



**L'IMPACT DU BIM ET DES ALGORITHMES
D'OPTIMISATION DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE
SUR LE MANAGEMENT DE LA QUALITÉ DES PROJETS
DE CONSTRUCTION**

Mémoire présenté
dans le cadre du programme de maîtrise en gestion de projet
en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

PAR
© Abdelkader BENAYAD

Novembre 2025

Composition du jury :

Amal Marzouki, présidente du jury, Université du Québec à Rimouski

Érika Souza De Melo, directrice de recherche, Université de Sherbrooke

Sara Rankohi, examinatrice externe, Université du Québec à Montréal

Dépôt initial le 15 août 2025

Dépôt final le 5 novembre 2025

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

À Dieu tout-puissant, pour la force, la patience et l'inspiration tout au long de ce parcours.

À moi-même, pour avoir résisté, persévétré, et pour tous les sacrifices consentis afin d'atteindre mes objectifs.

À mes parents, mes sœurs et mon frère, pour leur présence, leur encouragement et leur bienveillance à chaque étape.

À mon amie, pour m'avoir accompagné dans les moments difficiles.

REMERCIEMENTS

Ce mémoire est bien plus qu'un simple document académique. C'est la trace écrite d'un parcours semé de doutes, d'efforts, de cafés tardifs, de nuits blanches, de remises en question et d'un objectif toujours gardé en ligne de mire.

À ma directrice de recherche, Érika Souza De Melo, dont la patience, la rigueur et la confiance m'ont guidé bien au-delà des pages de ce travail. Merci d'avoir cru en ce projet même quand il semblait complexe.

Un grand merci par avance aux membres du jury, pour le temps qu'ils consacreront à la lecture attentive de ce mémoire et pour les remarques enrichissantes qui permettront d'en affiner la qualité.

À tous celles et ceux qui ont contribué à faciliter la réalisation de ce mémoire, votre aide, souvent discrète, a été précieuse.

RÉSUMÉ

Ce mémoire de maîtrise, analyse l'impact de l'intégration du *Building Information Modeling* (BIM) et de l'intelligence artificielle (IA), précisément les algorithmes de l'optimisation (OPT) sur le management de la qualité (QM) dans les projets de construction. L'étude explore comment ces technologies influencent les processus de gestion de la qualité, notamment la planification, l'assurance et le contrôle de la qualité, en se basant sur les principes du Guide de corpus des connaissances en management de projet (PMBOK) 6^e édition. Deux propositions ont été avancées : la première suggère que le BIM améliore la collaboration entre les parties prenantes, optimise la coordination, facilite la détection des défauts, assure une meilleure traçabilité des données et soutient la prise de décision tout au long du cycle de vie du projet. La deuxième propose que l'OPT, améliore la qualité en offrant la possibilité à une prise de décision bien éclairée, basée sur la comparaison de plusieurs alternatives, la transformation des exigences du client en critères mesurables, une productivité accrue, une amélioration continue ainsi qu'un équilibre entre le coût, la durée et la qualité. Les résultats des deux études de cas menées appuient et complètent ces propositions. Le BIM intervient dans les trois processus identifiés en lien avec le management de la qualité de projet : planification de la qualité, assurance qualité et contrôle qualité. Il contribue à la structuration du plan qualité, au suivi des exigences, à la coordination entre les acteurs et à la détection des défauts. À travers ces effets, le BIM est considéré comme un outil pour la mise en œuvre de plusieurs principes du management de la qualité, tel que l'approche processus, l'amélioration continue, l'implication du personnel et la prise de décision fondée sur des données fiables. De son côté, les algorithmes d'OPT sont principalement mobilisés dans les phases de conception et planification, ils offrent un soutien aux trois processus en favorisant une structuration rigoureuse des objectifs de la qualité et une meilleure conformité aux exigences. L'OPT représente un levier stratégique pour une

gouvernance de la qualité plus proactive et alignée sur les exigences des projets contemporains.

Mots-clés : qualité, construction, management de la qualité, building information modeling, optimisation, intelligence artificielle, planification de la qualité, assurance de la qualité, contrôle de la qualité.

ABSTRACT

This master's dissertation analyses the impact of integrating Building Information Modelling (BIM) and Artificial Intelligence (AI), specifically optimization algorithms (OPT), on quality management (QM) in construction projects. The study explores how these technologies influence quality management processes namely, quality planning, quality assurance, and quality control, based on the principles of the Project Management Body of Knowledge (PMBOK) Guide, 6th edition. Two propositions were put forward: the first suggests that BIM enhances stakeholder collaboration, optimizes coordination, facilitates defect detection, ensures better data traceability, and supports decision-making throughout the project life cycle. The second proposes that OPT improves quality by enabling well-informed decision-making based on the comparison of multiple alternatives, transforming client requirements into measurable criteria, increasing productivity, fostering continuous improvement, and balancing cost, time, and quality. The results of the two case studies conducted support and complement these propositions. BIM plays a role in the three identified processes related to project quality management: quality planning, quality assurance, and quality control. It contributes to structuring the quality plan, monitoring requirements, coordinating stakeholders, and detecting defects. Through these effects, BIM is considered a tool for implementing several quality management principles, such as the process approach, continuous improvement, employee involvement, and data-driven decision-making. On the other hand, OPT algorithms are mainly used during the design and planning phases. They support the three processes by promoting a rigorous structuring of quality objectives and better compliance with requirements. OPT represents a strategic lever for more proactive quality governance that is aligned with the demands of contemporary projects.

Keywords: quality, construction, quality management, building information modeling, optimisation, artificial intelligence, quality planning, quality assurance, quality control

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-------|
| REMERCIEMENTS | viii |
| RÉSUMÉ..... | x |
| ABSTRACT | xiii |
| TABLE DES MATIÈRES..... | xv |
| LISTE DES TABLEAUX | xix |
| LISTE DES FIGURES | xx |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES | xxiii |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE..... | 1 |
| CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE..... | 3 |
| 1.1 LES PROJETS DE CONSTRUCTION ET LA QUALITÉ | 3 |
| 1.1.1 La construction dans le monde | 3 |
| 1.1.2 Enjeu de la qualité aux projets de la construction | 4 |
| 1.2 ÉTAT DE LA LITTÉRATURE | 6 |
| 1.2.1 Les articles publiés par pays et territoires | 7 |
| 1.2.2 Top journaux | 8 |
| 1.2.3 Les auteurs les plus cités | 8 |
| 1.2.4 Les articles les plus cités | 9 |
| 1.2.5 L'analyse des mots-clés..... | 10 |
| 1.2.6 Les apports et les lacunes de la littérature | 14 |
| 1.3 PROBLÉMATIQUE SPÉCIFIQUE..... | 15 |
| 1.4 LOCALISATION DE LA RECHERCHE DANS LA LITTÉRATURE | 16 |
| 1.5 OBJECTIFS ET QUESTIONS DE LA RECHERCHE | 17 |
| 1.6 PÉRIMÈTRE DE LA RECHERCHE | 18 |

| | |
|--|----|
| CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE | 19 |
| 2.1 LE MANAGEMENT DE LA QUALITÉ | 19 |
| 2.1.1 Définition de la qualité..... | 19 |
| 2.1.2 La qualité dans la construction | 20 |
| 2.1.3 Le processus de management de la qualité | 21 |
| 2.1.4 Les principes de management de la qualité | 26 |
| 2.2 BUILDING INFORMATION MODELING | 27 |
| 2.2.1 Définition du BIM..... | 28 |
| 2.2.2 Les aspects clés du BIM | 29 |
| 2.2.3 L'utilisation du BIM par phase de projet..... | 35 |
| 2.3 L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE..... | 37 |
| 2.3.1 Définition de l'intelligence artificielle..... | 37 |
| 2.3.2 Évolution de l'intelligence artificielle | 38 |
| 2.3.3 Types, sous-domaines et composantes de l'IA | 39 |
| 2.3.4 Motivation de choix du sous-domaine étudié | 40 |
| 2.3.5 Définition de l'optimisation (OPT)..... | 42 |
| 2.3.6 Les applications de l'OPT au management de projets de construction..... | 42 |
| 2.4 MISE EN ÉVIDENCE DE LA RELATION ENTRE LES VARIABLES Y ET X : IMPACT DE L'UTILISATION DU BIM (Y) SUR LE MANAGEMENT DE LA QUALITÉ (X) | 43 |
| 2.4.1 Traçabilité des données de la qualité durant le cycle de vie du projet.... | 45 |
| 2.4.2 Amélioration de la collaboration et de la coordination..... | 47 |
| 2.4.3 Simplification de processus de la prise des décisions..... | 48 |
| 2.4.4 Détection, management et réduction des incohérences | 49 |
| 2.4.5 Optimisation des processus et de la productivité | 49 |
| 2.5 MISE EN ÉVIDENCE DE LA RELATION ENTRE LES VARIABLES Z ET X : IMPACT DE L'INTÉGRATION DE L'IA (Z) SUR LE MANAGEMENT DE LA QUALITÉ (X) | 50 |
| 2.5.1 L'impact des algorithmes d'optimisation sur le management de la qualité..... | 50 |
| 2.6 PROPOSITIONS DES RELATIONS ENTRE LES VARIABLES X, Y ET Z | 52 |
| 2.6.1 Proposition 1 (P1) : Impact de l'utilisation du BIM (Y) sur le management de la qualité (X) | 52 |

| | |
|--|----|
| 2.6.2 Proposition 2 (P2) : Impact de l'utilisation de l'IA (Z) sur le management de la qualité (X)..... | 53 |
| 2.6.3 Cadre conceptuel final | 54 |
| CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE | 56 |
| 3.1 POSITIONNEMENT DE LA RECHERCHE..... | 57 |
| 3.2 LITTÉRATURES MOBILISÉES | 58 |
| 3.3 NIVEAU D'ANALYSE ET UNITÉ D'ANALYSE | 58 |
| 3.4 L'APPROCHE DE RECHERCHE..... | 59 |
| 3.5 LE DESIGN DE RECHERCHE ENVISAGÉ..... | 59 |
| 3.6 LA STRATÉGIE DE RECHERCHE ENVISAGÉE..... | 60 |
| 3.7 L'HORIZON DE TEMPS DE LA RECHERCHE | 61 |
| 3.8 TECHNIQUES DE COLLECTE DES DONNÉES | 62 |
| 3.9 PROCESSUS DE SÉLECTION DES ÉTUDES DE CAS..... | 63 |
| 3.9.1 Les stratégies de l'étude de cas | 63 |
| 3.9.2 Les critères de sélection des études de cas assurant la qualité de la recherche..... | 64 |
| 3.10 PROCESSUS DE L'ÉTUDE DE CAS ET DE L'ANALYSE DES DONNÉES | 65 |
| 3.11 LA VALIDITÉ ET LA FIABILITÉ DE LA RECHERCHE | 67 |
| 3.12 RÉCAPITULATIF DE LA MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE..... | 68 |
| CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET DISCUSSION | 69 |
| 4.1 L'ÉTUDE DE CAS DE LA PROPOSITION 1, IMPACT DU BIM SUR LE MANAGEMENT DE LA QUALITÉ | 69 |
| 4.1.1 Présentation de l'étude de cas : le futur siège de Fidelidade à Lisbonne, Portugal..... | 70 |
| 4.1.2 Méthode et résultat de l'utilisation du BIM dans ce projet | 71 |
| 4.1.3 Analyse et discussion | 80 |
| 4.1.4 Synthèse..... | 82 |
| 4.2 L'ÉTUDE DE CAS DE LA PROPOSITION 2, IMPACT DE L'IA, PLUS PRÉCISÉMENT L'OPT SUR LE MANAGEMENT DE LA QUALITÉ | 84 |

| | |
|---|------------|
| 4.2.1 Présentation de l'étude de cas : <i>Project Discovery</i> d'Autodesk à Toronto, Canada..... | 85 |
| 4.2.2 Méthode et résultats de l'utilisation de l'IA dans ce projet | 86 |
| 4.2.3 Analyse et discussion..... | 93 |
| 4.2.4 Synthèse | 95 |
| CONCLUSION GÉNÉRALE..... | 97 |
| Appendice | 99 |
| APPENDICE 1 : LISTE DES SOURCES D'INFORMATIONS DE L'ÉTUDE DE CAS 1, LE FUTUR SIÈGE DE FIDELIDADE À LISBONNE, PORTUGAL..... | 99 |
| APPENDICE 2 : LISTE DES SOURCES D'INFORMATIONS DE L'ÉTUDE DE CAS 2, PROJET DISCOVERY D'AUTODESK À TORONTO, CANADA..... | 100 |
| ANNEXE 1 | 102 |
| ANNEXE 2 | 106 |
| ANNEXE 3 | 109 |
| RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... | 111 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|-----|
| Tableau 1 : Nombre des articles publiés par période..... | 7 |
| Tableau 2 : Nombre d'articles publiés par pays et territoires | 7 |
| Tableau 3 : Top journaux par nombre de citations | 8 |
| Tableau 4 : Les auteurs les plus cités..... | 8 |
| Tableau 5 : Les articles les plus cités..... | 9 |
| Tableau 6 : Les catégories des mots-clés..... | 12 |
| Tableau 7 : Objectifs et questions de la recherche..... | 18 |
| Tableau 8 : Processus de la planification de la qualité. | 23 |
| Tableau 9 : Processus de l'assurance qualité. | 24 |
| Tableau 10 : Processus de contrôle de la qualité. | 25 |
| Tableau 11 : Usages du BIM par phase de projet | 36 |
| Tableau 12 : Études de cas présentées. | 69 |
| Tableau 13 : Surfaces et usages des parcelles du projet. | 71 |
| Tableau 14 : Estimation des optimisations de coût et délai faites après la détection et la résolution des incohérences..... | 79 |
| Tableau 15 : Récapitulatif de l'impact du BIM sur le management de la qualité. | 84 |
| Tableau 16 : Récapitulatif de l'impact de l'OPT sur le management de la qualité. | 96 |
| Tableau A1. 1. Les mots clés trouvés dans l'analyse cooccurrence. | 102 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1. La requête de recherche utilisée, par l'auteur à partir de Scopus. | 6 |
| Figure 2. Seuil et résultats de l'analyse des mots-clés, par l'auteur à partir de VosViewer. | 10 |
| Figure 3. Visualisation de la densité des catégories. Par l'auteur, mai 2024. | 13 |
| Figure 4. Visualisation du réseau (<i>Network visualisation</i>). Par l'auteur, mai 2024. | 13 |
| Figure 5. Le cadre conceptuel préliminaire, par l'auteur. | 16 |
| Figure 6. Diagramme de Venn. Par l'auteur. | 17 |
| Figure 7. Les processus de management de la qualité selon PMBOK 6 ^e (PMI, 2017)..... | 22 |
| Figure 8. Les groupes des processus de management de la qualité, par l'auteur. | 22 |
| Figure 9. Principes de management de la qualité selon ISO 9000-2015, par l'auteur. | 27 |
| Figure 10. Modèle de l'interaction entre les parties prenantes en utilisant le CDE (Bassir et al., 2023). | 30 |
| Figure 11. Comparaison entre les méthodes traditionnelles et le CDE du BIM (Biju, 2022). | 30 |
| Figure 12. Les dimensions du BIM. (Association Pour l'Emploi des Cadres [APEC], 2017). | 32 |
| Figure 13. Les niveaux de maturité du BIM (Boton et Kubicki, 2014). | 33 |
| Figure 14. Cycle de vie du projet de construction, par l'auteur sur la base de PMI (2016). | 35 |
| Figure 15. Évolution de l'intelligence artificielle, par l'auteur. | 39 |
| Figure 16. Types, sous-domaines et composantes de l'IA, par l'auteur à partir de (Abioye et al., 2021). | 40 |
| Figure 17. Le sous-domaine choisi pour l'étude, par l'auteur. | 41 |
| Figure 18. L'impact de l'intégration du BIM sur le management de la qualité, par l'auteur. | 45 |
| Figure 19. Gestion des données durant le cycle de vie du projet (Eastman et al., 2018). | 46 |

| | |
|---|-----|
| Figure 20. La collaboration BIM via le modèle fédéré (Davies et al., 2015), modifié..... | 48 |
| Figure 21. Impact de l'OPT sur le management de la qualité, par l'auteur..... | 51 |
| Figure 22 : Cadre conceptuel final, par l'auteur | 55 |
| Figure 23. Les aspects choisis dans l'oignon de la recherche de Saunders et al. (2012). | 57 |
| Figure 24. Utilisation des stratégies de recherche dans l'IJPM en 2018 et 2019 (Vizcarguenaga-Aguirre et López-robles, 2020), modifié..... | 60 |
| Figure 25. Les étapes de l'étude de cas selon Yin et al. (2018), modifié. | 65 |
| Figure 26. Récapitulation de la méthodologie de recherche suivie, par l'auteur..... | 68 |
| Figure 27. Répartition des parcelles du projet (Hilgemberg, 2024). | 70 |
| Figure 28. Illustration de CDE, par l'auteur. | 73 |
| Figure 29. Illustration du processus de partage des informations suivi dans le CDE (Bernard, 2024). | 74 |
| Figure 30. Le modèle collaboratif du projet (Roux et Lima, 2022)..... | 76 |
| Figure 31 : Niveaux de la détection des conflits, par l'auteur. | 77 |
| Figure 32. Nombre des conflits détectés par discipline dans le temps (Roux et Lima, 2022)..... | 78 |
| Figure 33. Variations de l'estimation budgétaires découvertes par disciplines aux parcelles A et B1 après l'utilisation du BIM (Hilgemberg, 2024). | 80 |
| Figure 34. Présentation simplifiée de la méthode GD (Walmsley et Villaggi, 2018), modifié. | 86 |
| Figure 35. Étape de la création du modèle géométrique (Gerfen, 2018), modifié. | 88 |
| Figure 36. Les paramètres de l'évaluation (Walmsley et Villaggi, 2018), modifié. | 90 |
| Figure 37. L'étape de l'évaluation (Gerfen, 2018), modifié..... | 90 |
| Figure 38. Résultat de l'analyse Pareto entre les deux métriques : agencement de l'espace et l'atmosphère de l'intérieur (Nagy et al., 2017), modifié..... | 92 |
| Figure A2. 1. Exemple des commentaires partagés sur le CDE (Roux et Lima, 2022) | 106 |
| Figure A2. 2. Exemple de l'approbation d'une tâche partagée (Roux et Lima, 2022)..... | 106 |

| | |
|--|-----|
| Figure A2. 3. Exemple de l'attribution des incohérences aux équipes pour correction (Roux et Lima, 2022)..... | 107 |
| Figure A2. 4. Exemple d'incohérence type 1 (Roux et Lima, 2022). | 107 |
| Figure A2. 5. Exemple d'une incohérence type 2 (Roux et Lima, 2022). | 108 |
| Figure A2. 6. Exemple d'une incohérence type 3 (Roux et Lima, 2022). | 108 |
| Figure A3. 1. Visualisation de l'atmosphère intérieure (Gerfen, 2018)..... | 109 |
| Figure A3. 2. Visualisation de l'atmosphère intérieure (Gerfen, 2018)..... | 109 |
| Figure A3. 3. Visualisation de l'atmosphère intérieure (Gerfen, 2018)..... | 110 |
| Figure A3. 4. Visualisation de l'atmosphère intérieure (Gerfen, 2018)..... | 110 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

| | |
|------------|---|
| ACO | Ant Colony Optimization/ Optimisation par colonies de fourmis |
| AEC | Architecture, Engineering & Construction / Architecture, ingénierie et construction |
| API | Application Programming Interface/ Interface de programmation d'application |
| BEP | BIM Execution Plan / Plan d'exécution BIM |
| BIM | Building Information Modeling |
| CAO | Conception Assistée par Ordinateur |
| CDE | Common Data Environment / Environnement des données commun |
| CoQ | Cost of Quality / Coût de la qualité |
| DAO | Dessin Assisté par Ordinateur |
| DE | Differential Evolution/ Évolution différentielle |
| EA | Evolutionary Algorithms/ Algorithmes évolutionnaires |
| GA | Genetic Algorithms/ Algorithmes génétiques |
| GD | Generative Design / Conception générative |
| GP | Gestion de Projet |
| IA | Intelligence Artificielle |

| | |
|--------------|--|
| IBM | International Business Machines corporation |
| IJPM | International Journal of Project Management |
| ISO | Organisation Internationale de Normalisation |
| MEP | Mécanique, Électricité et Plomberie |
| MIPIM | Marché International des Professionnels de l'Immobilier |
| ML | Machine Learning / Apprentissage automatique |
| MOGA | Multi-Objective Genetic Algorithm / Algorithme génétique multiobjectif |
| MP | Management de Projet |
| OPT | Optimization |
| PIB | Produit Intérieur Brut |
| PMBOK | Corpus de connaissances en management de projet |
| PMI | Project Management Institute |
| PSO | Particle Swarm Optimisation/ Optimisation par essaim de particules |
| QA | Assurance de la Qualité |
| QC | Contrôle de la Qualité |
| QM | Management de la Qualité |
| QP | Planification de la Qualité |
| RFIs | Requests For Information/ Demandes de renseignements |
| SVM | Support Vector Machine/ Machine à vecteurs de support |

| | |
|-------------|---|
| TQMS | Total Quality Management System/ Système de management de la qualité totale |
| TQM | Total Quality Management / Management de la qualité totale |
| QFD | Quality Function Deployment / Déploiement de la fonction qualité |
| QMP | Quality Management Plan / Plan de management de la qualité |

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans les projets de construction, la question de la qualité revient constamment, que ce soit pour assurer la conformité des ouvrages, satisfaire les exigences des clients, ou encore garantir la durabilité des projets. Aujourd’hui, la pression sur les coûts et les délais est telle que le management de la qualité (QM) devient un enjeu stratégique, et non seulement une exigence réglementaire. C’est dans ce contexte que plusieurs outils numériques, comme le *Building Information Modeling* (BIM) et certains sous-domaines de l’intelligence artificielle (IA), notamment l’optimisation (OPT), commencent à occuper une place de plus en plus visible. Ce mémoire vise à étudier l’impact du BIM et de l’OPT sur le management de la qualité dans les projets de construction. Ces trois concepts représentent le cœur de cette recherche. Le BIM désigne une méthode de travail collaborative reposant sur des modèles numériques partagées. L’OPT représente un sous domaine de l’IA qui consiste à trouver la meilleure solution et la meilleure décision possible en tenant compte de contraintes définies. Enfin, Le QM représente l’ensemble des processus organisés qui visent à garantir la conformité du projet aux attentes des clients, aux standards de qualité et aux exigences réglementaires.

Les travaux antérieurs ont mis en évidence certaines thématiques, comme les systèmes de management de la qualité totale, ou *total quality management systems* (TQMS), l’application de l’ISO 9001, l’application du BIM et de l’intelligence artificielle dans les projets de la construction. Ces études restent souvent focalisées sur des applications techniques précises sans offrir une lecture structurée de leur impact par rapport aux référentiels.

L’originalité de cette recherche réside dans son positionnement conceptuel : elle propose d’étudier l’impact du BIM et de l’IA, plus précisément l’OPT sur le domaine de la

connaissance de management de la qualité, composé de la planification de la qualité (QP), l’assurance qualité (QA) et le contrôle de la qualité (QC), par rapport aux référentiels comme le guide du corpus des connaissances en management de projet (PMBOK) 6^e édition. Elle s’appuie sur une analyse bibliométrique des articles publiés dans la base de données *Scopus*.

