>Manque de ressources qualifiées</p>
<ul style="list-style-type: none"> -poor labour productivity -Low productivity of labor -Low productivity 	<p>Faible productivité</p>
<ul style="list-style-type: none"> -lack of individual/collective protection -Lack of specific training 	<p>Manque de protections individuelles/collectives (Équipements et formations)</p>
<ul style="list-style-type: none"> -Rework due to errors 	<p>re-work (Humain)</p>
<ul style="list-style-type: none"> -Lack of labour supervision -poor distribution of labour -too few supervisors/foremen -Deficient, labour planning, management and control 	<p>Manque de supervision des ouvriers</p>

Tableau D.1 – Détails des facteurs de non-performance agrégés (suite)

	Equipements
-equipment Shortage (Machinery and its parts) -Low efficiency and productivity of equipment -Insufficient or shortage of equipment -Equipment shortage -Equipment allocation problem -Low efficiency of equipment	Manque d'équipement (machines et leurs pièces)
-Frequent breakdowns of construction plant and equipment -Frequent equipment breakdowns -Breakdowns -Unscheduled breakdowns of plant -lack of equipment maintenance	Pannes (équipement ; manque d'entretien)
-Lack of appropriate software	Manque de logiciels appropriés
-poor equipment choice/ineffective	Mauvais choix d'équipement (inefficace)
-Unavailability of utilities in site -Delay in providing services from utilities (water, electricity, etc.)	Retard dans la fourniture des services (eau, électricité, etc.)
	Matériaux
-Shortage of construction Material -Shortage of materials on site -Late delivery of construction materials -Slow delivery of material -poor resource management -poorly scheduled delivery of material to site -Shortage of construction materials -Late delivery of materials -Delay in manufacturing materials -Material/Fabrication Delays -Material Procurement -Materials procurement or delivery delay - Plant shortage or procurement problem -The delivery of plant or materials scheduled for a specific date without which the work cannot proceed -Restrictions in the supply of plant or materials -Dependency on imported materials	Pénurie de matériaux de construction sur le chantier
-Lack of quality materials -poor quality of materials -poor storage of materials -Inadequate materials	Mauvaise qualité (matériel/stockage/approvisionnement)

Tableau D.1 – Détails des facteurs de non-performance agrégés (suite)

<ul style="list-style-type: none"> -unappropriate/misuse of material -Inadequate materials -Re-working as a result of workmanship or materials not being in accordance with the specification 	Re-Works (non approprié/utilisé à mauvais escient)
	Finance
<ul style="list-style-type: none"> -Financial issues by client -Late payment by the owner for the completed work -Late release budget or funds -Poor financial control on site -Delay in progress payments (funding problems) -Financing and payment for completed works 	Retard de paiement pour les travaux achevés
<ul style="list-style-type: none"> -Mode of financing and payment for completed work -Different tactics patterns for bribes 	Mode de financement et de paiement des travaux achevés
	Management
<ul style="list-style-type: none"> -Poor communication between stakeholders -Poor communication and coordination -poor communication among project participants -Poor communication and coordination -Deficient coordination among participants 	Mauvaise communication et coordination entre les parties prenantes
<ul style="list-style-type: none"> -Legal disputes between project participants -Conflicts between joint-ownership -Significant contractual disputes -Contract and specification interpretation disagreement 	Litiges contractuels (désaccord ; malentendu)
<ul style="list-style-type: none"> -Late in approving and receiving of complete work -Slowness in making decisions by owner 	Lenteur dans la prise de décisions (attente d'informations)
<ul style="list-style-type: none"> -Poor site management and supervision -Poor site management -Accidents due to Poor site safety -poor site management -poor planning and scheduling -Poor site management and performance -Ineffective project planning and scheduling -Poor site management and supervision -Inadequate planning -Weak regulation and control 	Mauvaise gestion et supervision du site

Tableau D.1 – Détails des facteurs de non-performance agrégés (suite)

<ul style="list-style-type: none"> -Neglect critical activities -Deficient, activity planning, management and control 	Gestion et contrôle déficients des activités (négliger les activités critiques)
<ul style="list-style-type: none"> -Frequent change of subcontractors 	Changement fréquent de sous-traitants Caractéristiques du projet
<ul style="list-style-type: none"> -Inaccuracy and deficiencies in cost estimates -Ineffective project planning and scheduling -Improper project feasibility study -Improper project feasibility study -Overly optimistic planning -Tendency to use procurement systems with a bias toward the cheapest solution -Inaccurate evaluation of projects time/duration 	Planification déficiente des activités
<ul style="list-style-type: none"> -Project size -project complexities -Project size -project complexity -Complexity of project (project type, project scale, etc.) -Suspension of work by owner -Number of concurrent projects -Complexity of works -Risk and uncertainty associated with projects 	Complexité
<ul style="list-style-type: none"> -high risk of activities 	Accident dû à une activité risquée
<ul style="list-style-type: none"> -Inappropriate construction methods 	Méthodes de construction inappropriées
<ul style="list-style-type: none"> -Design change -Design changes -Change orders -Frequent change orders during construction -Cardinal changes imposed by third parties 	Documents techniques
<ul style="list-style-type: none"> -Incomplete documents -Incomplete designs -omissions 	Ordres de modification (Client)
	Documents incomplets

Tableau D.1 – Détails des facteurs de non-performance agrégés (suite et fin)

<ul style="list-style-type: none"> -Design mistakes and errors -Design errors and omissions made by designers -Mistakes and delays in producing design documents -errors, inadequate or inconsistent detailing, etc -Errors in design due to the lack of knowledge of local conditions and environment -Discrepancies in contract documentation -design errors 	Erreurs de conception
<ul style="list-style-type: none"> -Delay in approval stage -Late Design and Design documents -slow in making decision -slow drawing revisions and distribution -Slowness in decision making -Delay in approving major changes in scope of work by consultant -Delays while preparing technical documents by designers while construction is in progress 	Délais pour les documents techniques (et l'approbation)
<ul style="list-style-type: none"> -Design complexity -Design buildability complexity -Decision-making communication within the Design team 	Complexité
<ul style="list-style-type: none"> -Unclear and inadequate details and specification of Design -poor quality site documentation -Unclear specifications -poor design -unclear site drawings supplied -ambiguities 	Mauvaise qualité/conception (peu claire)
	Comportements humains
<ul style="list-style-type: none"> -Personal conflicts among labours -social and cultural impacts -Team working relationships -Conflict between project parties 	Relation d'équipe (conflits personnels : sociaux/culturels)
<ul style="list-style-type: none"> -Industrial disputes/strikes -Strikes and lockouts 	Litiges/grèves
<ul style="list-style-type: none"> -Employees motivation -Belonging to work 	Motivation des employés