Le champ de la recherche se délimite aux bâtiments résidentiels, de service, de commerce et les bâtiments publics. Les bâtiments industriels ainsi que les infrastructures civiles sont exclus. La démarche méthodologique adoptée repose sur une analyse documentaire approfondie, combinée à deux études de cas exploratoires menées à partir des sources secondaires. Cette approche vise à confronter les apports théoriques aux réalités du terrain.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres. L’introduction générale précède le premier chapitre, qui présente une problématique formulée après une analyse bibliométrique effectuée avec le logiciel *VosViewer*. Le deuxième constitue la revue de littérature, couvrant le QM, le BIM, l’IA et leurs interrelations. Le troisième chapitre détaille la méthodologie de recherche. Le quatrième chapitre expose les résultats des études de cas et leur interprétation. Enfin, une conclusion générale clôt le mémoire.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE

L'objectif de ce chapitre est de formuler la problématique de recherche, à la suite d'une étude bibliométrique permettant d'identifier les apports et les lacunes de la littérature. En fin de chapitre, le périmètre, les objectifs ainsi que les questions de recherche seront présentés.

1.1 LES PROJETS DE CONSTRUCTION ET LA QUALITÉ

1.1.1 La construction dans le monde

De nos jours, la construction représente une partie importante de l'économie globale, apportant une contribution significative au produit intérieur brut (PIB) des pays et agissant comme un baromètre du développement économique (Organisation Internationale de Travail [OIT], 2020). Elle stimule la croissance non seulement par le biais de projets directs, tels que la construction de logements, de bâtiments commerciaux et d'infrastructures publiques, mais aussi en offrant un large éventail d'opportunités d'emploi, allant des travailleurs manuels aux experts en ingénierie et en architecture (OIT, 2020).

En Algérie, ce secteur représentait 41,3 milliards de dollars en 2022 avec des prévisions de croissance annuelle d'environ 4 % entre 2024 et 2027 ; l'expansion anticipée de la construction en Algérie est principalement due aux efforts du gouvernement pour augmenter la production d'énergie renouvelable et réduire les émissions de carbone d'au moins 7 % d'ici 2030 (Beladi, 2023). Cependant, il est également confronté à des défis liés à la qualité, notamment en raison de la variabilité des matériaux et des pratiques de construction moins standardisées. Les efforts pour améliorer la réglementation et les normes de construction sont en cours (Hendel et al., 2011), visant à aligner le pays avec les standards internationaux.

Au Québec, la construction représente 7,2 % de son PIB en 2024 (Guichet-emplois Canada, 2025) avec des investissements de près de 66 milliards de dollars canadiens qui génèrent environ 314 200 emplois directs par mois, selon les chiffres de la Commission de la construction de Québec (2025).

1.1.2 Enjeu de la qualité aux projets de la construction

Les projets de la construction font face à de nombreux défis en matière de qualité, avec des impacts significatifs sur la sécurité, la durabilité, les coûts et les délais. Depuis des années, les recherches se sont multipliées pour définir les dimensions de l'enjeu de la qualité et trouver des solutions. Xu et al. (2020) ont indiqué qu'il y a une faible sensibilisation à la gestion de la qualité, utilisation insuffisante des technologies de la construction, l'utilisation des matériaux non conformes et le recours à la main-d'œuvre non qualifiée. Wenfa et Xinhua (2014) trouvent que l'utilisation des matériaux à qualité inférieure et le budget affectent directement la qualité des projets. Gurmu et Mahmood (2024) ont conclu que le manque de communication, du travail d'équipe et les travailleurs qualifiés, la mauvaise supervision, les erreurs de conception, la complexité de la conception, et les contrats à bas prix, sont les facteurs derrière les problèmes de la qualité des projets. Sheikh et al. (2019) confirment cette pluralité de causes en évoquant la qualité des dessins, les pratiques de gestion, la participation des parties prenantes, les méthodes de sélection des entrepreneurs, ainsi que le niveau de compétence des intervenants.

À partir de cette littérature, les enjeux de qualité dans les projets de construction peuvent être regroupés autour de trois grandes catégories : la gestion de projet (GP) et la coordination, la qualité de la conception, et les erreurs d'exécution. La diversité des intervenants (architectes, ingénieurs, entrepreneurs et sous-traitants) rend la coordination difficile, ce qui peut affecter la performance globale. Une planification rigoureuse et une conception bien maîtrisée sont essentielles dès les premières étapes du projet, car les défauts à ce stade entraînent souvent des retards et des surcoûts. En intégrant l'expertise en construction dès les premières étapes de la planification, il est possible d'améliorer la

constructibilité des conceptions, atténuant ainsi les problèmes potentiels et rehaussant la qualité globale du projet (Miller, 1998). L'intégration d'expertises techniques et l'utilisation d'outils, comme le *Building Information Modeling*, favorisent une meilleure collaboration, permettent de travailler sur des modèles partagés mis à jour en temps réel, et réduisent les risques d'erreurs pendant la conception et la construction, ce qui améliore la qualité (Holkar et Pataskar, 2021). De nombreux pays ont d'ailleurs intégré le BIM dans les projets de construction ou leurs cadres réglementaires, notamment le Québec, où la « Feuille de route gouvernementale pour la modélisation des données des infrastructures 2021-2026 » de la Société québécoise des infrastructures [SQI] (2024), vise à structurer le déploiement du BIM dans les projets publics, à améliorer la productivité et la performance des infrastructures, à harmoniser les pratiques entre les acteurs du secteur, et à soutenir le développement des compétences en matière de transformation numérique.

Sur le chantier, la qualité dépend également de la compétence et de l'expérience des travailleurs. Certaines entreprises négligent le développement du niveau de leurs talents techniques et de leurs employés. Ils emploient souvent un grand nombre de travailleurs migrants comme ouvriers de première ligne tout en réduisant le nombre du personnel technique (Xu et al., 2020). Une main-d'œuvre qualifiée contribue à une exécution conforme aux normes et à une gestion efficace des imprévus (Miller, 1998). Enfin, la survenue d'erreurs de construction ou de modifications en cours de projet souligne l'importance d'une gestion structurée du changement. Celle-ci doit inclure l'évaluation des impacts, la consultation des parties prenantes et l'actualisation des documents du projet afin de limiter les effets négatifs sur les objectifs (Abdelsayed et al., 2022).

Ainsi, après avoir présenté le contexte économique et les principaux enjeux de qualité dans les projets de construction, il convient désormais d'examiner plus en profondeur la manière dont la littérature scientifique a abordé ces questions. Une analyse bibliométrique dans la prochaine section permet de situer cette recherche dans le champ des études existantes et d'identifier les lacunes à combler.

1.2 ÉTAT DE LA LITTÉRATURE

Pour mieux comprendre le sujet et pour savoir ce que la littérature a dit, VosViewer est choisi pour faire une analyse bibliométrique rapide à partir des articles de la base de données Scopus. L'objectif est d'identifier les apports et lacunes de la littérature par rapport au sujet de recherche.

VosViewer est un logiciel de visualisation bibliométrique utilisé pour analyser et représenter graphiquement les réseaux de données bibliographiques. Il permet de créer des cartes de réseaux de citations, de cocitations, de collaborations entre auteurs et de cooccurrences de mots-clés, facilitant ainsi la compréhension des dynamiques de recherche et des thématiques émergentes (Van Eck et Waltman, 2009).

La 1^{re} étape était d'effectuer une recherche sur le site de Scopus afin de trouver les articles en relation avec le sujet en utilisant les mots-clés suivants : *Construction*, *Quality*, *Project Management*. Le dernier mot-clé est utilisé comme : titre, abstract, mot-clé. Cette recherche a été réalisée le 31 mai 2024. La figure 1 présente la requête de recherche utilisée sur Scopus.

```
(KEY (construction) AND KEY (quality) AND TITLE-ABS-KEY (project AND management) )  
AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "BUSI") ) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") )
```

Figure 1. La requête de recherche utilisée, par l'auteur à partir de Scopus.

En ne fixant aucune limite temporelle et en restreignant la recherche aux articles relevant des domaines de la gestion, de la comptabilité et du management, un total de 486 résultats est obtenu. Le premier article remonte à 1984, tandis que le dernier a été publié en 2024. Depuis 2005, le nombre d'articles augmente considérablement, ce qui démontre l'effort des chercheurs pour répondre aux problématiques posées dans cette étude. Le nombre des articles est présenté au tableau 1.

Tableau 1 : Nombre des articles publiés par période

| Période | 1984-1989 | 1990-1999 | 2000-2004 | 2005-2009 | 2010-2014 | 2015-2019 | 2020-2024 | Total |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| Nombre des articles | 11 | 69 | 65 | 86 | 83 | 82 | 90 | 486 |

Source : par l'auteur à partir de Scopus, mai 2024.

1.2.1 Les articles publiés par pays et territoires

Le tableau 2 représente le nombre des articles académiques publiés par pays et territoires. La plupart des recherches sont faites aux États-Unis, le Royaume-Uni et l'Australie. Certains pays et territoires asiatiques en développement avancé, comme la Chine, le Hong Kong et la Singapour, ont fait un grand pas dans la recherche dans ce domaine.

Après avoir téléchargé la base de données en format CSV et l'avoir importée dans le logiciel, des visualisations et des tableaux de données ont été générés. Sur Scopus, les articles publiés en Chine et à Hong Kong sont souvent listés séparément pour des raisons historiques, administratives et bibliométriques, même si Hong Kong fait partie de la Chine. Une fois les deux regroupés, la Chine occuperait la deuxième place avec un total de 92 articles.

Tableau 2 : Nombre d'articles publiés par pays et territoires

| N | Pays | Nombre d'articles | N | Pays | Nombre d'articles |
|----|-------------|-------------------|----|-----------------|-------------------|
| 1 | États-Unis | 113 | 11 | Malaisie | 12 |
| 2 | Royaume-Uni | 73 | 12 | Arabie Saoudite | 11 |
| 3 | Australie | 61 | 13 | Turquie | 8 |
| 4 | Chine | 47 | 14 | Iran | 7 |
| 5 | Hong Kong | 45 | 14 | Roumanie | 7 |
| 6 | Singapour | 26 | 14 | Corée du Sud | 7 |
| 7 | Canada | 22 | 15 | Israël | 6 |
| 8 | Taiwan | 17 | 15 | Jordanie | 6 |
| 9 | Suède | 14 | 15 | Espagne | 6 |
| 10 | Inde | 13 | | | |

Source : par l'auteur à partir de Scopus, mai 2024.

1.2.2 Top journaux

À partir de l'analyse effectuée, différentes informations sont observées, sur un total de 17 941 citations, 90,27 % viennent des 10 tops journaux présentés au tableau 3. Toutes ces citations concernent un total de 486 articles.

Tableau 3 : Top journaux par nombre de citations

| Journal source | Citations |
|--|-----------|
| <i>Journal of construction engineering and management</i> | 6454 |
| <i>International journal of project management</i> | 3481 |
| <i>Construction management and economics</i> | 2590 |
| <i>Journal of management in engineering</i> | 1741 |
| <i>Engineering, construction, and architectural management</i> | 523 |
| <i>Journal of cleaner production</i> | 445 |
| <i>International journal of quality and reliability management</i> | 321 |
| <i>Journal of civil engineering and management</i> | 304 |
| <i>International journal of construction management</i> | 172 |
| <i>Tqm journal</i> | 165 |

Source : par l'auteur à partir de Scopus, mai 2024.

1.2.3 Les auteurs les plus cités

Les tops auteurs qui ont contribué le plus à la recherche sont présentés au tableau 4, l'auteur le plus cité (996 citations) est le chercheur Albert P.C. Chan.

Tableau 4 : Les auteurs les plus cités

| N | Auteur | Nombre des citations | Nombre des articles |
|----|-----------------------|----------------------|---------------------|
| 1 | Chan, Albert P.C. | 996 | 5 |
| 2 | Love, Peter E.D. | 820 | 13 |
| 3 | Arditi, David | 640 | 8 |
| 4 | Shen, Geoffrey Qiping | 630 | 4 |
| 5 | Iyer, K.C. | 583 | 4 |
| 6 | Burati, James l. | 463 | 4 |
| 7 | Li, H | 346 | 6 |
| 8 | Irani, Zahir | 346 | 5 |
| 9 | Pheng, Low Sui | 295 | 8 |
| 10 | Smith, Jim | 278 | 6 |

*Les résultats de ce tableau ont été vérifiés et corrigés manuellement.

Source : par l'auteur à partir de Scopus, mai 2024.

1.2.4 Les articles les plus cités

Les dix articles les plus cités, ayant chacun obtenu au moins 230 citations, sont présentés au tableau 5, l'article le plus cité est celui de Chan et al. (2004) avec 552 citations, publié dans le *Journal of Construction Engineering and Management*. Ces articles totalisent 4201 citations, soit environ 23,42 % de l'ensemble des citations recensées.

Tableau 5 : Les articles les plus cités

| N | Titre de l'article | Auteur | Citations | Année |
|----|--|--|-----------|-------|
| 1 | <i>Factors Affecting the Success of a Construction Project</i> | Albert P.C. Chan David Scott Ada P.L. Chan | 552 | 2004 |
| 2 | <i>Critical Success Factors for Public–Private Partnerships in Infrastructure Development</i> | Xueqing Zhang | 523 | 2005 |
| 3 | <i>Quantifying the causes and costs of rework in construction</i> | Peter E.D. Love Heng Li | 341 | 2000 |
| 4 | <i>Causes of Quality Deviations in Design and Construction</i> | James L. Burati Jodi J. Farrington William L. Ledbetter | 330 | 1992 |
| 5 | <i>The effect of relationship management on project performance in construction</i> | Xianhai Meng | 323 | 2012 |
| 6 | <i>Material Waste in Building Industry: Main Causes and Prevention</i> | Carlos T. Formoso Lucio Soibelman Claudia de Cesare Eduardo L. Isatto | 312 | 2002 |
| 7 | <i>Factors Affecting Schedule Delay, Cost Overrun, and Quality Level in Public Construction Projects</i> | Jesper K. Larsen Geoffrey Q. Shen Soren M. Lindhard Thomas D. Brunoe | 253 | 2016 |
| 8 | <i>Risk Management in the Construction Industry Using Combined Fuzzy FMEA and Fuzzy AHP</i> | Abdelgawad M. Aminah R. Fayek | 249 | 2010 |
| 9 | <i>Total quality management in the construction process</i> | David Arditi H. Murat Gunaydin | 236 | 1997 |
| 10 | <i>Taxonomy for change causes and effects in construction projects</i> | Ming Sun Xianhai Meng | 230 | 2009 |

Source : par l'auteur à partir de Scopus, mai 2024.

1.2.5 L'analyse des mots-clés

L'analyse de cooccurrence réalisée sur le corpus scientifique met en évidence une structuration claire des thématiques de recherche autour du management de la qualité dans le secteur de la construction. Elle est pertinente dans le cadre de cette étude puisqu'elle permet d'identifier les principaux champs conceptuels mobilisés dans la littérature, de comprendre leurs relations, et de situer les recherches portant sur le BIM et l'intelligence artificielle dans un réseau de notions liées à la qualité. La figure 2 présente le seuil et le résultat de cette analyse.

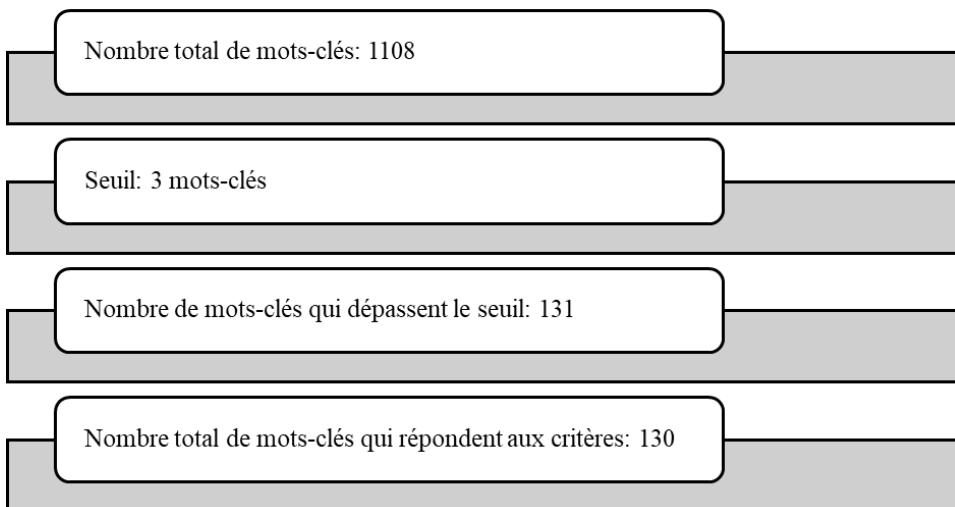


Figure 2. Seuil et résultats de l'analyse des mots-clés, par l'auteur à partir de VosViewer.

Les 130 mots-clés ont été regroupés en 11 catégories, ce qui nous donne un aperçu des principales pistes de recherche explorées. Les catégories sont présentées dans le tableau 6, une version plus détaillée est disponible dans le Tableau A1. 1 (annexe 1).

Les catégories identifiées révèlent plusieurs axes complémentaires. Les premières catégories (1 et 3) illustrent une orientation traditionnelle du domaine, centrée sur la conformité aux normes (ISO 9000, ISO 9001, TQM) et sur les systèmes de management de la qualité. Cette orientation traduit la volonté historique de formaliser et de standardiser les processus de construction pour limiter les défauts et améliorer la performance

organisationnelle. Les catégories 2, 5, 6 et 11 élargissent cette perspective en associant la qualité aux dimensions classiques de la gestion de projet : coûts, délais, risques et performance. On y observe la récurrence de termes comme *project performance*, *cost management*, *productivity* et *rework*, indiquant que la qualité est abordée à travers sa contribution à l'efficacité globale des projets.

Les catégories plus récentes (4, 7, 8 et 9) traduisent une évolution marquée vers la digitalisation et l'innovation. On y trouve des notions liées au *Building Information Modeling*, à la *collaboration*, à la *gestion des connaissances* ou encore aux *systèmes d'aide à la décision*. Ces regroupements témoignent d'une transformation des pratiques, où la qualité n'est plus seulement contrôlée ou garantie, mais optimisée à travers la modélisation, la simulation et la valorisation des données.

La figure 3 et la figure 4 renforcent cette lecture. La première met en évidence la densité des thématiques, où la taille des nœuds traduit la fréquence des mots-clés et leur importance dans le corpus. La seconde montre le réseau de relations entre concepts, révélant que *construction industry*, *quality management* et *construction management* occupent des positions centrales, fortement connectées à des notions émergentes comme *BIM*, *innovation* et *performance*.

Tableau 6 : Les catégories des mots-clés

| | |
|---|--|
| Catégorie 1 Gestion de la qualité des projets | <i>Quality management, Construction projects, communication, factor analysis, supply chain management, survey, construction materials and methods, construction quality, defects, relationship quality, quality performance, total quality management, Bayesian network, benchmarks, commitment, construction defects, construction sites, earned value management, engineering, subcontractors.</i> |
| Catégorie 2 Performance des projets | <i>Quality, management, safety, time, construction project management, cost, housing, information management, benchmarking, customer satisfaction, models, planning, service quality, decision support systems, key performance indicators, Pakistan, risk.</i> |
| Catégorie 3 Systèmes et normes de qualité | <i>Total quality management, project performance, quality management systems, iso 9000, assessment, Indonesia, iso 9001, Nigeria, quality improvement, construction companies, critical success factors, Jordan, Libya.</i> |
| Catégorie 4 Amélioration continue | <i>Construction industries, contractors, continuous improvement, bids, fuzzy sets, infrastructure, decision making, building defects, classification, data analysis, evaluation, financial management, lean construction, research.</i> |
| Catégorie 5 Planification intégrée | <i>Construction management, scheduling, costs, optimization, resource management, cost and schedule, design/build, consultants, consulting services, delivery, project delivery.</i> |
| Catégorie 6 Gestion des risques | <i>Risk management, case study, construction project, China, cost overrun, supply chain, culture, design management, lean, performance management, system dynamics.</i> |
| Catégorie 7 Numérique et collaboration | <i>Design, buildings, cost of quality, knowledge management, Singapore, building information modeling, collaboration, developing countries, measurements, project quality.</i> |
| Catégorie 8 Contrôle qualité | <i>Quality control, contracts, innovation, cost control, asphalt pavements, client relationships, organizations, partnership.</i> |
| Catégorie 9 Assurance qualité | <i>Quality assurance, procurement, contractor selection, quality function deployment, construction quality management, fuzzy set, prequalification, tendering.</i> |
| Catégorie 10 Productivité et optimisation | <i>Productivity, simulation, constructability, highway construction, construction equipment, cost management, highway design, pavement.</i> |
| Catégorie 11 Défauts et coûts de qualité | <i>Construction, rework, Hong Kong, performance, Australia, causes, contracting, quality costs.</i> |

Source : par l'auteur à partir de Scopus, mai 2024.



Figure 3. Visualisation de la densité des catégories. Par l'auteur, mai 2024.

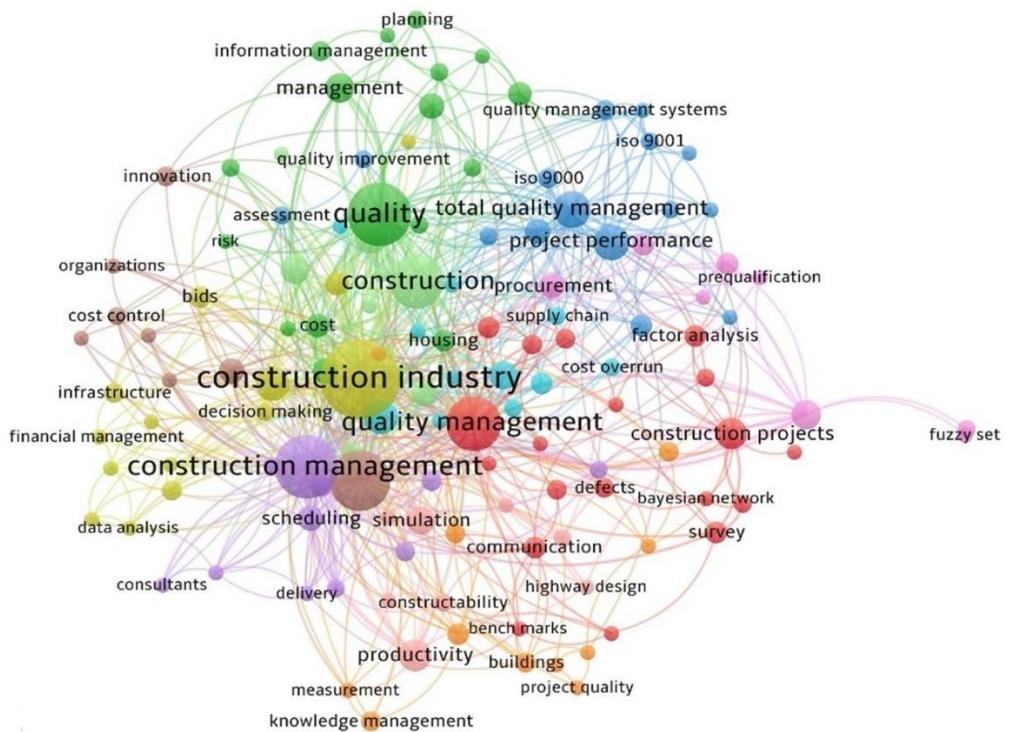


Figure 4. Visualisation du réseau (*Network visualisation*). Par l'auteur, mai 2024.

1.2.6 Les apports et les lacunes de la littérature

L'analyse bibliométrique précédente a permis de dresser un portrait global de l'état des connaissances sur la qualité dans les projets de construction, tout en identifiant les thématiques dominantes et les zones encore peu explorées. À partir de ces constats, il devient nécessaire de préciser les apports et les limites de la littérature afin de situer plus clairement la présente recherche et d'en formuler la problématique.

Depuis 1984, l'intérêt pour la qualité dans le domaine de la construction n'a cessé de croître. Ce constat se reflète dans l'augmentation continue du nombre de publications scientifiques sur le sujet, notamment à partir de 2005. Certaines thématiques, comme le dépassement des coûts (231 occurrences), le succès des projets, le développement durable ou encore les normes de qualité, reviennent fréquemment. Depuis 2015, les recherches se sont davantage orientées vers des sujets liés au cycle de vie des projets, à la sécurité, aux systèmes de management de la qualité et à la norme ISO 9001.

L'analyse bibliométrique d'un corpus de 486 articles issus de la gestion de projet et de la construction révèle plusieurs contributions significatives. Les contributions les plus influentes sont concentrées dans un nombre restreint de revues spécialisées, notamment le *Journal of Construction Engineering and Management* et l'*International Journal of Project Management*, ce qui souligne une certaine maturité et une structuration du champ. L'examen des mots-clés utilisés dans les articles met en évidence plusieurs axes d'intérêt : *Quality Management*, *Total Quality Management (TQM)*, *ISO 9000* et *Risk Management*.

Toutefois, des lacunes sont perceptibles. Certains mots-clés fondamentaux, comme *Construction Quality Management* ou *Construction Defects*, n'apparaissent qu'à partir de 2020, et leur fréquence reste faible (respectivement 9 et 14 occurrences). Il en va de même pour des termes tels que *Management Practices* (34 occurrences) et *Project Control* (12 occurrences). De plus, l'intelligence artificielle, pourtant en plein essor, demeure marginale dans ce corpus, avec seulement 27 occurrences depuis 2011. Taboada et al. (2023) ont constaté qu'il y a effectivement une augmentation du nombre d'articles influents sur le

management de projet multidisciplinaire assisté par l'IA au cours de la dernière décennie. Le BIM apparaît dans 109 occurrences, mais souvent dans des contextes variés et pas nécessairement liés au management de la qualité.

Très peu de recherches s'intéressent à l'interaction entre le BIM, l'IA et le management de la qualité. Les synergies entre ces dimensions sont encore peu explorées, alors qu'elles pourraient représenter un levier important pour améliorer la performance globale des projets, automatiser certains processus et réduire les défauts grâce à l'analyse prédictive. Ces constats rejoignent les résultats de l'analyse de cooccurrence, qui montrent une structuration claire du champ autour de trois ensembles : les approches normatives, les approches axées sur la performance des projets et celles orientées vers la digitalisation et l'innovation.

1.3 PROBLÉMATIQUE SPÉCIFIQUE

Le domaine de la construction, reconnu pour sa complexité et ses défis inhérents, subit une pression croissante pour améliorer l'efficacité et la qualité des projets. Face à des contraintes, telles que les dépassements de coûts, les retards, le manque de main-d'œuvre qualifiée et les exigences réglementaires (Hendel et al., 2011; Sheikh et al., 2019; Xu et al., 2020), les entreprises cherchent de nouvelles approches pour optimiser la GP et assurer une qualité constante.

Dans ce contexte, les technologies d'information jouent un rôle de plus en plus central (Xu et al., 2020). Des outils, tels que les systèmes de gestion documentaires, les drones et la photogrammétrie, ou encore les environnements virtuels (Duarte-Vidal et al., 2021), ont été progressivement adoptés pour pallier certaines inefficacités. Parmi ces technologies, le BIM s'est imposé depuis une vingtaine d'années pour surmonter ces obstacles. Cependant, l'IA commence à faire partie de la vie quotidienne dans plusieurs domaines, son intégration peut ouvrir de nouvelles portes. Cette recherche se propose de combler un manque dans la littérature en étudiant l'impact de l'IA et du BIM sur le management de projet, en mettant particulièrement l'accent sur la gestion de la qualité dans les projets de construction.

Cela étant dit, la question de recherche à laquelle cette étude souhaite répondre est la suivante : **quel est l'impact de l'utilisation du BIM (Y) sur le management de la qualité (X) ? Et l'impact de l'IA (Z) sur le management de la qualité (X) des projets de construction ?**

Les relations entre les trois facteurs sont présentées dans le cadre conceptuel préliminaire, illustré à la figure 5, il y a une première relation entre le BIM (Y) et le management de la qualité (X), puis il y a une deuxième relation, celle de l'IA (Z) et le management de la qualité (X).

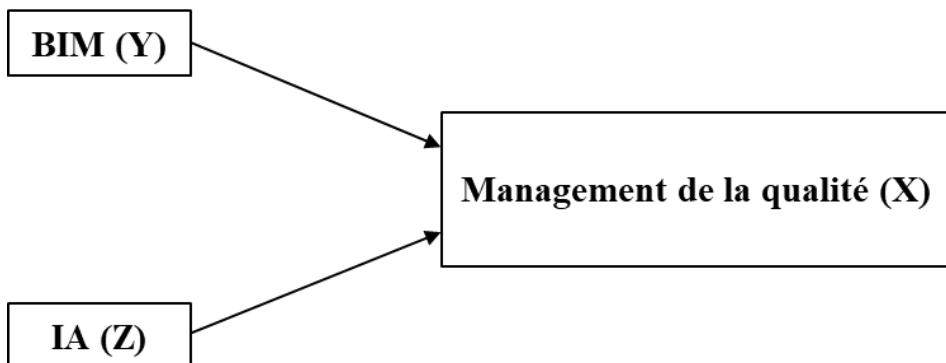


Figure 5. Le cadre conceptuel préliminaire, par l'auteur.

À cette étape de la recherche, l'intelligence artificielle est considérée dans son acception générale. Les sous-domaines pertinents, tels que l'optimisation, seront identifiés plus en détail dans la section consacrée au chapitre 2.

1.4 LOCALISATION DE LA RECHERCHE DANS LA LITTÉRATURE

Pour analyser cette problématique, il convient d'examiner l'interaction entre le management de la qualité et les deux leviers technologiques que sont le BIM et l'IA. Chacun de ces domaines a fait l'objet de nombreux travaux au cours des dernières décennies comme Abioye et al. (2021); Ardit et Alothaimeen (2019); Aune (1998); Eber (2020); Holkar et Pataskar (2021); Nguyen et al. (2018); Rehman et al. (2021); Sinenko et al. (2020); Wang (2025); Yang et al. (2021); Zollinger et al. (2010), qui seront consultés dans les prochaines

sections. Le diagramme présenté à la figure 6 illustre cette approche, en mettant en évidence, à travers les zones colorées, l'emplacement spécifique de la présente recherche.

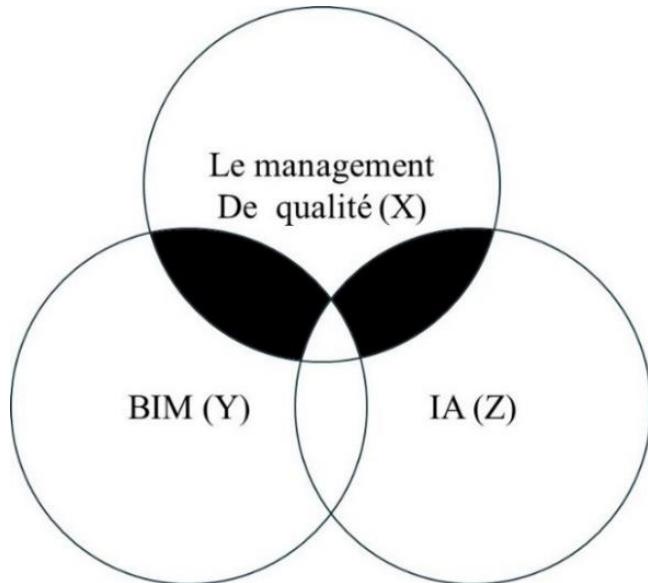


Figure 6. Diagramme de Venn. Par l'auteur.

Sur la base de ce positionnement, les objectifs et les questions de recherche ont été formulés afin de structurer l'étude et d'orienter les analyses à venir.

1.5 OBJECTIFS ET QUESTIONS DE LA RECHERCHE

Le tableau 7 présente les objectifs et les questions de cette recherche. Certains objectifs visent à définir les dimensions de l'étude, tandis que d'autres ont pour but d'analyser et de comprendre les relations entre ces dimensions.

Tableau 7 : Objectifs et questions de la recherche

| Objectifs | | Questions de recherche | |
|-------------------------------|--|-------------------------------|---|
| Définir et comprendre | | | |
| Oa | Identification du principe de la qualité, ainsi que le management de la qualité (X) | QRa | Quelle est la définition de la qualité et du management de la qualité ? Et quel est son processus ? |
| Ob | Comprendre le <i>Building Information Modeling</i> (BIM) et ses utilisations au management du projet (Y) | QRb | Qu'est-ce que le BIM ? Quels sont ses aspects clés ? Et quelles sont ses utilisations au management du projet ? |
| Oc | Comprendre l'intelligence artificielle (IA), (Z) | QRc | Qu'est-ce que l'IA ? Quels sont ses aspects clés ? Et quelles sont ses utilisations au management du projet ? |
| Analyser et comprendre | | | |
| O1 | Analyser et comprendre la relation entre l'utilisation du BIM et le management de la qualité (Y > X) | QR1 | Quel est l'impact de l'utilisation du BIM sur le management de la qualité ? |
| O2 | Analyser et comprendre la relation entre l'utilisation d'IA et le management de la qualité du projet (Z > X) | QR2 | Quel est l'impact de l'utilisation de l'IA sur le management de qualité ? |

Source : par l'auteur.

1.6 PÉRIMÈTRE DE LA RECHERCHE

Cette recherche s'appuie sur la base de données *Scopus*, en prenant en compte les articles publiés entre 1984 et le 31 mai 2024, date à laquelle l'analyse bibliométrique a été réalisée. Elle se concentre sur l'analyse de l'impact du BIM et de l'intelligence artificielle dans le management de projet, en particulier dans le management de la qualité pendant le cycle de vie des projets de construction. L'étude porte spécifiquement sur les bâtiments résidentiels, de service, de commerce et les bâtiments publics. Les bâtiments industriels ainsi que les infrastructures civiles sont exclus du champ de la recherche.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

Dans la continuation de cette étude, l'objectif de cette revue de littérature est de présenter les termes et les concepts identifiés dans le cadre conceptuel préliminaire, ainsi que les relations entre eux. Comprendre ces éléments est crucial pour formuler des hypothèses ou des propositions. Ces dernières répondent aux interrogations soulevées par la recherche et contribuent à la création d'un cadre conceptuel final.

2.1 LE MANAGEMENT DE LA QUALITÉ

2.1.1 Définition de la qualité

La notion de qualité donne lieu à plusieurs perceptions selon les auteurs. Selon Pesqueux (2020), le terme « qualité » provient du latin *qualitas*. Il représente une valeur universelle dont les origines remontent loin dans l'histoire (Mispelblom, 1998, cité dans Hendel et al., 2011) et qui a évolué pour englober non seulement les produits et les services, mais aussi la qualité de vie, le travail, la gouvernance, et d'autres aspects (Ibidapo, 2022). La qualité est définie à partir du XVII^e siècle comme la manière d'être considéré bon, et repose sur une reconnaissance commune, une évaluation partagée et un jugement de valeur (Pillard, 2003, cité dans Pesqueux, 2020). Pour Charantimath (2011), la notion de la qualité est subjective et varie selon la perception de chacun, en prenant en compte un mélange de dimensions techniques, esthétiques et environnementales (Hendel et al., 2011). Cependant, Labbe, 2001, cité dans Hendel et al. (2011), a expliqué que la notion de la qualité est relative, elle sera définie selon les critères de chaque usager.

« La qualité est une perception relative. Perception, car chaque entité, selon ses propres critères, y compris parfois subjectifs, reste seul juge de la réponse appropriée à ses besoins. Relative parce que la perception varie d'une entité à l'autre ou d'une époque à une autre, en fonction des possibilités technologiques à disposition. » (Labbe, 2001, cité dans Hendel et al., 2011, p. 55)

Le dictionnaire Le Petit Robert 2011 définit la qualité comme : « Manière d'être, plus ou moins caractéristique ; aspect sensible et non mesurable des choses. ». (Robert et al., 2010, p. 2079). La qualité est définie par la norme internationale ISO 9000:2015 comme l'« aptitude d'un ensemble de caractéristiques intrinsèques d'un objet à satisfaire des exigences » (Organisation Internationale de Normalisation [ISO], 2015).

2.1.2 La qualité dans la construction

Selon Guay (2010), dans le secteur de la construction, il existe des divergences quant à la définition du concept de la qualité. Certains l'associent exclusivement aux matériaux utilisés ou à la précision de l'exécution, tandis que d'autres la perçoivent comme une caractéristique esthétique, évoquant la beauté. La notion de qualité revêt souvent des nuances différentes en fonction du rôle et des responsabilités de chaque intervenant, soulignant ainsi le manque de consensus sur le sujet. Pour un utilisateur, un commanditaire, un architecte ou un entrepreneur, les interprétations de la qualité varient, chacun adaptant la définition à ses propres enjeux et préoccupations (Hendel et al., 2011).

La qualité peut se définir par l'obtention de niveaux de performance jugés acceptables pour les activités de construction (Omar et al., 2023; Peshkov et al., 2019), qui satisfont ou surpassent les attentes du client (Peshkov et al., 2019). Cela inclut des critères tels que la fonctionnalité, les spécifications techniques, la rentabilité, l'efficacité fonctionnelle et les qualités esthétiques des éléments architecturaux (Simion-Melinte, 2013).

D'autres auteurs étendent la notion de qualité au management des projets : pour Mirshokraei et al. (2019), elle englobe l'approche de gestion adoptée pour la réalisation d'un bâtiment ou d'une installation et ne se limite pas aux produits ou aux équipements. Le respect du coût et du temps de livraison constitue également un critère essentiel (Chung, 1999). Basu (2013) ajoute que la qualité finale dépend non seulement des résultats obtenus, mais aussi de la manière dont ces résultats sont atteints, incluant la qualité des processus de gestion de projet et de l'organisation elle-même.

Ainsi, bien que certaines approches réduisent la qualité à des aspects matériels ou esthétiques, la littérature converge vers une conception plus intégrée et stratégique, qui considère à la fois le produit, les processus et l'organisation comme essentiels pour atteindre une véritable qualité dans les projets de construction.

2.1.3 Le processus de management de la qualité

Le management de la qualité est crucial pour garantir le succès des projets de la construction, il est parmi les domaines de connaissances du PMBOK 6^e du *Project Management Institute* (PMI). Il consiste en un ensemble de processus structurés visant à s'assurer que chaque aspect du projet respecte les exigences des clients, les normes de qualité ainsi que les réglementations en vigueur (Flynn et al., 1994; Project Management Institute [PMI], 2017). Il comprend les fonctions de gestion essentielles qui établissent et appliquent la politique, les objectifs et les responsabilités en matière de qualité. En raison de la complexité et de la diversité des acteurs intervenant dans ce domaine, une gestion rigoureuse de la qualité est indispensable pour réduire les risques d'erreurs, de retards ou de non-conformités.

Selon la 6^e édition du PMBOK (PMI, 2017), complété par le *Construction extension to the PMBOK guide*¹ (Project Management Institute [PMI], 2016), le domaine de connaissance de management de la qualité d'un projet inclut trois groupes de processus : planifier la gestion de la qualité, gérer la gestion de la qualité (appelé aussi l'assurance de la qualité) et maîtriser la gestion de la qualité (appelé aussi le contrôle de la qualité), comme présentée à la figure 7. Avec sa 7^e édition, le PMBOK adopte une approche fondée sur des principes et des domaines de performance, remplaçant la structure antérieure centrée sur les processus.

¹ Le *Construction Extension to the PMBOK Guide* est un document publié par le PMI pour adapter le PMBOK aux spécificités des projets de la construction. Il complète la 6^e édition du guide, et ne le remplace pas. Il n'a pas été reconduit avec la 7^e édition, qui adopte une nouvelle approche centrée sur les principes et des domaines de performance.

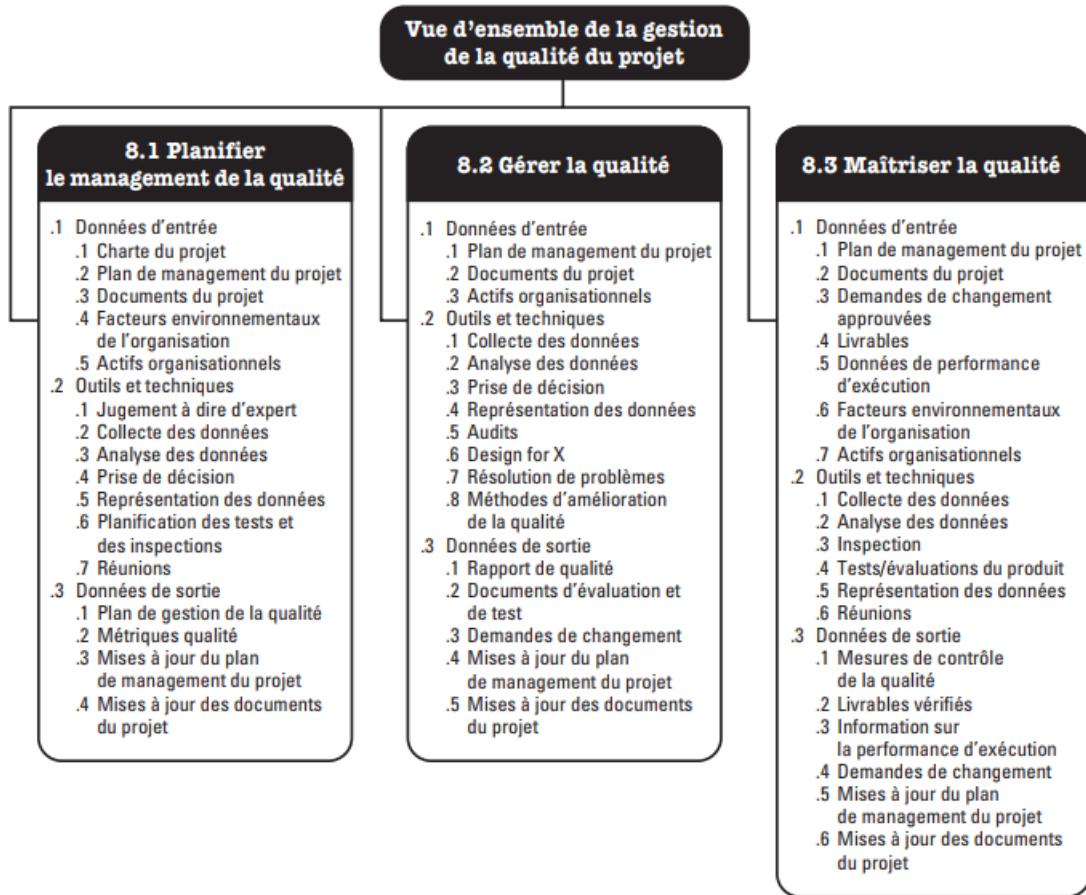


Figure 7. Les processus de management de la qualité selon PMBOK 6^e (PMI, 2017).

Dans notre étude, les termes planification de la qualité (QP), assurance de la qualité (QA) et contrôle de la qualité (QC) seront utilisées pour être en cohérence avec les autres référentiels et recherche du domaine de la construction comme présentée à la figure 8.

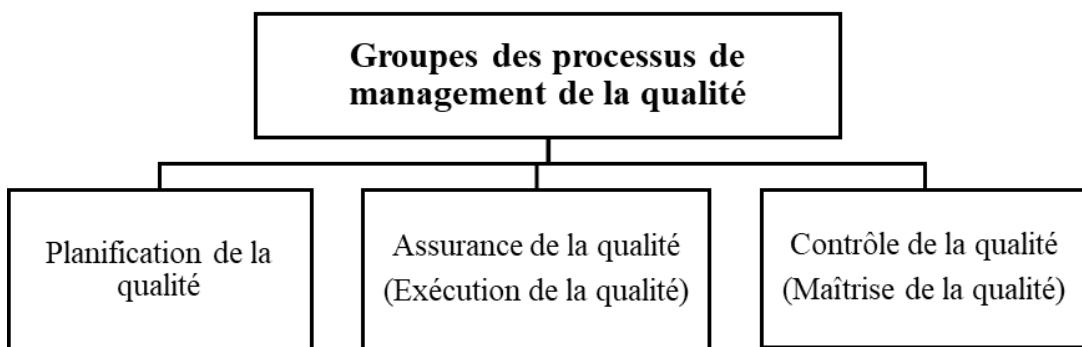


Figure 8. Les groupes des processus de management de la qualité, par l'auteur.

2.1.3.1 Processus de la planification de la qualité (QP)

Dans ce groupe de processus de planification de la qualité ou *Quality Planning* (QP), les documents spécifiques à la construction, telle que la charte de projet, le plan de management du projet, les contrats, les plans et les spécifications, sont examinés afin de déterminer les exigences en matière de qualité ainsi que les normes applicables au projet et à ses livrables, puis à définir, de façon documentée, les moyens par lesquels le projet assurera leur respect et leur conformité (PMI, 2016, 2017). Le tableau 8 présente une synthèse des livrables de QP.

Tableau 8 : Processus de la planification de la qualité.

| Processus de planification de la qualité | |
|---|--|
| Nature du processus | Planification |
| Mode d'exécution | Au début du projet |
| Livrables et objectifs | <ul style="list-style-type: none">• Définir les exigences contractuelles : Définir les normes et obligations légales à respecter dans un projet, incluant la performance attendue et la qualité d'exécution des travaux.• Définir les exigences des parties prenantes du projet : Négocier et valider les exigences de qualité et les compromis choisis avec les parties prenantes du projet, y compris la communauté locale et les organismes gouvernementaux.• Définir la politique de la qualité : Elle reflète l'engagement de la direction envers la qualité et l'amélioration continue. Elle englobe à la fois l'assurance qualité et le contrôle qualité.• Définir les métriques de l'assurance qualité : Définir les caractéristiques à évaluer dans un projet et préciser la manière de la vérification de conformité.• Déterminer la liste de vérification de la qualité des processus.• Déterminer la revue des exigences de la qualité du projet.• Préparer le plan de management de la qualité (QMP). |

Source : Par l'auteur à partir de PMI (2016).

2.1.3.2 Processus de l'assurance de la qualité (QA)

L'assurance qualité, ou *Quality Assurance* (QA), ou comme appelé au PMBOK 6^e, exécution de la qualité, est une approche de gestion visant à garantir qu'un projet répond aux exigences de la qualité, en apportant un niveau de confiance suffisant quant à sa fiabilité (Achkar, 2017). Plutôt que de se concentrer uniquement sur la détection des défauts dans le produit final, l'assurance qualité veille à ce que les étapes de livrable soient bien définies, suivies et améliorées en continu. Ce processus est **préventif**. Il repose sur des audits réguliers, la documentation des processus, la vérification des méthodes utilisées, l'engagement des parties prenantes ainsi que la formation continue, pour assurer la conformité aux exigences et optimiser les performances (PMI, 2017). Dans le cas des projets de la construction, la QA est essentielle pour garantir que les projets respectent les normes de construction, les spécifications techniques et les exigences réglementaires. Le tableau 9 présente une synthèse des livrables du processus de QA.

Tableau 9 : Processus de l'assurance qualité.

| Processus de l'assurance qualité | |
|---|--|
| Nature du processus | Prévention |
| Mode d'exécution | Exécuté tout au long du projet |
| Déroulement et objectifs | <ul style="list-style-type: none">• Appliquer des activités d'audit de qualité prévues dans QMP pour s'assurer que tous les processus nécessaires sont mis en œuvre.• Évaluer l'efficacité des processus et de leur intégration dans le système de gestion du projet à travers des métriques de qualité.• Analyser régulièrement les résultats obtenus pour garantir que le projet respecte les normes de qualité attendues.• Analyser les problèmes rencontrés et communiquer les nouvelles exigences de qualité afin de prévenir les lacunes dans les futurs projets. |

Source : Par l'auteur à partir de PMI (2016, 2017); Westland (2024).

2.1.3.3 Processus du contrôle de la qualité (QC)

Le processus de contrôle de la qualité, ou *Quality control* (QC), fait référence aux activités qui vérifieront les résultats des processus pour évaluer si les objectifs ont été atteints (Achkar, 2017), une approche réactive qui a pour objectif d'identifier et de corriger les défauts présents dans les produits terminés. Ce processus est exécuté tout au long de la durée du projet (PMI, 2017). Dans ce processus, des rapports de conformité sont préparés afin de valider la qualité ou d'exiger des changements. Ces changements peuvent avoir un impact important sur le coût et le calendrier du projet (PMI, 2016). L'objectif principal de ce processus est de garantir que les travaux et les livrables du projet satisfont aux exigences définies par les principales parties prenantes en vue de leur acceptation finale (PMI, 2017). Le respect de la qualité de la construction assure la fidélité des clients et le contrôle des coûts, tandis qu'une mauvaise qualité peut nuire à la réputation et entraîner des coûts supplémentaires de retravail (Demski, 2024). Le tableau 10 présente une synthèse des livrables du processus de QA.

Tableau 10 : Processus de contrôle de la qualité.

| Processus de contrôle de la qualité | |
|--|--|
| Nature du processus | Correction |
| Mode d'exécution | Exécuté tout au long du projet |
| Déroulement et objectifs | <ul style="list-style-type: none">• Mesurer en continu les résultats du projet pour évaluer leur conformité et détecter les écarts.• Identifier et corriger les causes des non-conformités, y compris celles liées à une planification ou une assurance qualité défaillante.• Constituer un dossier qualité, synthétisant les résultats du suivi, essentiel pour la validation finale du projet. |

Source : Par l'auteur à partir de PMI (2016, 2017); Demski (2024).

2.1.4 Les principes de management de la qualité

La norme ISO 9000:2015 indique que le management de la qualité est basé sur sept principes : l'orientation client, le leadership, l'implication du personnel, l'approche processus, l'amélioration, la prise de décision et le management des relations (ISO, 2015). Ces principes sont présentés à la figure 9.

L'orientation client consiste à comprendre et satisfaire les besoins actuels et futurs des clients. Le leadership vise à établir une vision claire, à fixer des objectifs cohérents et à créer les conditions nécessaires à l'engagement de l'ensemble du personnel. L'implication du personnel reconnaît que les employés à tous les niveaux sont la clé du succès, et que leur engagement actif permet d'améliorer la performance. L'approche processus encourage la gestion des activités comme un ensemble de processus interconnectés, permettant ainsi une meilleure cohérence et efficacité dans l'atteinte des résultats souhaités. L'amélioration est un principe permanent qui cherche à renforcer continuellement les performances globales de l'organisation. La prise de décision fondée sur des preuves implique que les décisions soient basées sur l'analyse de données fiables, ce qui réduit les incertitudes et favorise des résultats cohérents. Enfin, le management des relations met l'accent sur l'établissement de relations durables et mutuellement bénéfiques avec les parties intéressées, telles que les clients, les fournisseurs et les partenaires, afin de renforcer la performance et la résilience de l'organisation.

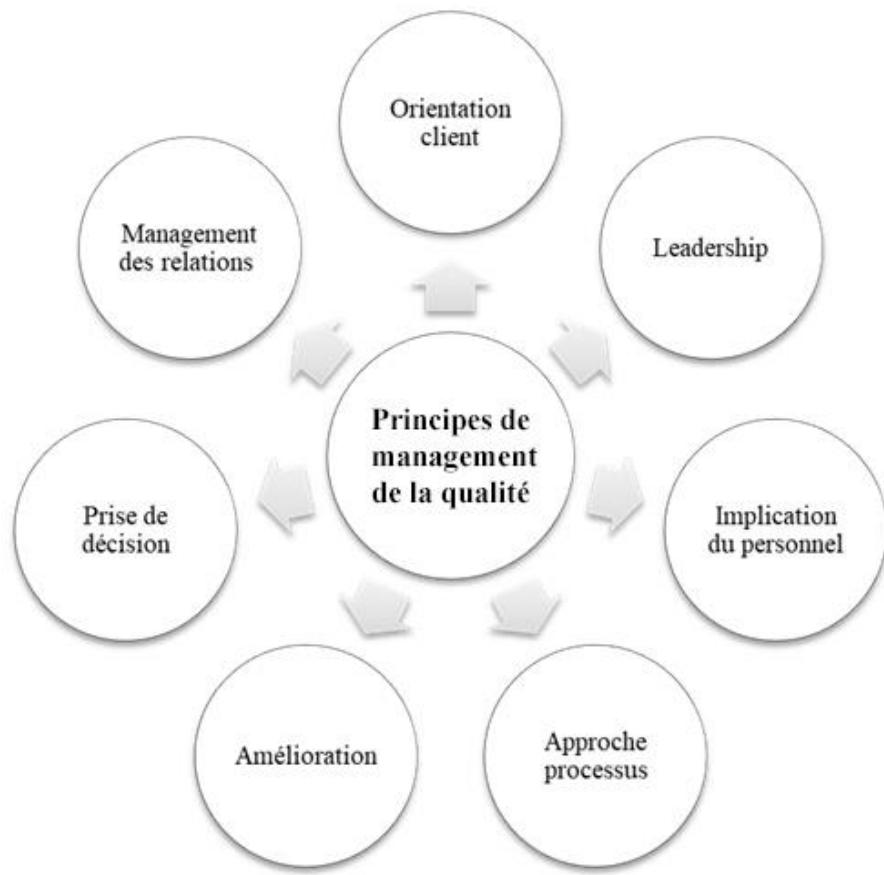


Figure 9. Principes de management de la qualité selon ISO 9000-2015, par l'auteur.

2.2 BUILDING INFORMATION MODELING

Le BIM a profondément changé la façon dont les projets de construction sont conçus, planifiés et gérés. De plus en plus présent dans les pratiques professionnelles, il ne se limite pas à la modélisation 3D, mais intègre une gestion intelligente des données tout au long du cycle de vie du projet. Cette section s'intéresse à ce qu'est réellement le BIM et explore, à partir de la littérature, ses utilisations dans le projet.

2.2.1 Définition du BIM

Le BIM, acronyme anglo-saxon de *Building Information Modeling*, fait l'objet de définitions variées dans la littérature scientifique, sans aucun accord sur une définition universelle. Les définitions peuvent varier dépendamment de l'utilisateur ; les organismes, les normes et même les chercheurs ont chacun leur propre manière de le définir (Borkowski, 2023). L'ISO 19650-1: 2018 le définit comme suit : « L'utilisation d'une représentation numérique partagée d'un actif bâti pour faciliter les processus de conception, de construction et d'exploitation et former une base fiable permettant les prises de décision. ».

Cependant, certaines entreprises commettent l'erreur de considérer le BIM comme une simple évolution des logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) (Reddy, 2012). Cette vision réductrice contraste avec celle de Boton et Kubicki (2014) et Guéneau (2019), pour qui le BIM est avant tout une approche et un processus de travail collaboratif centré autour d'un modèle numérique paramétrique en 3D, et non un simple logiciel ou un outil. De même, Ding et al. (2014) soulignent que le BIM ne se limite pas à une représentation 3D. En réalité, le BIM représente un changement de paradigme, il est plus qu'une technologie : il s'agit d'une approche d'amélioration des processus qui exploite les données pour analyser et anticiper les résultats à chaque étape du cycle de vie d'un bâtiment (Reddy, 2012).

Le BIM trouve ses origines aux années 1970 par le professeur Charles Eastman (Eastman et al., 2018). Son application concrète dans le secteur de l'architecture, l'ingénierie et la construction (AEC), ne commence toutefois qu'au milieu des années 2000. Depuis, le BIM est adopté dans plusieurs pays et territoires, tels que les États-Unis, la Finlande, la Chine, le Hong Kong, le Royaume-Uni, l'Australie et Singapour. Son usage s'est progressivement étendu, couvrant toutes les phases des projets de construction. (Furneaux et Kivistö, 2008, cité dans Ahmad Latiffi et al., 2013).

2.2.2 Les aspects clés du BIM

Pour mieux comprendre la démarche BIM, il est essentiel d'en examiner les aspects clés. Dans notre recherche, le terme « aspects clés du BIM » détermine les éléments clés permettant de déployer le BIM d'une manière efficace et cohérente tout au long du cycle de vie du projet. Cette section met de l'avant les éléments clés suivants : l'environnement commun de données (CDE), les dimensions du BIM, le degré de maturité du BIM, le plan d'exécution du BIM (BEP) et le modèle fédéré (maquette numérique).

2.2.2.1 L'environnement commun de données (CDE)

L'environnement commun de données, ou *Common Data Environment* (CDE), est un espace numérique partagé pour le projet. Il offre des zones d'accès spécifiques adaptées à chaque intervenant, assurant une gestion efficace des informations tout au long du cycle de vie du projet (Preidel et al., 2016), comme le montre la figure 10. Autrement dit, un CDE constitue une plateforme numérique centralisée où toutes les informations du projet sont regroupées et gérées dans le cadre de la démarche BIM (Autodesk, n.d).

Dans les méthodes traditionnelles, l'échange d'informations entre les parties prenantes est manuel. Souvent, les informations résident dans différents systèmes, ce qui rend difficile le partage des données demandées au bon moment. L'apport du CDE est qu'il permet la circulation de l'information d'une façon centralisée entre les parties prenantes ainsi que la facilitation de la mise à jour et du contrôle (Autodesk, n.d). La figure 11 présente le modèle traditionnel de partage des données par rapport au CDE du BIM.

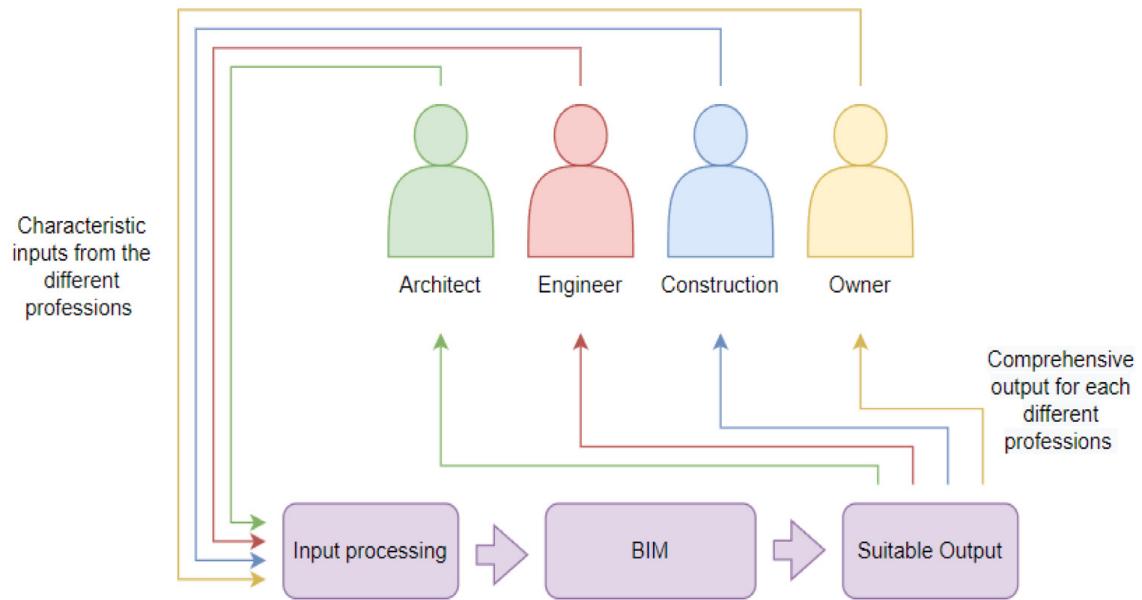


Figure 10. Modèle de l'interaction entre les parties prenantes en utilisant le CDE (Bassir et al., 2023).

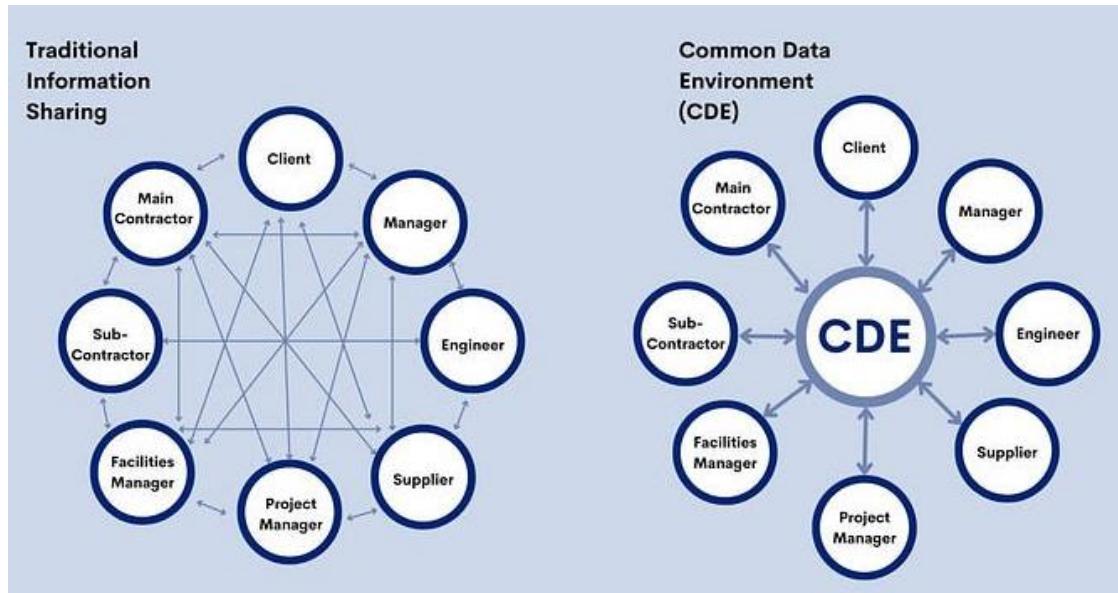


Figure 11. Comparaison entre les méthodes traditionnelles et le CDE du BIM (Biju, 2022).

2.2.2.2 Les dimensions du BIM

Une dimension BIM est dans son essence, une application spécifique du processus BIM. Chacune introduit une perspective particulière qui vient enrichir le modèle en fonction d'un usage ciblé. Ce niveau d'information supplémentaire ajoute de la valeur aux données, les rendant plus pertinentes et exploitables pour les différents intervenants tout au long du cycle de vie d'un actif (Ellis, 2023).

De manière générale, comme présentées dans la figure 12, sept dimensions du BIM sont distinguées. La 3D correspond à la modélisation tridimensionnelle, qui constitue la base de travail et représente l'usage le plus répandu (Koutamanis, 2020). La 4D représente l'intégration d'informations liées au temps dans les modèles 3D, permettant ainsi la simulation et l'optimisation des processus de construction (Ding et al., 2014; Doukari et al., 2022). La 5D incorpore l'estimation des coûts dans les modèles 3D et les calendriers de projet, ce qui présente des avantages significatifs pour les estimateurs de la construction et les professionnels du bâtiment. Des recherches démontrent que le BIM 5D peut accroître l'efficacité, améliorer la visualisation et faciliter l'identification des risques en matière de gestion des coûts (Harrison et Thurnell, 2014; Stanley et Thurnell, 2014). La 6D et la 7D représentent respectivement le développement durable et la maintenance (Gupta et al., 2017).

Cependant, les dimensions du BIM sont en débat constant au sein de l'industrie de la construction. Piaseckienè (2022) indique qu'il y a un accord général sur les cinq premières dimensions, les classifications qui les suivent restent sujettes à controverse. Koutamanis (2020) défend la position selon laquelle le BIM devrait se limiter à la 4D, estimant que toute dimension supplémentaire peut être dérivée des capacités de calcul du BIM 4D. En revanche, d'autres chercheurs explorent des dimensions additionnelles, reliant le BIM aux applications de bâtiments intelligents à travers les différentes étapes du projet (Yang et al., 2021).

Ainsi, bien que les dimensions 3D à 5D soient largement acceptées et utilisées dans la pratique, la pertinence des dimensions supérieures reste discutée. Cette divergence reflète à la fois les limites et les opportunités de l'expansion du BIM : certains le considèrent comme

un outil strictement de planification et de coûts, tandis que d'autres voient un potentiel pour intégrer des fonctionnalités avancées et des applications intelligentes dans le cycle de vie des bâtiments.

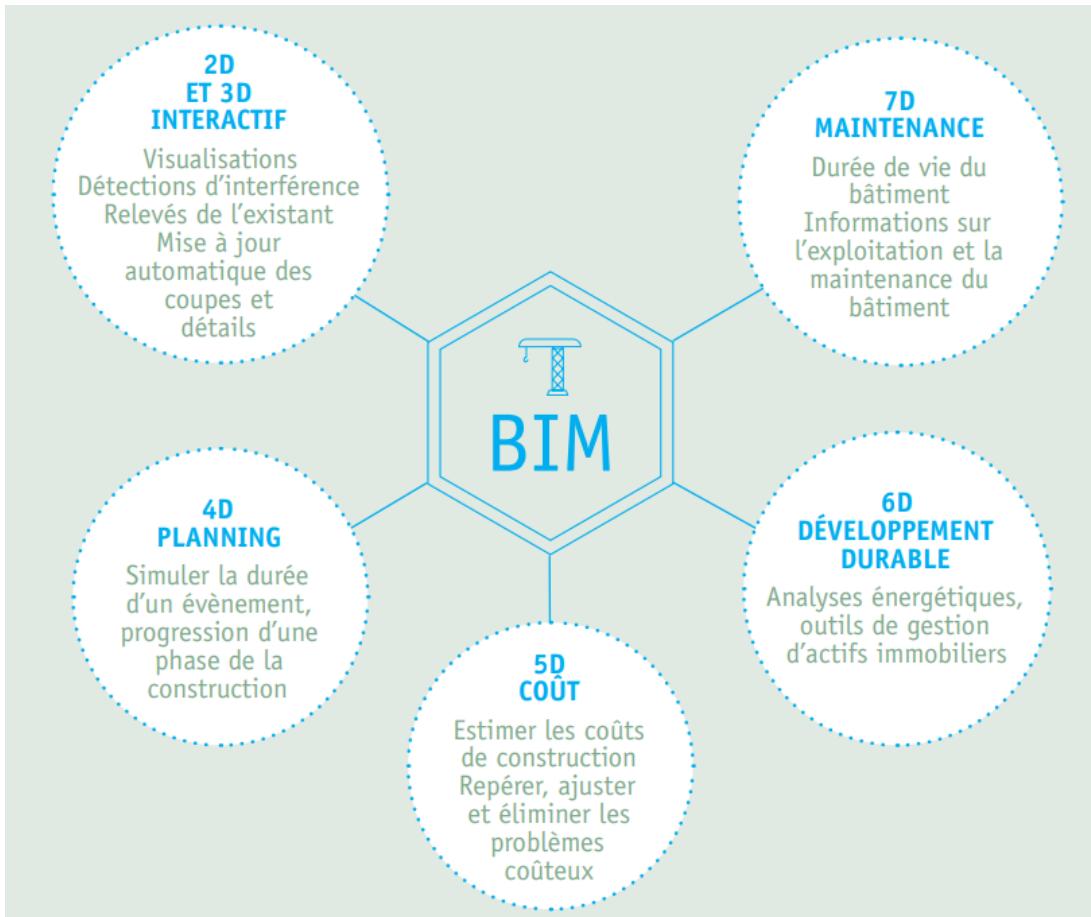


Figure 12. Les dimensions du BIM. (Association Pour l'Emploi des Cadres [APEC], 2017).

2.2.2.3 La maturité du BIM

La maturité du BIM correspond au degré d'adoption et d'intégration des méthodes, des outils et des procédures BIM dans un projet de construction (Eischet, 2023). Elle permet d'évaluer dans quelle mesure le BIM est mis en œuvre efficacement, tant sur les plans technologiques, collaboratif qu'organisationnel. Quatre niveaux de maturité BIM sont distingués selon Boton et Kubicki (2014); Succar (2009) et représentés dans la Figure 13 :

- Le niveau 0, ou pré-BIM, correspond à une gestion traditionnelle des projets, avec des documents développés séparément, des outils de dessin assisté par ordinateur (DAO), et des échanges non structurés (Boton et Kubicki, 2014; Succar, 2009).
- Le niveau 1, dit de modélisation orientée-objet, introduit des modèles numériques monodisciplinaires et l'automatisation de certains livrables, bien que les échanges restent limités et non standardisés (Boton et Kubicki, 2014; Succar, 2009).
- Le niveau 2, de collaboration orientée modèle, marque une avancée avec l'utilisation de modèles disciplinaires coordonnés, des processus d'échange formalisés et des outils permettant des simulations avancées 4D et 5D (Boton et Kubicki, 2014; Succar, 2009).
- Le niveau 3, ou l'intégration orientée-réseau, représente une adoption complète du BIM, avec une modélisation multidisciplinaire, une synchronisation des données en temps réel, et l'usage de serveurs interopérables ou du nuage pour centraliser l'information (Boton et Kubicki, 2014; Succar, 2009).

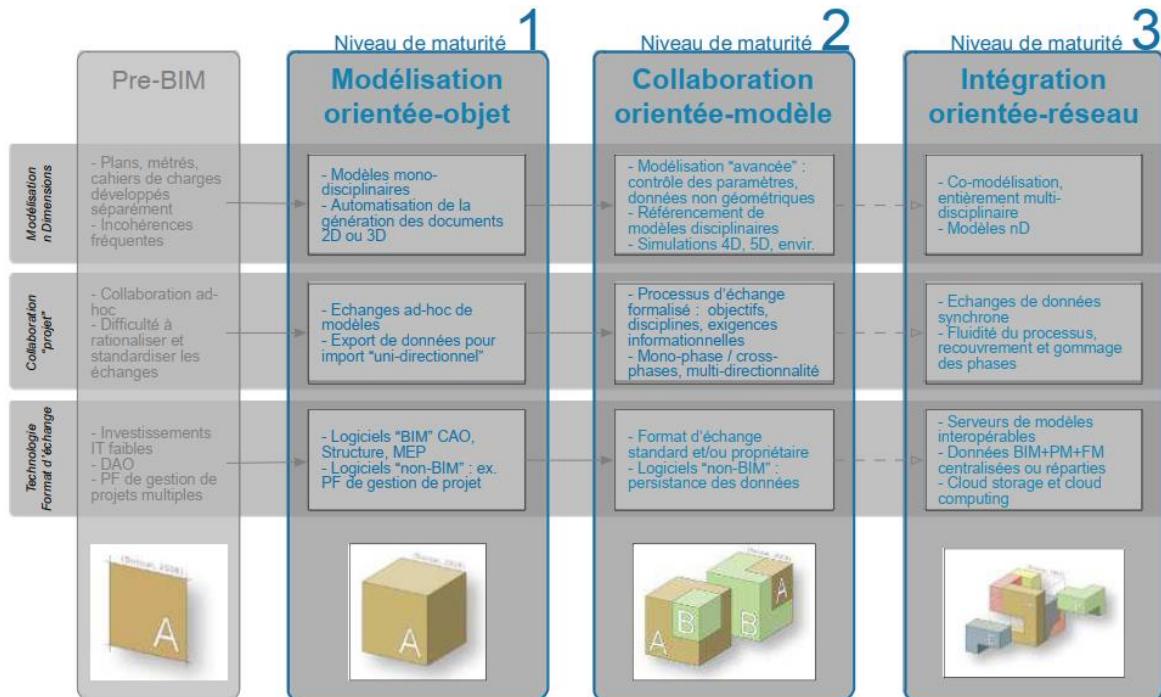


Figure 13. Les niveaux de maturité du BIM (Boton et Kubicki, 2014).

2.2.2.4 Plan d'exécution BIM (BEP)

Le plan d'exécution du BIM, ou *BIM Execution Plan* (BEP), est un document essentiel qui sert comme un outil performant pour le management de projet assurant la préservation et le transfert des données tout au long du cycle de vie du projet (Sudakova et al., 2024). Il inclut les objectifs, les flux des processus et les exigences de processus BIM du projet qui sont alignées avec les attentes des parties prenantes et les objectifs visés (Bakar et al., 2021). Le BEP est considéré parmi les actifs organisationnels intégrés au plan de management de la qualité.

2.2.2.5 Le modèle fédéré

Un modèle fédéré est un modèle BIM combiné, constitué par l'assemblage de plusieurs maquettes disciplinaires distinctes dans un seul environnement. Ces modèles restent indépendants les uns des autres, mais sont visualisés ensemble pour faciliter la coordination du projet (McPartland, 2017). Il sert de support structuré à la coordination interdisciplinaire, en facilitant la vérification de la cohérence globale du projet et en encadrant les échanges dans une logique de collaboration sans altération des données d'origine. Le partage du modèle fédéré se fait dans le CDE, auquel chacune des parties prenantes a accès.

La combinaison des modèles dans un environnement commun permet de visualiser l'ensemble du projet dans un seul outil, ce qui facilite la coordination dès les premières phases. Elle permet de détecter rapidement les erreurs de conception, les informations manquantes et les conflits entre disciplines, avant même le début du chantier. Cette approche favorise également des estimations plus précises des coûts et des délais, grâce à la consolidation anticipée des données et à la validation des choix techniques dès la phase de conception (McPartland, 2017).

2.2.3 L'utilisation du BIM par phase de projet

Le cycle de vie d'un projet désigne la succession structurée de phases que traverse un projet, depuis sa conception initiale jusqu'à son achèvement (PMI, 2017). Une phase de projet correspond à un regroupement cohérent d'activités interdépendantes, dont l'accomplissement permet de produire un ou plusieurs livrables définis (PMI, 2017).

Selon le PMBOK 6^e, il y a généralement 4 phases au cycle de vie du projet dans toutes les disciplines, l'initialisation, la préparation, l'exécution et la clôture (PMI, 2017). Même si le projet de construction partage le même cycle de vie, il a sa propre terminologie. Pour PMI (2016), les phases du projet de la construction sont la planification, la conception, la construction et la clôture, comme montré dans la figure 14.



Figure 14. Cycle de vie du projet de construction, par l'auteur sur la base de PMI (2016).

Le BIM est de plus en plus utilisé tout au long du cycle de vie des projets de construction, de la phase de la planification jusqu'à la clôture. Toutefois, son application demeure plus manifeste lors de la planification et la conception qui précède la construction du bâtiment. Ahmad Latiffi et al. (2013) a présenté l'usage du BIM par phase de projet. Cependant, il a précisé qu'il y a trois phases, la préconstruction, la construction et la post-construction. Le tableau 11 représente l'utilisation du BIM par phase du projet selon Ahmad Latiffi et al. (2013) avec adaptation aux phases de projet dictées par PMI (2016) et présentées dans la figure 14 au-dessus.

Tableau 11 : Usages du BIM par phase de projet

| Phase | Stage | Usage du BIM |
|----------------------|----------------------------------|---|
| Planification | Modélisation de l'état des lieux | <ul style="list-style-type: none"> Améliorer la précision de la documentation de l'état des lieux |
| | Planification | <ul style="list-style-type: none"> Identifier les problèmes liés au séquençage ou à la planification du calendrier |
| Conception | Conception | <ul style="list-style-type: none"> Faciliter une communication améliorée et des prises de décision en conception plus rapides. Réaliser la détection des conflits et l'analyse des interférences. |
| | Échéancier | <ul style="list-style-type: none"> Permettre au chef de projet et à l'entrepreneur de visualiser la séquence des travaux de construction, les équipements et les matériaux, tout en suivant l'avancement par rapport à la logistique et aux délais établis. |
| | Estimation | <ul style="list-style-type: none"> Faciliter la création d'estimations, de comptages et de mesures directement à partir d'un modèle de projet en 3 dimensions (3D). Diminuer les coûts associés à la demande de services publics et à la démolition. |
| Construction | Construction | <ul style="list-style-type: none"> Faciliter la démonstration du processus de construction, y compris les voies d'accès et de sortie, les flux de circulation, ainsi que les matériaux et les équipements sur le site. Améliorer le suivi du contrôle des coûts et des flux de trésorerie. Permettre le suivi en temps réel des activités, un meilleur flux des ressources et une gestion optimisée du site. |
| Clôture | Clôture | <ul style="list-style-type: none"> Permettre la modélisation du bâtiment tel que construit (<i>As built</i>). |

Source : Par Ahmad Latiffi et al. (2013), modifié.

Après avoir défini les fondements et les aspects clés du BIM, il est pertinent de s'intéresser dans la section suivante à l'intelligence artificielle, dont les sous-domaines offrent des possibilités complémentaires pour la gestion et l'amélioration de la qualité dans les projets de construction.

2.3 L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

L'IA est une technologie en rapide évolution qui influencera fortement les projets et les pratiques de management de projet dans un avenir proche (Holzmann et Lechiara, 2022). Dans ce sens, il est important d'analyser et de considérer cette influence croissante. L'intégration de l'IA dans les projets de construction est encore en phase initiale, mais son développement rapide est prévu dans les années à venir (Pan et Zhang, 2023). Selon un rapport de *Fortune Business Insight* (2025), la taille du marché mondial de l'IA au secteur de la construction est évaluée à 3,2 milliards de dollars américains en 2023, avec une estimation de 3,93 milliards USD en 2024 et 22,68 milliards USD en 2032. L'Amérique du Nord domine le marché avec une part de 38,75 % en 2023, équivalent de 1,24 milliard USD. Le management de projet représente 35 % du marché de l'application de l'IA en 2022 (Fortune Business Insight, 2025).

L'intégration de l'IA repose sur la simulation de la pensée humaine, permettant un apprentissage approfondi et l'analyse de grandes quantités de données pour réaliser des tâches de prédiction et d'optimisation (Pan et Zhang, 2023). Cette technologie favorise un processus de prise de décision plus intelligent, avec moins de dépendance à l'expérience et aux connaissances humaines. Par ailleurs, Sacks et al. (2020) considère que l'IA permet de mettre en place des solutions intelligentes visant à optimiser la planification, la gestion des coûts, l'assurance qualité et la sécurité sur les chantiers.

2.3.1 Définition de l'intelligence artificielle

Selon Holzmann et Lechiara (2022), le terme « intelligence artificielle » a été introduit aux années 1950 grâce aux travaux d'Alan Turing (1950) et de McCarthy et al. (2006). Turing (1950) a introduit un test pratique pour évaluer l'intelligence des ordinateurs, connu aujourd'hui sous le nom de test de Turing. Puis, six ans plus tard, en 1956, McCarthy et al. (2006) ont donné le terme « intelligence artificielle » à cette branche de science.

Plusieurs définitions ont été données à l'IA. Rich et al. (2010) l'ont défini comme la discipline qui explore comment permettre aux machines d'exécuter des tâches que les humains maîtrisent actuellement mieux. Nilsson (2010) dit que l'IA désigne les efforts visant à doter les machines de capacités intelligentes, c'est-à-dire capables d'agir de manière appropriée et avec prévoyance dans leur environnement. L'IA est défini par le leader des solutions numériques *International business machines* (IBM) comme « une technologie qui permet aux ordinateurs et aux machines de simuler des capacités humaines, telles que l'apprentissage, la compréhension, la résolution de problèmes, la prise de décisions, la créativité, et l'autonomie » (Stryker et Kavlakoglu, 2024).

2.3.2 Évolution de l'intelligence artificielle

Depuis les années 1950, la discipline de l'intelligence artificielle a connu une évolution significative des concepts, marquée par des avancées technologiques majeures. En particulier, la création des premiers réseaux de neurones, les systèmes experts et les langages de programmation dédiés (Mucci, 2024; Zouinar, 2020). Entre 1980 et 2000, l'IA se spécialise à travers les systèmes experts et les premiers robots interactifs, mais traverse deux périodes de désillusion appelées : les hivers de l'IA, dues à des attentes trop élevées (Mucci, 2024). De 2000 à 2020, l'essor du Deep Learning, soutenu par l'augmentation des données disponibles et de la puissance de calcul, relance fortement le domaine avec des avancées majeures en vision par ordinateur, en traitement du langage naturel et en jeux complexes (Mucci, 2024; Zouinar, 2020). Enfin, de 2020 à 2025, une nouvelle ère dominée par l'IA générative a commencé, elle se concentre sur la création de nouveaux contenus (Mucci, 2024; Zouinar, 2020). L'évolution des concepts de l'IA est présentée dans la figure 15.

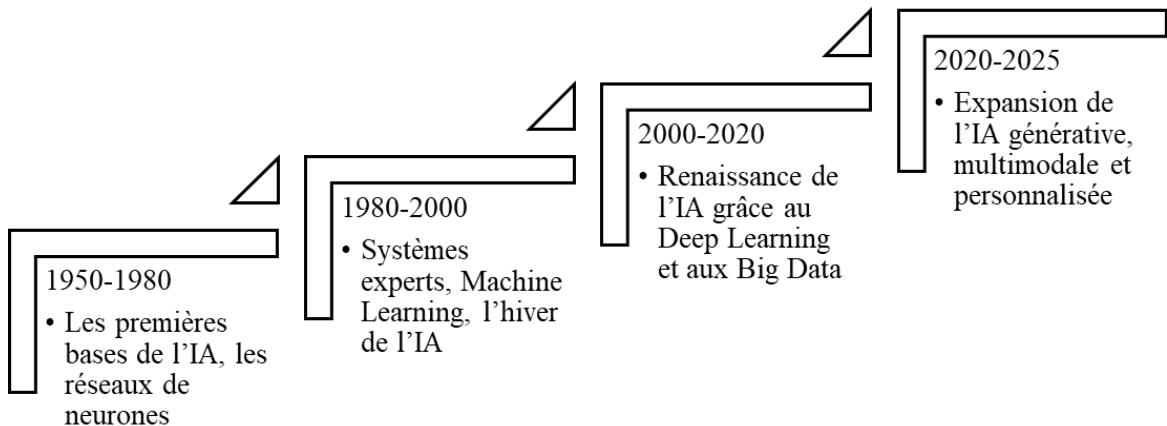


Figure 15. Évolution de l'intelligence artificielle, par l'auteur.

2.3.3 Types, sous-domaines et composantes de l'IA

Selon Goertzel et Wang, 2007, cité dans Abioye et al. (2021), l'intelligence artificielle repose sur cinq composantes principales et se décline en trois types fondamentaux, ainsi qu'il se divise en sept sous-domaines (Abioye et al., 2021), comme représentée dans la figure 16. L'IA connaît une adoption progressive dans l'AEC. Plusieurs de ses sous-domaines sont déjà mis en œuvre pour améliorer la gestion de projet, la réduction des risques, le respect des délais, la gestion de la chaîne d'approvisionnement, ainsi que les objectifs de qualité et de sécurité.

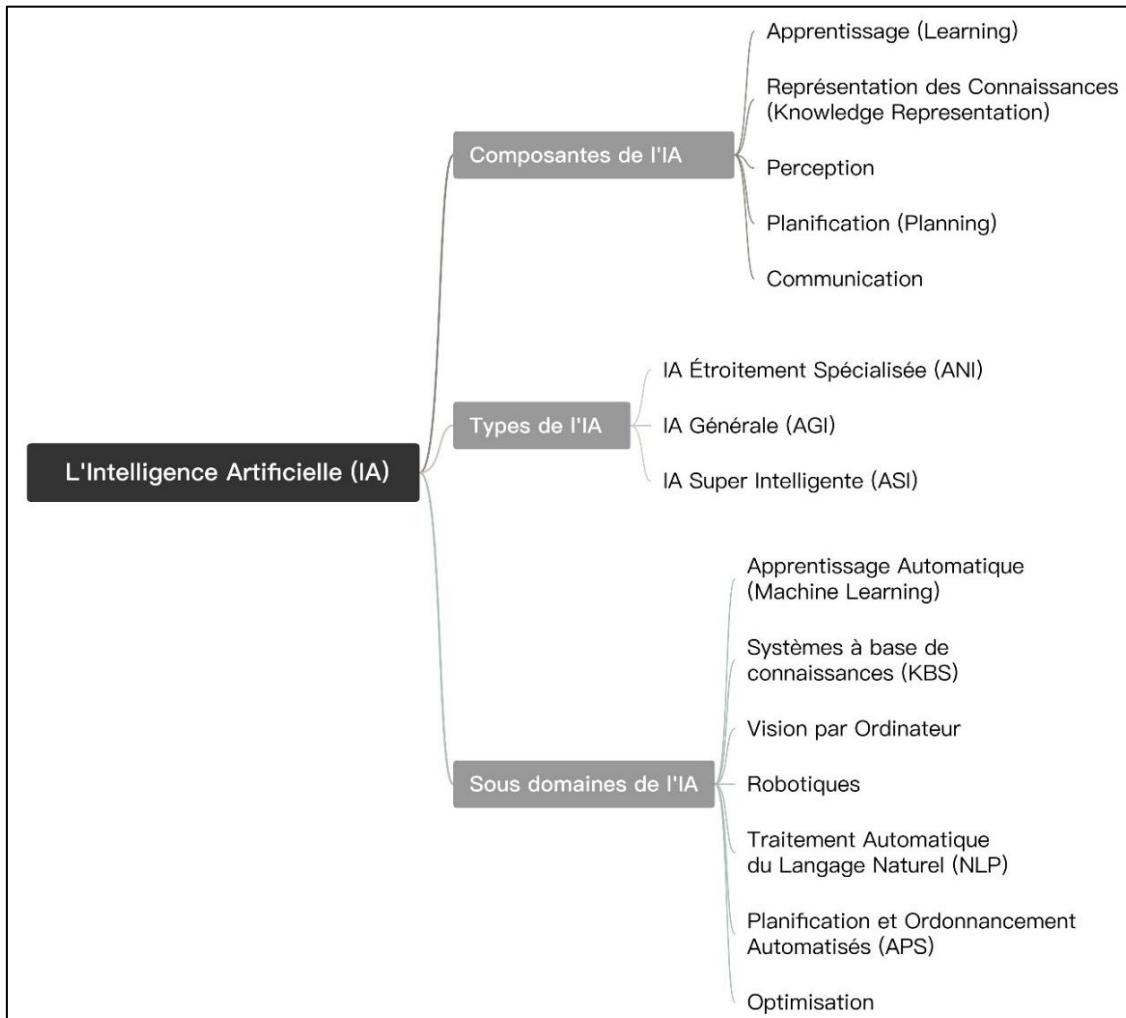


Figure 16. Types, sous-domaines et composantes de l'IA, par l'auteur à partir de (Abioye et al., 2021).

2.3.4 Motivation de choix du sous-domaine étudié

Le champ de l'IA couvre un large éventail de sous-domaines. Dans la pratique, ces sous-domaines sont souvent mobilisés conjointement au sein de systèmes hybrides. Initialement, la recherche visait à examiner l'ensemble de ces sous-domaines afin d'obtenir une vision globale de leurs apports potentiels à la gestion de la qualité. Toutefois, compte tenu des contraintes méthodologiques et temporelles liées à cette étude réalisée dans un

contexte de maîtrise en gestion de projet, il a été décidé de recentrer l'analyse sur un seul sous-domaine, à savoir celui de l'Optimisation (OPT).

Ce choix est motivé par les applications prometteuses et les approches particulièrement adaptées aux projets de construction, qui sont souvent confrontées à des problèmes d'allocation de ressources, de conception et planification complexe, ou de compromis entre qualité, coûts et délais. De plus, les algorithmes d'optimisation permettent de traiter efficacement les objectifs, sans dépendre des grands volumes de données d'apprentissage historiques (Big Data), comme le Machine Learning (ML), qui nécessite des ressources pour gérer les bases de données et les grands volumes historiques récoltés, ce qui les rend particulièrement utiles dans les approches comme la conception générative. Ce positionnement permet ainsi de focaliser l'étude sur un levier algorithmique cohérent avec la nature des projets étudiés, tout en maintenant un périmètre de recherche rigoureux et maîtrisable. La figure 17 représente une illustration du sous-domaine choisi pour l'étude.

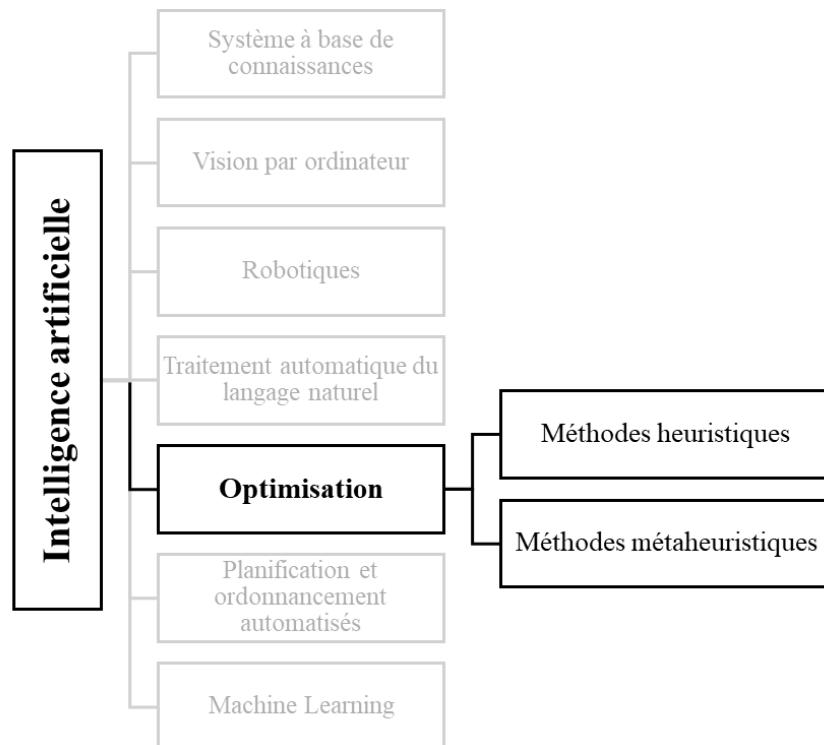


Figure 17. Le sous-domaine choisi pour l'étude, par l'auteur.

2.3.5 Définition de l'optimisation (OPT)

L'optimisation, en tant que sous-domaine de l'intelligence artificielle, regroupe un ensemble de méthodes visant à identifier la ou les meilleures décisions possibles dans un espace de solutions, tout en tenant compte de contraintes spécifiques (Boyd et Vandenberghe, 2004, cité dans Abioye et al., 2021). D'abord considérée comme une discipline mathématique, l'optimisation a évolué depuis les années 1950 avec l'émergence de l'IA, devenant l'un de ses sous-domaines clés (Abioye et al., 2021).

Les algorithmes d'optimisation se classent généralement en deux grandes approches, comme le montre la Figure 17 au-dessus : **les approches heuristiques**, conçues pour résoudre des problèmes spécifiques, dont les solutions sont rarement transférables à d'autres contextes ; et **les approches métahéuristiques**, plus générales et adaptables, permettant de traiter une diversité de problèmes d'optimisation par simple ajustement de paramètres (Das et al., 2021). Chaque approche comprend de nombreux algorithmes, qui ne seront pas détaillés ici, car cette recherche se concentre principalement sur les applications managériales et non sur les fondements informatiques.

2.3.6 Les applications de l'OPT au management de projets de construction

Parmi les sous-domaines de l'intelligence artificielle appliqués aux projets de la construction, l'optimisation s'est progressivement imposée comme l'un des axes de recherche les plus explorés. Cette prédominance s'explique par les obstacles managériaux et techniques à une gestion performante des projets (Abioye et al., 2021). Face à ces défis, l'optimisation offre une boîte à outils performante pour améliorer plusieurs dimensions de la gestion de projet. Elle est aujourd'hui mobilisée dans des applications concrètes, notamment : la gestion des coûts et de l'échéancier du projet (Akcay et Işıkyıldız, 2020), la gestion des équipes du projet (Cheng et Tran, 2015), le support de la prise des décisions (Chen et al., 2010), la santé et sécurité sur chantiers (Winge et al., 2019), la gestion des approvisionnements du projet (Rehman et al., 2021), et l'optimisation des conceptions (Janga Reddy et Nagesh Kumar, 2007) qui se fait par la méthode de la conception générative, ou

generative design (GD). Le GD est une méthodologie de conception émergente qui intègre l'IA comme l'OPT et les processus paramétriques pour créer des solutions innovantes dépassant les capacités humaines (Demirel et al., 2024).

Dans ces différents contextes d'applications, plusieurs types d'algorithmes d'optimisation sont mobilisés selon la nature des problèmes à résoudre. Les algorithmes évolutionnaires (EA), tels que les algorithmes génétiques (GA), les algorithmes multiobjectifs (MOGA, NSGA-II) et les algorithmes d'évolution différentielle (DE), sont largement utilisés dans la planification de projet, l'optimisation de la conception, ou encore l'analyse coût-délai-qualité et la prise de décisions (Arditi et Alothaimeen, 2019). Les algorithmes bio-inspirés, comme l'optimisation par essaim de particules, ou *particle swarm optimisation* (PSO), sont appliqués par Wang (2025) afin d'améliorer la prise de décision dans les constructions des bâtiments préfabriqués. D'autres approches, telles que l'optimisation par colonies de fourmis, ou *ant colony optimisation* (ACO), sont privilégiées dans la gestion des ressources.

2.4 MISE EN ÉVIDENCE DE LA RELATION ENTRE LES VARIABLES Y ET X : IMPACT DE L'UTILISATION DU BIM (Y) SUR LE MANAGEMENT DE LA QUALITÉ (X)

Le BIM incarne la technologie de pointe dans l'industrie de l'AEC, il représente un nouveau paradigme de gestion de projet (Azhar, 2011). Améliorer la qualité est l'objectif principal du BIM (Kaner et al., 2008).

Plusieurs études ont exploré l'intégration du BIM dans le management de la qualité des projets de construction. Cheng (2018) a développé un cadre pour l'application du BIM dans les différentes phases d'un projet et a conçu un prototype de système de modèle de contrôle de la qualité en utilisant l'*Application Programming Interface* (API) d'Autodesk Revit (un logiciel de modélisation des données de bâtiment basé sur la démarche BIM). Mills (2010) a affirmé que le management de la qualité constitue le domaine le plus adéquat pour l'application du BIM. Nguyen et al. (2018) ont suggéré un modèle de management de la qualité basé sur l'informatique en nuage, et les dispositifs mobiles, en s'appuyant sur

Autodesk BIM 360 (une plateforme collaborative infonuagique dédiée au BIM), afin d'améliorer l'efficacité par rapport aux méthodes basées sur papier. Chen et Luo (2014) ont proposé un cadre de contrôle de qualité intégrant un modèle 4D combiné avec un modèle spécifique aux processus, à l'organisation et au produit de l'entreprise.

Ces approches diffèrent quant aux outils et aux phases ciblées : certains se concentrent sur le suivi des processus via la 4D, d'autres sur la collaboration et la communication en temps réel. Cette diversité montre que l'impact réel du BIM sur la qualité dépend du contexte organisationnel et technologique, et que son application reste complexe.

La distinction de l'impact du BIM sur le QP, la QA et le QC de manière séparée n'est pas courante dans la littérature, ce qui pourrait s'expliquer par le fait que ces processus sont intrinsèquement liés et interagissent tout au long du cycle de vie du projet. En outre, l'étude de l'impact du BIM sur les processus de QM à travers l'ensemble de ses aspects clés, comme le CDE, ses dimensions, sa maturité, son BEP et le modèle fédéré, est peu commune. Dans cette section, l'impact du BIM sera abordé de la même façon. La figure 18 présente les impacts identifiés dans la littérature.

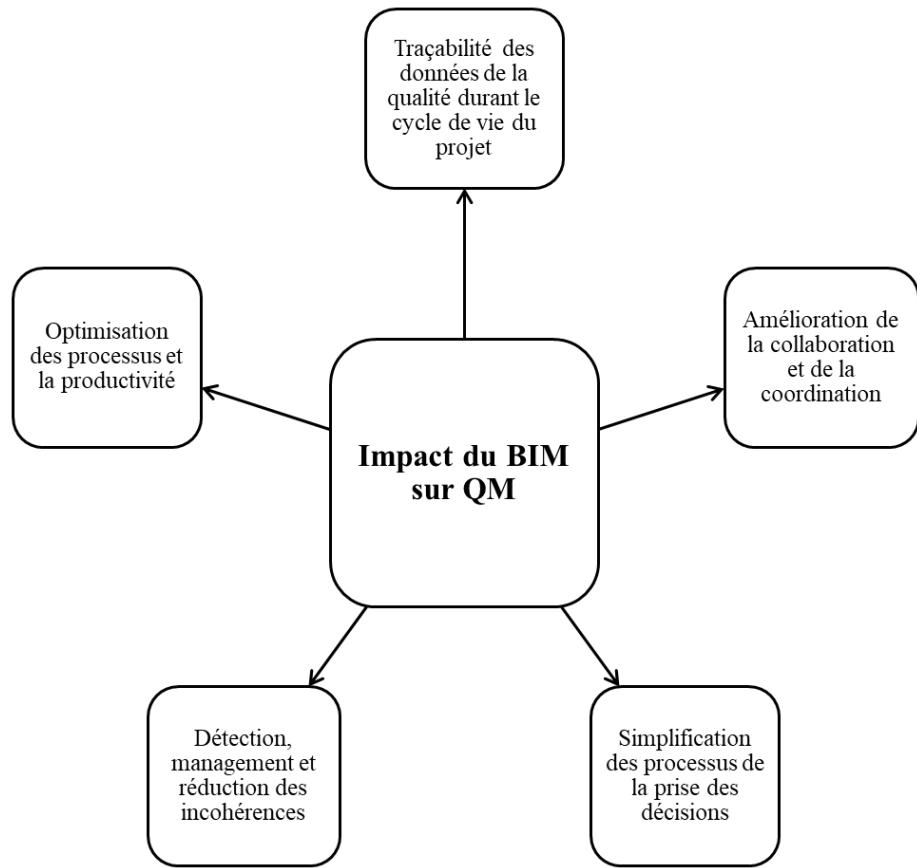


Figure 18. L'impact de l'intégration du BIM sur le management de la qualité, par l'auteur.

2.4.1 Traçabilité des données de la qualité durant le cycle de vie du projet

Le BIM offre aux parties prenantes la possibilité de visualiser, d'analyser et de collaborer autour d'une maquette numérique représentant le bâtiment tout au long de son cycle de vie (NIBS, 2007, cité dans Talebi, 2014). Il repose sur une modélisation tridimensionnelle associée à une base de données partagée, facilitant les processus de conception et de construction (Grand et al., 2018). Ce partage d'information s'effectue via le CDE, qui peut permettre de consulter et de suivre en temps réel les changements et les informations à jour sur les ressources et les opérations liées à la construction (Lindholm et al., 2025). Cela, améliore considérablement la gestion de l'information et réduit les risques de perte de données liées au management de la qualité dans les projets de construction lors des transitions entre les phases du projet ou en cas de changements d'équipes, et garantit des

transitions plus fluides (Hilgemberg, 2024). Il permet de capturer et de centraliser les connaissances tout au long du cycle de vie du projet, répondant ainsi aux défis liés à la gestion de l'information dans les méthodes traditionnelles (Wang et al., 2022). Cette centralisation de données touche en premier le processus de QP, permettant l'intégration les livrables du processus comme : les exigences contractuelles et de la qualité, le QMP et les métriques de QA, dans un environnement structuré, réduisant les risques de perte ou de dilution de l'information. Par ailleurs, Le CDE facilite l'exécution de la qualité QA et permet le QC en identifiant les écarts dans les processus et dans les livrables grâce à l'historique intégré.

La figure 19 présente une comparaison entre le BIM et les méthodes traditionnelles de la gestion des données durant le cycle de vie du projet, il permet d'éviter la perte de données en passant d'une phase à l'autre, contrairement aux méthodes traditionnelles. Par conséquent, une optimisation de la valeur documentaire et du temps est remarquée.

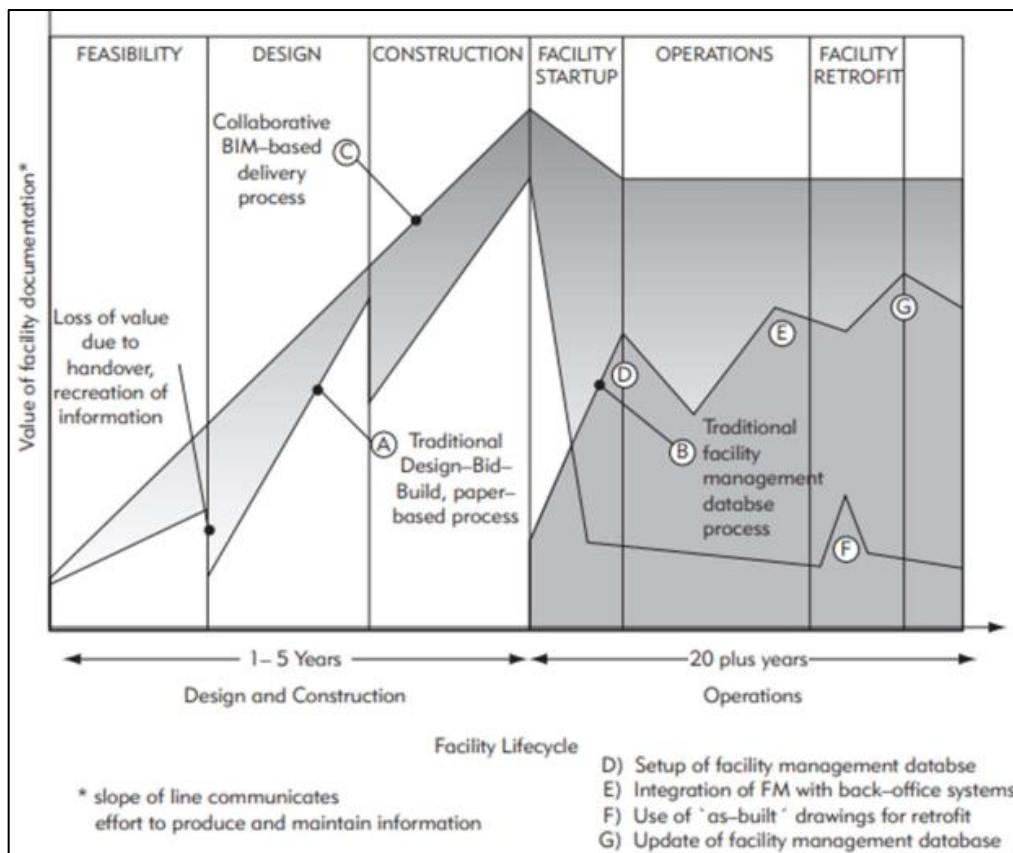


Figure 19. Gestion des données durant le cycle de vie du projet (Eastman et al., 2018).

2.4.2 Amélioration de la collaboration et de la coordination

La conception collaborative en BIM repose sur l'intégration et l'échange de modèles entre différentes disciplines (Lu et al., 2013), notamment l'architecture, la structure, ainsi que les systèmes de mécaniques, électriques et de plomberie (MEP). Cette intégration est rendue possible grâce au modèle fédéré, qui regroupe les différents modèles disciplinaires dans une maquette numérique unique et interconnectée, partagée sur le CDE. Comme l'illustre la figure 20, ce modèle offre une représentation globale et cohérente du projet, accessible à toutes les parties prenantes.

Cette approche, combinée à l'utilisation d'un CDE, renforce considérablement la collaboration et la coordination (Lindholm et al., 2025; Lu et al., 2013; Poirier et al., 2017; Seyis et Özkan, 2024) en permettant à tous les acteurs du projet de travailler sur une base de données commune, mise à jour en temps réel. Son utilisation dans les projets de construction permet à tous les membres de l'équipe de collaborer de manière plus précise et efficace qu'avec les processus traditionnels (Qiu, 2011; Zollinger et al., 2010). En facilitant la coordination entre les différentes disciplines, le BIM permet d'anticiper les conflits avant le démarrage des travaux et de simplifier la prise de décision. Cette approche favorise la détection précoce des erreurs de conception, ce qui limite les reprises et contribue à une meilleure qualité du projet (Sinenko et al., 2020). Un exemple de la collaboration permis par le modèle fédéré sur le CDE, est que les ingénieurs des entreprises de construction peuvent télécharger le modèle de contrôle de la qualité (modèle QC) sur les plateformes infonuagiques des propriétaires de projets ou des autorités gouvernementales, qui peuvent ensuite vérifier la qualité et demander à l'entrepreneur de soumettre les rapports associés (Cheng, 2018). La gestion centralisée et collaborative des modèles permet également une meilleure définition anticipée des exigences qualité lors du processus QP, et d'assurer la conformité aux exigences du projet et aux normes en vigueur (Preidel et al., 2021), tout au long du cycle de vie du projet. Le degré de la collaboration et la coordination à travers le BIM dépend directement de la maturité de l'utilisation du BIM dans le projet, ainsi que la dimension nD de développement du modèle.

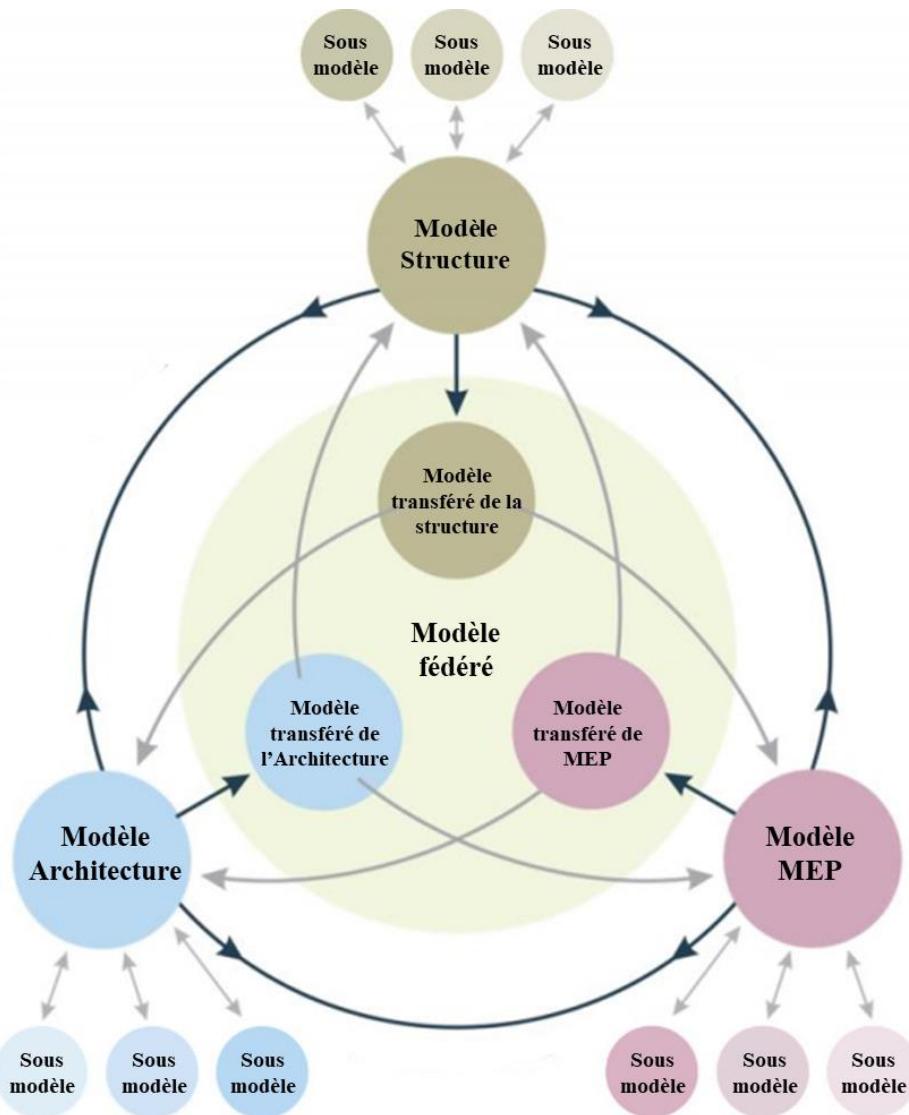


Figure 20. La collaboration BIM via le modèle fédéré (Davies et al., 2015), modifié

2.4.3 Simplification de processus de la prise des décisions

Le BIM est adopté par plusieurs parties prenantes, notamment les architectes, les ingénieurs, les propriétaires de projets, les gestionnaires d'installations, les entrepreneurs, les sous-traitants, les fabricants et les gestionnaires de projet (Eastman et al., 2018). Le BIM présente un potentiel considérable aux équipes pour simplifier les processus de prise de décision dans le domaine de la construction (Azhar, 2011; Bank et al., 2010; Sinenko et al.,

2020), en fournissant des informations en temps réel et des simulations précises (dépend de la maturité du BIM et la dimension nD appliquée) sur des plateformes et environnements collaboratifs (les CDE précisément). Ces données actualisées, accessibles à tout moment, donnent une vision claire et précise de l'avancement du projet, ainsi que des éventuels risques ou défis à anticiper. Cela permet aux décideurs d'ajuster rapidement les plans, d'optimiser les ressources et de réagir efficacement aux changements, sans attendre des rapports manuels ou des mises à jour tardives.

2.4.4 Détection, management et réduction des incohérences

L'un des impacts majeurs du BIM est la détection précoce des incohérences, qui permet d'améliorer la fluidité des processus de conception et de construction. En identifiant automatiquement les interférences entre les différents éléments sur le modèle fédéré partagé, le BIM aide à anticiper et résoudre les incohérences entre les sous-systèmes, tels que l'architecture, la structure et la MEP, ce qui améliore la qualité de la conception (Hartmann, 2010; Shewale et al., 2023). Le BIM aide à suivre et à documenter les incohérences pendant la conception et durant la construction (Chelson, 2010), facilitant leur résolution rapide et la réduction du retravail (Abdelbary et al., 2020; Chelson, 2010; Khalesi et al., 2020). En parlant de la réduction de retravail, dans une étude de cas menée par Domingues et Santos (2020), une réduction de 42,5 % de retravail est achevée après l'utilisation du BIM. Cette capacité de détecter et de gérer les interférences optimise directement le processus QC et aide à baisser le coût de la qualité, ou *cost of quality* (CoQ).

2.4.5 Optimisation des processus et de la productivité

Le BIM contribue à l'optimisation des processus de la planification (Chelson, 2010) et à la productivité (Chelson, 2010; Shewale et al., 2023; Sinenko et al., 2020), à l'amélioration de la qualité de la conception (Shewale et al., 2023) et du projet. En effet, les projets utilisant le BIM connaissent une réduction de 90 % des demandes d'informations (RFIs), ou *Requests For Information*, utilisées pour les changements, ce qui permet d'économiser 9 % du temps

de gestion et 9 % des coûts du projet pour les entrepreneurs spécialisés, ainsi qu'une augmentation de la productivité sur terrain de 5 à 40 % en minimisant les reprises de travail, ou *Rework* (Chelson, 2010). Cette baisse des RFIs est due au partage de l'information dans un modèle fédéré via le CDE. En minimisant ces ajustements coûteux, le BIM aide à respecter les délais, les coûts (Sholeh et al., 2020; Zhang et Gao, 2013) et à optimiser l'utilisation des ressources.

2.5 MISE EN ÉVIDENCE DE LA RELATION ENTRE LES VARIABLES Z ET X : IMPACT DE L'INTÉGRATION DE L'IA (Z) SUR LE MANAGEMENT DE LA QUALITÉ (X)

2.5.1 L'impact des algorithmes d'optimisation sur le management de la qualité

Les algorithmes d'optimisation sont largement mobilisés dans les projets de construction, que ce soit sous forme de modèles mono-objectifs ou multiobjectifs, afin d'équilibrer des compromis entre des critères tels que le coût, la durée et la qualité. Toutefois, la qualité y est généralement abordée dans la littérature en tant qu'une métrique de performance agrégée, comme Akcay et Işıkyıldız (2020); Elbeltagi (2007), sans distinction explicite entre les trois processus fondamentaux du management de la qualité définis par le PMBOK 6^e édition : la planification, l'assurance et le contrôle de la qualité.

Cette approche globale masque pourtant les contributions spécifiques que les méthodes d'optimisation peuvent apporter à chacun de ces processus. Cette observation souligne une lacune dans la littérature actuelle et justifie une exploration plus fine de l'impact différencié de l'optimisation algorithmique sur QP, QA et QC dans les projets de construction. Une telle démarche permettrait de renforcer la pertinence managériale des modèles d'IA appliqués à la qualité, et d'orienter les pratiques vers des stratégies d'optimisation ciblées en fonction du cycle de vie de la qualité dans le projet. Dans la suite de cette section, l'impact global de l'optimisation sur la qualité projet sera présenté tel que documenté dans la littérature existante.

L'optimisation contribue de manière significative à l'amélioration de la qualité des projets de construction en renforçant la productivité et l'efficacité globale des processus (Abioye et al., 2021). En permettant une structuration plus rationnelle des étapes du projet et une meilleure utilisation des ressources, elle soutient indirectement les objectifs qualité et l'amélioration continue. Par ailleurs, l'intégration d'algorithmes d'aide à la décision multicritère, comme ceux développés par Chen et al. (2010) permet une prise de décision éclairée et la comparaison d'une manière systématique de plusieurs alternatives selon des critères de performance, limitant ainsi les biais subjectifs et renforçant la cohérence des choix. Selon Wang et al. (2023), l'OPT peut intégrer les exigences qualité du client en les traduisant en indicateurs mesurables, à travers la méthode de travail appelée : le déploiement de la fonction qualité, ou *quality function deployment* (QFD). Cette approche contribue notamment au QP et à la QA. Enfin, l'optimisation algorithmique contribue à identifier des compromis équilibrés entre le coût, la durée et la qualité (Abioye et al., 2021; Akcay et Işikyildiz, 2020; Pham et Ngoc Q. K, 2025), ce qui constitue un levier essentiel pour la maîtrise des exigences de la qualité dans les projets complexes. La figure 21 représente les impacts des algorithmes d'OPT sur le management de la qualité.

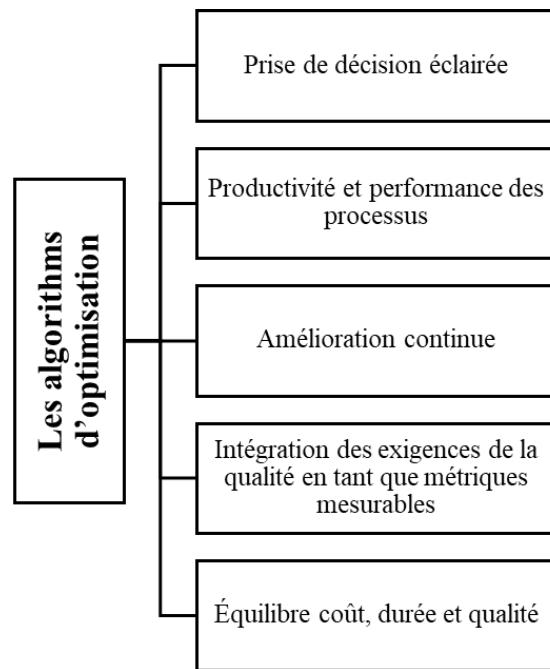


Figure 21. Impact de l'OPT sur le management de la qualité, par l'auteur.

2.6 PROPOSITIONS DES RELATIONS ENTRE LES VARIABLES X, Y ET Z

2.6.1 Proposition 1 (P1) : Impact de l'utilisation du BIM (Y) sur le management de la qualité (X)

La proposition 1 soutient que l'intégration du BIM dans les projets de construction contribue à l'amélioration du management de la qualité (QM), en agissant de manière significative sur ses trois processus fondamentaux définis par le PMBOK 6^e édition: la planification de la qualité, l'assurance qualité et le contrôle de la qualité par la mise en œuvre des principes QM de l'ISO 9001: 2015. Cette amélioration se manifeste notamment par une traçabilité des données de la qualité, une collaboration et coordination interdisciplinaire accrue, une prise de décision plus efficace et mieux informée, une réduction des incohérences et du retravail, ainsi qu'une productivité et processus optimisés. Cette contribution repose sur les aspects clés du BIM comme : l'environnement commun de données (CDE), le plan d'exécution BIM (BEP), le modèle fédéré, les dimensions BIM, et le degré de maturité BIM.

D'abord, le BIM à travers son CDE, facilite une approche processus efficace en centralisant les données liées à la qualité du projet et en structurant les flux d'information (Preidel et al., 2016) entre les disciplines et les parties prenantes, permettant une traçabilité des données et une transition plus fluide tout au long du cycle de vie du projet (Hilgemberg, 2024). Cette interopérabilité renforce la collaboration et la coordination interdisciplinaire (Lu et al., 2013; Poirier et al., 2017; Zollinger et al., 2010), notamment grâce au modèle fédéré du BIM qui regroupe les différents modèles disciplinaires dans un modèle collaboratif unique.

Ensuite, le BIM, à travers ces aspects clés, soutient les processus de la prise de décision (Azhar, 2011; Bank et al., 2010; Sinenko et al., 2020), en offrant une visualisation précise et en temps réel des maquettes numériques (NIBS, 2007, cité dans Talebi, 2014), permettant d'anticiper les problèmes et d'optimiser la planification (Chelson, 2010) et la productivité (Chelson, 2010; Shewale et al., 2023; Sinenko et al., 2020).

Cette capacité à simuler, analyser, collaborer et ajuster, dépend du degré de la maturité et les dimensions nD mises en œuvre dans le projet. Elle contribue à repérer et à réduire les incohérences (Chelson, 2010; Hartmann, 2010; Shewale et al., 2023; Sinenko et al., 2020), le retravail (Chelson, 2010; Sinenko et al., 2020), ainsi que les coûts liés à la qualité et au projet (Abdelbary et al., 2020; Chelson, 2010; Hartmann, 2010; Hurtado et Sullivan, 2012; Khalesi et al., 2020; Mésároš et Mandičák, 2017; Sholeh et al., 2020).

Par ailleurs, l'utilisation du BIM tout au long du cycle de vie du projet favorise une meilleure maîtrise de l'information, permettant un suivi continu des processus et une adaptation progressive aux exigences du projet. Cette approche contribue à optimiser la performance globale, en améliorant la qualité et en réduisant les délais (Zhang et Gao, 2013), tout en répondant plus efficacement aux attentes des clients, conformément au principe d'orientation client de l'ISO 9001: 2015.

2.6.2 Proposition 2 (P2) : Impact de l'utilisation de l'IA (Z) sur le management de la qualité (X)

La proposition 2 soutient que l'intégration de l'intelligence artificielle, en particulier des algorithmes d'optimisation (OPT), contribue à l'amélioration du management de la qualité dans les projets de construction. Cette amélioration se traduit par une planification plus rationnelle, une meilleure traduction des exigences du client, une prise de décision optimisée, et un équilibre accru entre les contraintes de coût, de qualité et de délai, impactant ainsi les trois processus : la planification, l'assurance qualité et le contrôle de la qualité.

L'OPT permet de structurer de manière plus rationnelle les étapes du projet, d'accroître la productivité des processus, d'optimiser l'utilisation des ressources (Abioye et al., 2021) et de faciliter une prise de décision éclairée basée sur la comparaison des différentes alternatives des indicateurs de performance (Chen et al., 2010). En outre, l'OPT aide à améliorer le processus de QP, en transformant les exigences du client en critères mesurables à travers des approches comme le QFD, ce qui facilite l'exécution de la qualité au processus QA (Wang et al., 2023). Enfin, les algorithmes d'optimisation permettent de mieux équilibrer entre coût,

durée et qualité, un enjeu central dans la gestion de projets (Akcay et İşikyıldız, 2020; Pham et Ngoc Q. K, 2025).

2.6.3 Cadre conceptuel final

Le cadre conceptuel illustré dans la figure 22 illustre le cadre conceptuel de l'impact du BIM et de l'OPT sur le management de la qualité dans les projets de construction. Deux propositions de recherche structurent ce modèle :

- P1 : Le BIM a un impact positif sur le QM.
- P2 : L'OPT a un impact positif sur le QM.

Ces deux technologies sont considérées comme des leviers stratégiques capables de renforcer les trois processus du management de la qualité, tels que définis dans le PMBOK 6e édition : QP, QA et QC.

Le modèle met en évidence que le BIM intervient notamment via ses composantes clés (CDE, BEP, modèle fédéré, etc.), qui facilitent la traçabilité des données, la coordination, la planification et la gestion de l'information qualité. De son côté, l'OPT, à travers des algorithmes tels heuristiques et métahéuristiques, influence la qualité en favorisant l'intégration des exigences qualité dans les métriques, la productivité des processus, la prise de décision éclairée et l'amélioration continue.

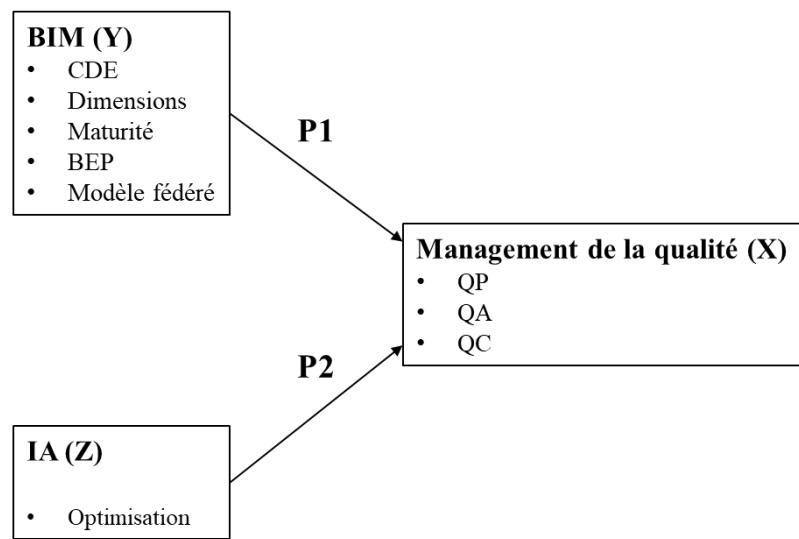


Figure 22 : Cadre conceptuel final, par l'auteur.

À l'issue de cette revue de la littérature, les bases conceptuelles et les propositions de recherche ont été établies. Le chapitre suivant présente la méthodologie adoptée pour vérifier ces propositions, en détaillant le positionnement épistémologique, le design de recherche et les démarches de collecte et d'analyse des données.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

« La recherche scientifique est un processus d’acquisition de connaissances fondée sur la collecte et l’analyse systématique de données empiriques en vue d’explorer, de décrire, d’expliquer, de prédire et de contrôler des phénomènes » (Fortin et Gagnon, 2022, p. 4).

« La plupart des manuels de recherche présentent la recherche comme un processus en plusieurs étapes que vous devez suivre pour entreprendre et mener à bien votre projet de recherche. Le nombre exact d’étapes varie, mais elles incluent généralement la formulation et la clarification d’un sujet, la revue de la littérature, la conception de la recherche, la collecte des données, l’analyse des données et la rédaction » (Saunders et al., 2012, p. 12).

Déterminer les approches et les procédures de recherche adéquates afin d’obtenir des résultats satisfaisants est crucial pour la majorité des chercheurs (Alturki, 2021). Dans les recherches du domaine des affaires et du management, la méthode de présentation de la méthodologie de recherche couramment utilisée est celle de l’oignon de recherche, proposée par Saunders et al. (2012). Cette méthode se compose de six couches principales, commençant par les philosophies de recherche, les approches de recherches, les choix méthodologiques, les stratégies, l’horizon de temps de la recherche et se terminant par les techniques et procédures, comme présentées dans la figure 23. La méthode de l’oignon de recherche a été retenue pour mener ce travail, et les aspects choisis de chaque couche seront présentés dans ce chapitre.

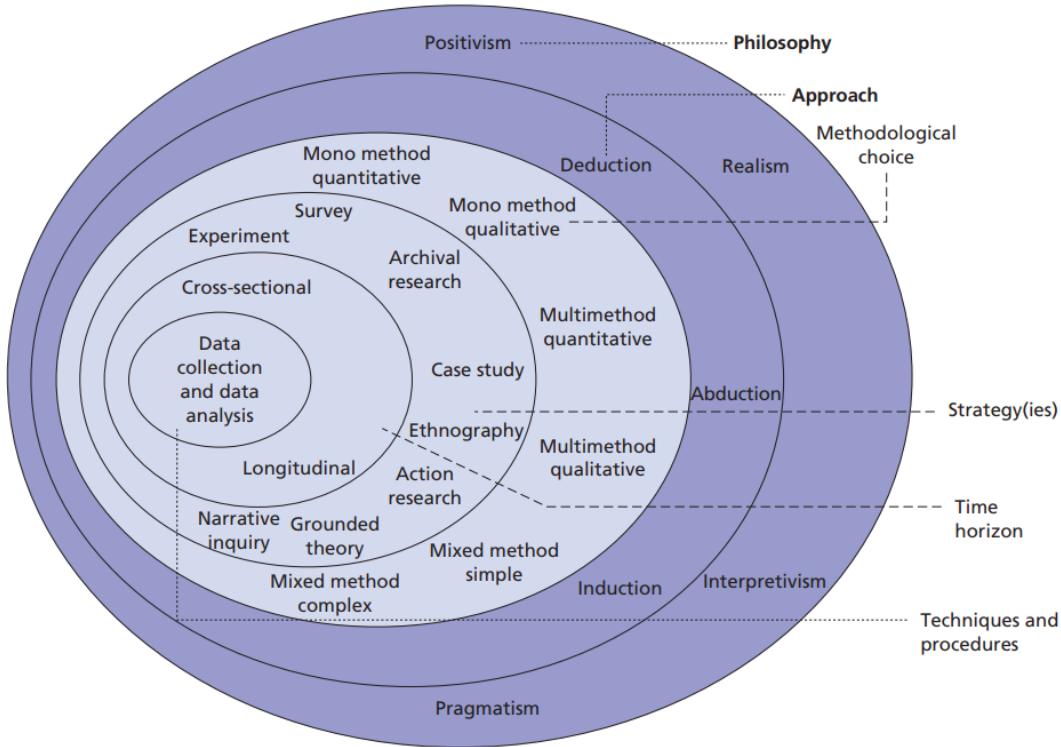


Figure 23. Les aspects choisis dans l'oignon de la recherche de Saunders et al. (2012).

3.1 POSITIONNEMENT DE LA RECHERCHE

Se lancer dans une recherche, c'est contribuer à l'enrichissement des connaissances dans un domaine spécifique. Cette contribution demeure importante, même lorsque l'approche n'est pas novatrice ou que l'objectif consiste simplement à résoudre un problème particulier (Saunders et al., 2012).

Ce travail est une recherche exploratoire et descriptive qui s'intéresse à présenter l'impact de l'utilisation du BIM (Y) sur le management de la qualité (X) au secteur de la construction, qui est un corpus du management de projet, ainsi que l'impact de l'intégration de l'IA (Z) sur le même corpus (X). Cette recherche adopte une **philosophie pragmatique**, centrée sur la production de connaissances utiles, l'obtention de résultats concrets et l'action, plutôt que sur la recherche d'une vérité absolue ou la représentation fidèle de la réalité (Demeestère, 2005). Cette approche offre une flexibilité méthodologique, permettant de

combiner, au besoin, différentes méthodes dans une même étude (Saunders et al., 2012). Toutefois, les pragmatistes ne privilégient pas nécessairement la multiplicité des méthodes, mais choisissent celles qui garantissent la collecte de données crédibles et pertinentes, contribuant ainsi à l'avancement des connaissances (Kelemen et Rumens, 2008, cité dans Saunders et al., 2012).

3.2 LITTÉRATURES MOBILISÉES

La rédaction de cette recherche repose sur la mobilisation de plusieurs notions afin d'examiner les relations entre trois variables principales : le management de la qualité (X), le BIM (Y) et l'IA (Z).

La variable de management de la qualité (X) est analysée à travers la notion de la qualité, le cadre théorique du management de la qualité représentée par la norme ISO 9000:2015 ainsi que le processus de management de la qualité. La compréhension du BIM (Y) repose sur l'exploration de ses différents aspects clés, les CDE, les dimensions (4D, 5D, etc.), la maturité du BIM, le BEP, le modèle fédéré, et des utilisations du BIM par phase de projet. Quant à l'intelligence artificielle (Z), elle est appréhendée à travers la définition de l'IA, son évolution et ses sous-domaines, en particulier l'OPT, qui fait l'objet de cette étude.

Cette mobilisation de la littérature permet d'étudier en profondeur l'impact du BIM et de l'IA sur le management de la qualité des projets de la construction.

3.3 NIVEAU D'ANALYSE ET UNITÉ D'ANALYSE

Le niveau d'analyse fait référence à l'échelle à laquelle les phénomènes sont observés et étudiés. Dans cette recherche, le niveau d'analyse porte sur **la gestion des projets de construction**, considérée comme un cadre intégrateur où interagissent les dimensions techniques, organisationnelles et humaines. Ce niveau permet d'examiner comment l'utilisation de technologies émergentes, telles que le BIM et l'IA, influence les pratiques de management de la qualité dans le contexte global de la gestion de projet.

L’unité d’analyse correspond à l’élément spécifique sur lequel se focalise l’étude pour examiner en détail les effets des variables. Dans ce cas, l’unité d’analyse est **le processus de management de la qualité** au sein des projets de construction de bâtiments utilisant des technologies comme le BIM et l’IA.

3.4 L’APPROCHE DE RECHERCHE

L’approche de recherche suivie est l’**induction**, qui consiste à développer une théorie permettant d’élaborer des propositions ensuite soumises à un test rigoureux (Saunders et al., 2012). Dans cette recherche, un cadre théorique est construit à partir d’une revue de littérature, servant à générer des propositions qui sont testées par une stratégie de recherche (section 3.6). Si la théorie n’est pas cohérente avec les résultats, elle doit être rejetée ou modifiée ; si elle est cohérente, elle est alors confirmée, comme l’explique Blaikie (2010).

3.5 LE DESIGN DE RECHERCHE ENVISAGÉ

Le design de recherche définit le plan général pour répondre aux questions de recherche, avec des objectifs clairs, des sources de données identifiées, des méthodes de collecte et d’analyse précises, tout en tenant compte des questions éthiques et des contraintes potentielles, tel que l’accès aux données (Saunders et al., 2012).

Il existe trois méthodologies, qualitative, quantitative et mixte. Le choix entre ces méthodes dépend de la nature de la question de recherche ainsi des objectifs de recherche. Le terme « quantitatif » est souvent utilisé pour toute technique de collecte de données qui génère ou utilise des données numériques. De l’autre côté, le terme « qualitatif » est utilisé comme synonyme pour toute technique de collecte de données qui génère ou utilise des données non numériques (Saunders et al., 2012). De nombreux chercheurs combinent les deux méthodes en suivant une méthode mixte. Dans cette recherche, **une mono méthode qualitative** est envisagée.

Selon Vizcarguenaga-Aguirre et López-robles (2020), l’utilisation des approches mono méthodes est prédominante dans les recherches en management de projet, **particulièrement**

la mono méthode qualitative. La méthode qualitative est utilisée généralement avec la philosophie interprétative (Denzin et Lincoln, 2005), comme elle peut être utilisée avec la philosophie réaliste, la philosophie positiviste et la philosophie pragmatique (Saunders et al., 2012).

3.6 LA STRATÉGIE DE RECHERCHE ENVISAGÉE

Saunders et al. (2012) indique que plusieurs stratégies sont utilisées aux recherches de management du projet, comme l'étude de cas, l'enquête, l'ethnographie, la recherche-action, la recherche archiviste, la théorisation ancrée et l'expérimentation. Le choix de la stratégie de recherche dépend des objectifs de recherche, des connaissances existantes, du temps disponible et des ressources disponibles (Vizcarguenaga-Aguirre et López-robles, 2020).

Vizcarguenaga-Aguirre et López-robles (2020) ont préparé une étude descriptive concernant les méthodes et stratégies de recherche utilisées aux articles du journal *International Journal of Project Management* (IJPM), ils ont conclu que l'utilisation de l'étude de cas représente 38 % des stratégies utilisées dans 142 articles publiés en 2018 et 2019, suivi de la stratégie des enquêtes qui représente 22 %, comme présentée dans la figure 24.

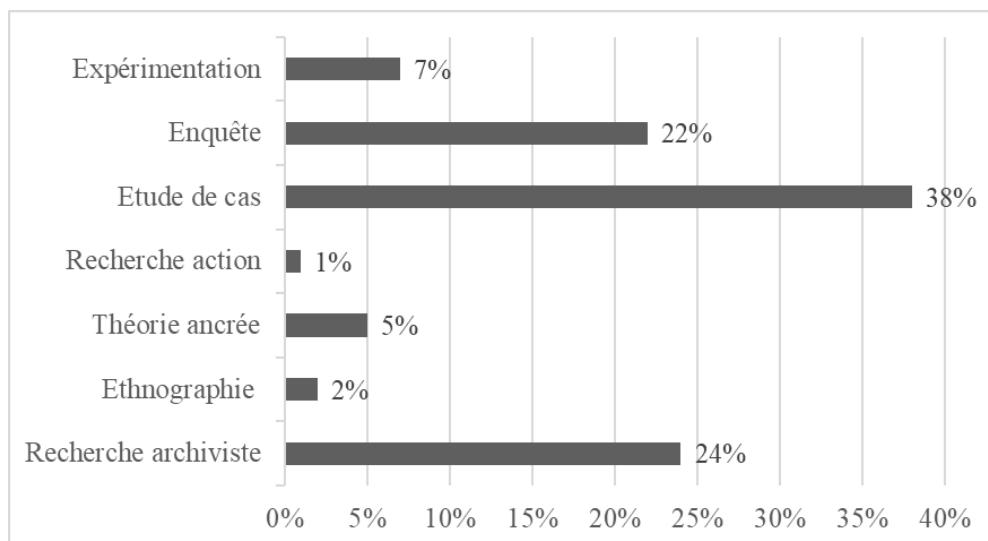


Figure 24. Utilisation des stratégies de recherche dans l'IJPM en 2018 et 2019 (Vizcarguenaga-Aguirre et López-robles, 2020), modifié.

Selon Yin et al. (2018), l'étude de cas consiste à investiguer un phénomène précis dans son contexte réel. Elle est la plus couramment utilisée, car elle est accessible et souvent plus pertinente pour les parties prenantes, en raison de l'observation directe des entités impliquées (Vizcarguenaga-Aguirre et López-robles, 2020). L'étude de cas sera appropriée aux études exploratoires (Saunders et al., 2012) pour obtenir une compréhension approfondie du contexte de recherche et des processus en action (Eisenhardt et Graebner, 2007), vu qu'elle a la capacité à répondre aux questions, quoi ? pourquoi ? et comment ? (Saunders et al., 2012). Dans les recherches de management, les études de cas peuvent servir trois objectifs : générer des théories, tester des théories et mener des recherches appliquées (Dźwigoł, 2018, cité dans Dźwigoł, 2023).

Dans cette recherche, **l'étude de cas** est choisie pour vérifier les propositions développées à la section 2.6, en raison des avantages qu'elle offre et du temps disponible pour mener l'étude. Cette méthode permet d'examiner les impacts du BIM et de l'IA dans un contexte réel, en s'appuyant sur des données issues d'expériences concrètes. La littérature actuelle ne discute pas suffisamment les effets de BIM sur le management de la qualité en lien avec le PMBOK et l'ISO 9001: 2015. Quant à l'IA, et plus particulièrement l'OPT, demeure une technologie émergente encore peu explorée dans le domaine du management de la qualité des projets de construction.

3.7 L'HORIZON DE TEMPS DE LA RECHERCHE

L'horizon de temps désigne la période sur laquelle la recherche est menée. Dans cette étude, l'horizon est **transversal**, car elle vise à répondre à une question de recherche à un moment donné, en s'appuyant sur une stratégie telle que l'étude de cas, comme expliqué par Saunders et Tosey (2013). Par ailleurs, cette recherche s'inscrit dans le cadre du programme de maîtrise en gestion de projet, en tant qu'exigence partielle à l'obtention du grade de maître ès sciences, ce qui justifie sa durée limitée.

3.8 TECHNIQUES DE COLLECTE DES DONNÉES

Les techniques de collecte de données permettent d'obtenir les informations nécessaires à l'atteinte des objectifs fixés (Opoku et al., 2016). Pour répondre aux questions de cette recherche, dans une première étape, une revue de littérature est préparée au chapitre 2, elle permet d'explorer ce qu'il était déjà écrit à propos du management de la qualité, du BIM et de l'OPT, ainsi l'impact de ses deux derniers sur le management de la qualité aux projets de la construction. Son objectif est de clarifier les variables clés et les relations entre eux en explorant les travaux déjà faits.

La deuxième étape vise à vérifier les propositions de recherche à travers des études de cas. Ces dernières peuvent mobiliser différentes techniques de collecte et d'analyse de données, telles que l'entrevue, l'observation, l'analyse documentaire ou encore les questionnaires (Saunders et al., 2012). Dans cette optique, plusieurs auteurs, dont Saunders et al. (2012); Smith (2018); Stake (2003); Yin et al. (2018), insistent sur l'importance de recourir à des sources multiples, la triangulation des données permettant de renforcer la crédibilité et la validité des résultats.

Dans cette recherche, la technique de collecte des données est l'analyse documentaire, en utilisant des données secondaires disponibles en ligne, tel que des articles scientifiques, des blogues spécialisés, des vidéos, des webinaires, des rapports d'entreprises et des rapports gouvernementaux.

3.9 PROCESSUS DE SÉLECTION DES ÉTUDES DE CAS

Dans cette section, le processus de l'étude de cas sera discuté tout en choisissant le type de l'étude de cas, les critères de choix et les étapes.

3.9.1 Les stratégies de l'étude de cas

Yin et al. (2018) identifient quatre types d'études de cas à partir d'une matrice 2×2 . Le premier axe distingue les études de cas uniques des études de cas multiples, selon qu'une seule ou plusieurs unités sont examinées. Le second axe, qui se combine au premier, différencie les études de cas holistiques, centrées sur une seule unité d'analyse globale, des études de cas intégrées, qui comportent plusieurs sous-unités d'analyse à l'intérieur d'un même cas. En croisant ces deux axes, quatre configurations sont possibles : l'étude de cas unique holistique, l'étude de cas unique intégrée, l'étude de cas multiple holistique et l'étude de cas multiple intégrée.

Les chercheurs optent généralement pour une étude de cas unique lorsqu'ils souhaitent examiner un cas typique, particulier ou extrême, permettant d'observer un phénomène rarement étudié (Saunders et al., 2012). En revanche, les études de cas multiples sont souvent considérées comme plus robustes, car elles offrent une meilleure base de comparaison et renforcent la validité externe des résultats (Yin et al., 2018).

Par ailleurs, une étude de cas holistique se concentre sur une seule unité d'analyse globale, le cas étant examiné dans son ensemble, tandis qu'une étude de cas intégrée décompose le cas en plusieurs sous-unités d'analyse afin d'en explorer la complexité interne (Yin et al., 2018).

Dans le cadre de cette recherche, une **stratégie d'études de cas multiples intégrées** est adoptée. Cette combinaison permet à la fois d'analyser plusieurs cas et d'examiner, au sein de chacun, différentes dimensions liées au management de la qualité. Chaque étude de cas vise à vérifier une proposition spécifique du cadre théorique (figure 22) : la première

porte sur le BIM et permet de vérifier la proposition 1, tandis que la seconde, centrée sur l'IA, permet de vérifier la proposition 2

3.9.2 Les critères de sélection des études de cas assurant la qualité de la recherche

Le choix des études de cas s'établit sur des critères clairs, qui permettent de garantir une analyse rigoureuse et la qualité des résultats de la recherche, ces critères sont :

- Pertinence du cas : Il s'agit de choisir des projets de construction dans lequel le BIM et l'OPT ont été utilisé concrètement.
- Lien avec le management de la qualité : Les cas retenus doivent être en lien avec la gestion de projet, et plus précisément avec la gestion de la qualité, afin de bien cerner l'impact du BIM et de l'OPT sur ce processus.
- Richesse du contexte : Le cas doit fournir un niveau d'information suffisant pour comprendre les dynamiques liées au management de la qualité, au BIM et à l'OPT, et pour situer les observations par rapport aux connaissances issues de la littérature.
- Disponibilité des ressources pour l'analyse : Prendre en compte le temps, les moyens humains et techniques pour mener l'étude de cas de manière complète et rigoureuse.
- Accessibilité aux données : Le cas sélectionné doit permettre un accès suffisant aux informations nécessaires pour une analyse approfondie.

3.10 PROCESSUS DE L'ÉTUDE DE CAS ET DE L'ANALYSE DES DONNÉES

L'étude de cas effectuée suivra le processus présenté dans la Figure 25.

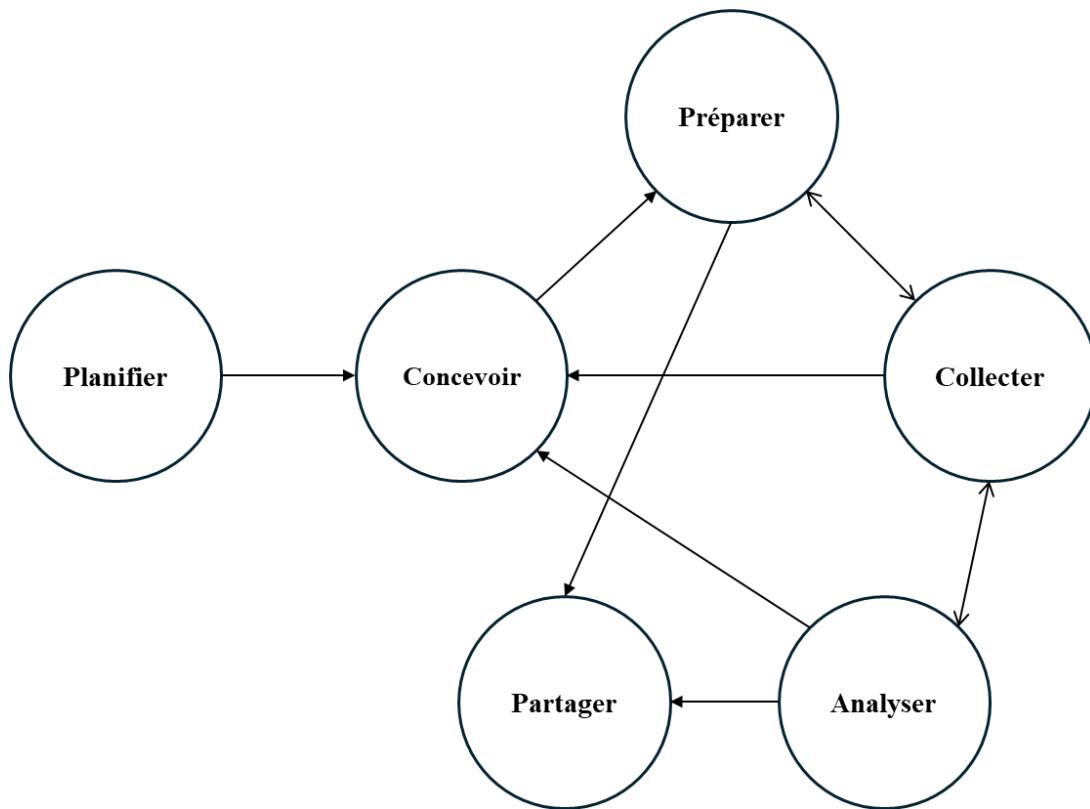


Figure 25. Les étapes de l'étude de cas selon Yin et al. (2018), modifié.

Les étapes d'une étude de cas suivent une logique séquentielle, mais demeurent itératives (Yin et al., 2018), ce qui signifie qu'il est possible de revenir sur certaines étapes pour améliorer la rigueur du processus. L'étape de planification consiste à définir l'objectif de l'étude, à préciser la problématique et à justifier la pertinence de la stratégie de cas. L'étape de conception vise à élaborer la stratégie de recherche, notamment en définissant les unités d'analyse, les critères de sélection des cas et les sources de données. L'étape de préparation concerne l'organisation de la collecte des données, suivie par l'étape de collecte, qui s'appuie sur différentes sources secondaires, telles que des articles scientifiques, des rapports techniques et institutionnels, des webinaires, des blogues

spécialisés et des documents professionnels. L'étape d'analyse s'appuie sur une approche qualitative thématique basée sur le cadre conceptuel de la recherche et présentée au chapitre 2.

Les documents collectés ont été classés et renommés selon leur nature (scientifique, technique ou institutionnelle) et leur lien avec les trois variables principales : le management de la qualité, le BIM et l'OPT. Chaque document a été lu attentivement, et les extraits pertinents ont été surlignés puis transférés dans un tableau afin de regrouper les informations selon trois catégories correspondant aux processus du management de la qualité définis par le PMBOK: la QP, la QA et QC. Les extraits ont ensuite été codés manuellement selon des thèmes récurrents identifiés à partir du cadre théorique, tels que la traçabilité des données, la collaboration, l'amélioration continue, la réduction des défauts, la productivité ou la prise de décision fondée sur les faits.

L'outil Microsoft Excel a été utilisé pour organiser ces extraits, créer une grille de correspondance entre les catégories et documenter les sources associées, assurant ainsi la traçabilité du traitement des données. Enfin, une triangulation documentaire a été réalisée afin de comparer les constats issus des différentes sources. Les informations convergentes ont été considérées comme des constats validés, tandis que les divergences ont été analysées pour apporter des nuances contextuelles.

L'ensemble des résultats a ensuite été colligé dans des tableaux de synthèse, servant de base à la présentation et à la discussion des résultats dans le chapitre 4. Ce processus a permis d'assurer la crédibilité, la transparence et la reproductibilité de l'analyse documentaire menée dans le cadre de cette recherche.

3.11 LA VALIDITÉ ET LA FIABILITÉ DE LA RECHERCHE

La validité et la fiabilité de la recherche ont été prises en considération afin d'assurer la rigueur scientifique de la démarche. La validité du construit a été renforcée en mobilisant une analyse documentaire structurée et deux études de cas permettant de couvrir différentes perspectives liées au QM, au BIM et à l'IA. La validité interne repose sur une triangulation systématique entre les données issues de la littérature scientifique et celles tirées des études de cas, ce qui a permis de vérifier la cohérence entre le cadre conceptuel et les constats empiriques, ainsi que d'identifier des relations crédibles entre les outils numériques et les dimensions de la qualité. La validité externe est soutenue par la sélection de cas provenant de contextes contrastés, favorisant l'identification d'éléments transférables à d'autres projets similaires, même si le nombre restreint de cas limite la généralisation des résultats. Enfin, la fiabilité a été assurée par une démarche analytique cohérente et systématique, reposant sur une classification logique des données selon les thématiques étudiées comme le QP, QA et QC, ce qui contribue à garantir la traçabilité et la reproductibilité de l'analyse.

3.12 RÉCAPITULATIF DE LA MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

La figure 26 présente une récapitulation de la méthodologie de recherche suivie dans ce mémoire.

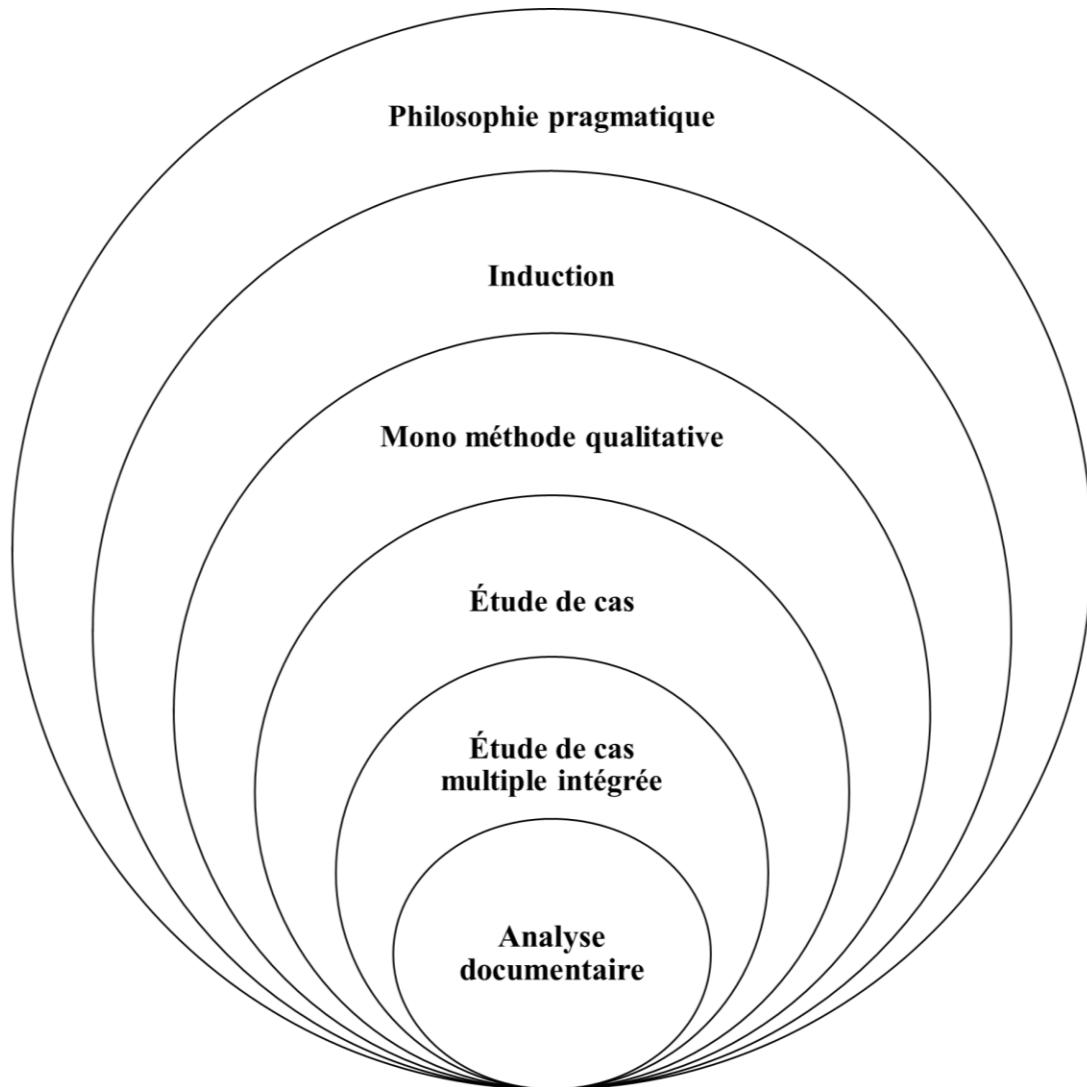


Figure 26. Récapitulation de la méthodologie de recherche suivie, par l'auteur.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans ce chapitre, les résultats des deux études de cas sélectionnées sont présentés et discutés afin de vérifier les propositions du cadre théorique de la recherche concernant l'impact du BIM et de l'IA sur le management de la qualité dans les projets de la construction. Cette analyse empirique permet de valider ou non les relations théoriques identifiées entre les variables étudiées et d'apporter des évidences pratiques à l'appui du cadre conceptuel développé. Ce chapitre est composé de deux sections, chacune discute le contexte de l'étude de cas sélectionnée, les données collectées, les observations et les résultats de l'analyse. Le tableau 12 donne une vue globale sur les études de cas présentées et la proposition théorique visée.

Tableau 12 : Études de cas présentées.

| | La proposition de recherche visée | Les technologies utilisées |
|-----------------------|--|--|
| Étude de cas 1 | Proposition 1 | <ul style="list-style-type: none">• BIM |
| Étude de cas 2 | Proposition 2 | <ul style="list-style-type: none">• Intelligence artificielle- Les algorithmes d'optimisation |

Source : Par l'auteur

4.1 L'ÉTUDE DE CAS DE LA PROPOSITION 1, IMPACT DU BIM SUR LE MANAGEMENT DE LA QUALITÉ

Dans le cadre de cette étude, la première proposition présentée dans la section 2.6, repose sur l'impact de l'intégration du BIM dans la gestion des projets de construction sur le management de la qualité. La proposition 1 soutient que le BIM, grâce à l'ensemble de ses aspects clés, améliore le QM en influençant les trois processus que sont la planification, l'assurance et le contrôle de la qualité. Il renforce la collaboration, la coordination, la traçabilité et la productivité, tout en facilitant une prise de décision plus efficace. Cette

contribution appuie également la mise en pratique des principes de la norme ISO 9001: 2015 dans les projets de construction.

4.1.1 Présentation de l'étude de cas : le futur siège de Fidelidade à Lisbonne, Portugal

Le projet choisi pour effectuer cette étude de cas est l'un des plus grands développements immobiliers de la ville de Lisbonne, appelé l'Opération intégrée d'Entrecampos, ou *Operação Integrada d'Entrecampos*, situé sur les terrains de l'ancienne Foire Populaire (Lima et al., 2024). Ce projet de développement à usage mixte accueillera le nouveau siège de *Fidelidade Property*, une société de gestion d'actifs majeurs opérant dans le secteur de l'assurance au Portugal. Selon les chiffres diffusés par le Conseil Municipal de Lisbonne (2018b), le coût du projet est estimé à 62 931 100 €, la surface au sol construite est d'environ 70 000 m² (Lima et al., 2024). La surface totale de développement inclus les planchers est d'environ 293 000 m² (Lima et al., 2024; Plannerly, 2022). Le projet est réparti sur cinq parcelles qui regroupent des logements, des services, des commerces et des stationnements (Câmara municipal de Lisboa, 2018a). La figure 27 présente les différentes parcelles du projet, et le tableau 13 présente l'usage et les surfaces construites des planchers des parcelles, ce qui nous donne une idée sur la grandeur de ce projet.

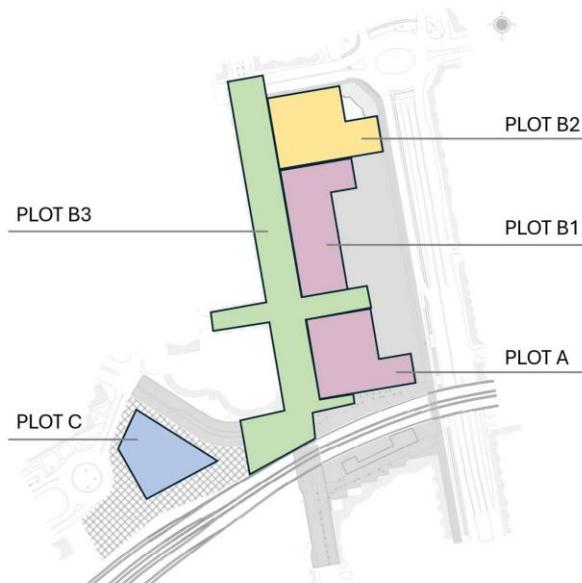


Figure 27. Répartition des parcelles du projet (Hilgemberg, 2024).

Tableau 13 : Surfaces et usages des parcelles du projet.

| Parcelle | Usage | Surface construite des planchers |
|--------------|--|--------------------------------------|
| A | Commerce, services et stationnements | Environ 74 600 m ² |
| B1 | Commerce, services et stationnements | Environ 79 000 m ² |
| B2 | Commerce, logements et stationnements | Environ 62 400 m ² |
| B3 | Infrastructures techniques et de soutien à la logistique urbaine et stationnement public | Environ 18 000 m ² |
| C | Commerce, services et stationnement | Environ 59 000 m ² |
| Total | | Environ 293 000 m² |

Source : Par l'auteur à partir de Lima et al. (2024).

Le choix de ce projet est justifié par sa complexité managériale et technique, ainsi que par l'intégration du BIM dans sa gestion. Il s'agit également d'un projet reconnu à l'échelle internationale, ayant remporté un *MIPIM Award 2025*, décerné par l'organisation française : le Marché International des Professionnels de l'Immobilier (MIPIM), ce qui témoigne de la qualité globale de sa conception et de sa réalisation. Les informations présentées dans cette étude de cas est le fruit d'une analyse documentaire des données secondaires en utilisant des fichiers diffusés en ligne (la liste des documents utilisés est présentée à l'Appendice 1) par les consultants BIM de la firme chargée du management de projet *Limsen Consulting*, des rapports de l'assemblée municipale de la ville ainsi qu'un webinaire organisé par *Plannerly*, une entreprise qui a lancé une plateforme de gestion BIM qui était utilisé dans ce projet.

4.1.2 Méthode et résultat de l'utilisation du BIM dans ce projet

Les informations utilisées dans cette étude de cas proviennent des sources documentaires identifiées et analysées selon le processus décrit à la section 3.10. Celui-ci comprend la classification, le codage thématique et la triangulation des données issues de documents scientifiques, techniques et institutionnels, afin d'assurer la crédibilité et la reproductibilité de l'analyse. Sur cette base méthodologique, cette section présente la méthode d'utilisation du BIM ainsi que les principaux résultats liés à sa mise en œuvre dans le projet étudié et à ses effets sur le management de la qualité.

Le BIM a été choisi comme étant la méthode idéale pour relever les défis de ce projet, comme l'indique Lima et al. (2024) :

« Très tôt, tous les décideurs (Maître d’Ouvrage, Promoteur, Gestion de Projet) ont identifié le BIM comme la méthodologie appropriée pour un projet de cette dimension et complexité. Bien que les exigences spécifiques n'aient été définies que durant la phase d’Étude Préliminaire, tous les contrats signés avec les concepteurs intégraient déjà des clauses BIM à large portée ». (Lima et al., 2024)

Le degré de maturité du BIM et sa dimension dans ce projet ont été discutés depuis le début, l'approche retenue a consisté d'aller jusqu'à BIM 5D et au niveau 2 de la maturité (collaboration orientée modèle), afin de tirer des bénéfices dans la révision de la conception, la détection des conflits, la coordination 3D, la quantification 5D et la modélisation du bâtiment tel que construit (Lima et al., 2024).

4.1.2.1 L'environnement de données commun (CDE)

Le partage de l'information s'est appuyé sur le CDE, mis en place avec la plateforme Autodesk BIM 360. Ce CDE a joué un rôle central en permettant à chaque intervenant d'accéder aux données dont il avait besoin, en temps réel, tout en respectant les principes de la norme ISO 19650. La figure 28 représente une illustration du CDE de ce projet.

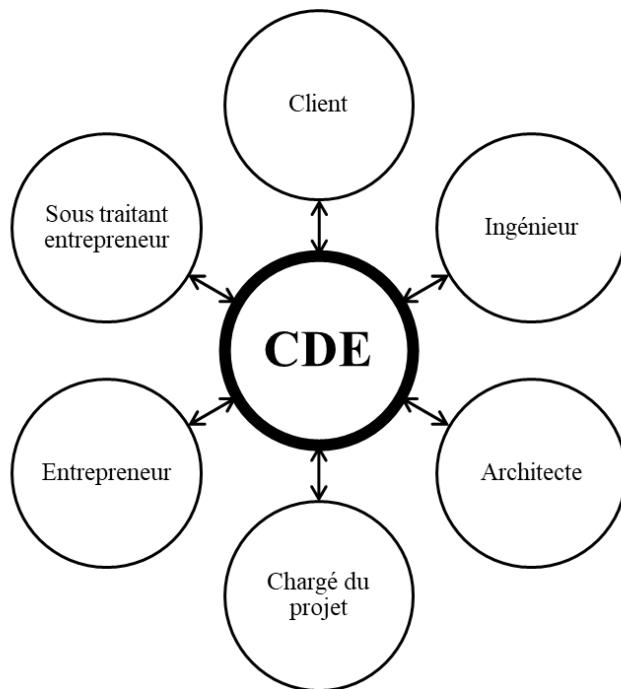


Figure 28. Illustration de CDE, par l'auteur.

Le CDE a amélioré la traçabilité des données dans ce projet, aucune perte de données pendant la transition entre les phases n'a été déclarée. En outre, le CDE a facilité la circulation de l'information entre les parties prenantes. Les tâches ont été réalisées simultanément par différents collaborateurs situés au Portugal et au Royaume-Uni, qui les approuvent et les partagent ensuite avec les autres membres afin de recueillir des suggestions et des commentaires sur une même interface. Cette opération est faite sous le contrôle de l'équipe de gestion de projet qui échange avec les parties prenantes pour convenir des ajustements et des modifications nécessaires. Après la vérification, une tâche peut être rejetée, puis corriger les erreurs en fonctions des commentaires reçus. Si la tâche est conforme au BEP, aux normes et aux exigences du client, elle est approuvée pour publication. La figure 29 présente une illustration du processus de partage des informations suivi dans le CDE conformément à la norme ISO 19650:2018. La Figure A2. 1 et la Figure A2. 2 (voir l'annexe 2) représentent des exemples des commentaires et des tâches partagées après l'approbation.

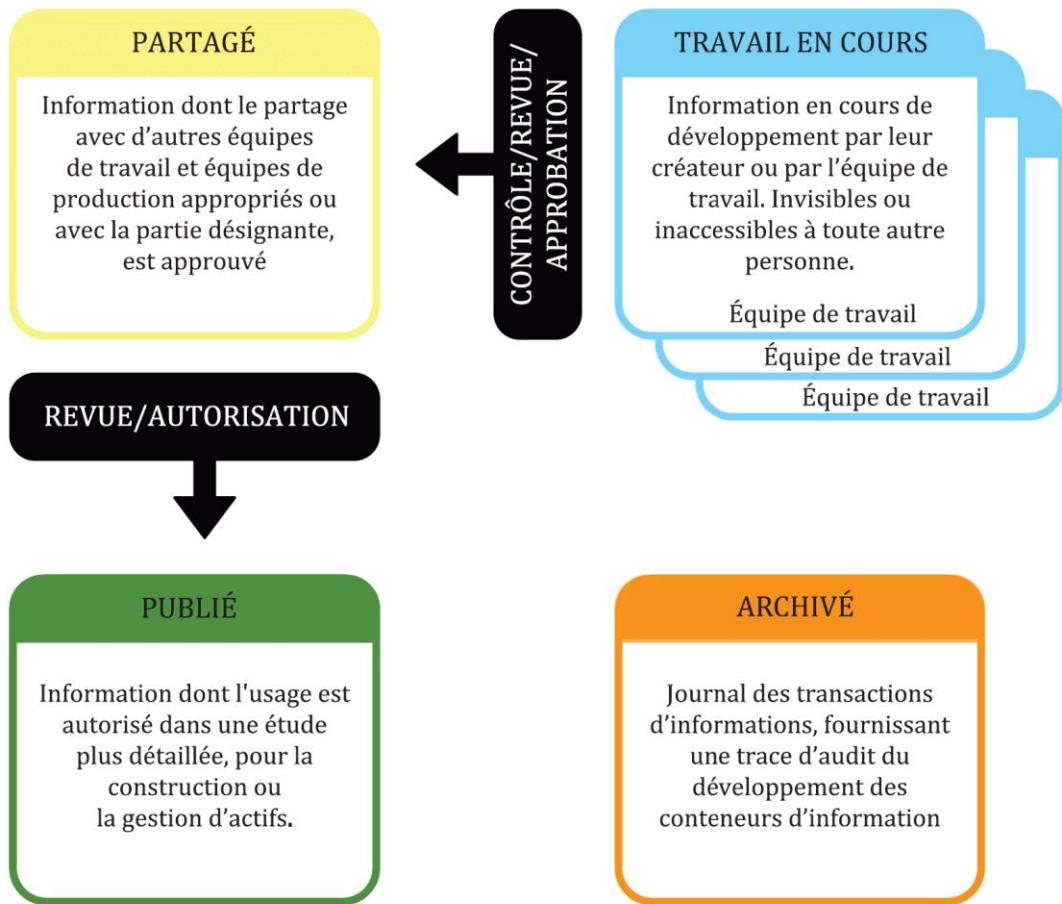


Figure 29. Illustration du processus de partage des informations suivi dans le CDE (Bernard, 2024).

4.1.2.2 Le plan d'exécution BIM (BEP)

Le BEP de ce projet a été élaboré sur *Plannerly*, cette plateforme permet d'annoter en ligne et d'enregistrer les commentaires qui sont accessibles à tous les intervenants (Lima et al., 2024). Plusieurs autres logiciels ont été utilisés, Autodesk BIM 360, Navisworks, Revit, Recap Pro, Enscape, Power Query, Bit2Brick (Roux et Lima, 2022).

La 6^e édition du PMBOK (PMI, 2016) indique que les actifs organisationnels font partie des documents de référence mobilisés dans les processus de management de la qualité. Dans le cadre de ce projet, le BEP est considéré comme un actif organisationnel structurant

l'utilisation du BIM afin de soutenir la mise en œuvre de la politique de qualité. Selon Roux et Lima (2022), ce plan avait pour objectifs de :

- Cordonner un projet de construction à travers un modèle.
- Minimiser et résoudre les conflits sur le terrain, ce qui entraîne une réduction significative des RFIs.
- Visualiser la construction
- Augmenter la productivité dans toutes les phases
- Diminuer les coûts de la construction ainsi que les coûts de retravailler.
- Diminuer les délais
- Des plans tels que construits plus précis

4.1.2.3 Le modèle fédéré

L'utilisation du BIM a été remarquable dans ce projet. Un ensemble de 45 modèles 3D de diverses disciplines, dont 22 pour le futur bâtiment, a été intégré dans un modèle fédéré collaboratif contribuant à réduire le temps de conception, à coordonner efficacement les tâches et à obtenir des réponses rapides aux RFIs (Plannerly, 2022) comme représenté dans la figure 30. Ce modèle fédéré, qui a été partagé dans le CDE avec un accès pour tous les professionnels, a permis la collaboration et la coordination entre 50 parties prenantes, comprenant 8 firmes d'architecture, 8 firmes d'ingénierie et 2 firmes de gestion de projet, totalisant 243 travailleurs, localisés au Portugal et au Royaume-Uni (Roux et Lima, 2022).

Les consultants de *Limsen* ajoutent dans un webinaire que :

« Le modèle fédéré, qui regroupe l'ensemble des 45 modèles actuellement en cours, représente une composante centrale du projet. Environ 80 % de ces modèles sont travaillés en temps réel par les concepteurs, comme s'ils œuvraient sur le même serveur, grâce à BIM 360 Collaborate Pro. Cette plateforme a considérablement amélioré la coordination et la gestion du projet, bien qu'elle représente également un grand défi technique et organisationnel. Quoi qu'il en soit, le système fonctionne très bien. Comme mentionné précédemment, la coordination en 3D constitue l'un des usages BIM les plus importants sur ce projet » (Plannerly, 2022, p. 15:07).

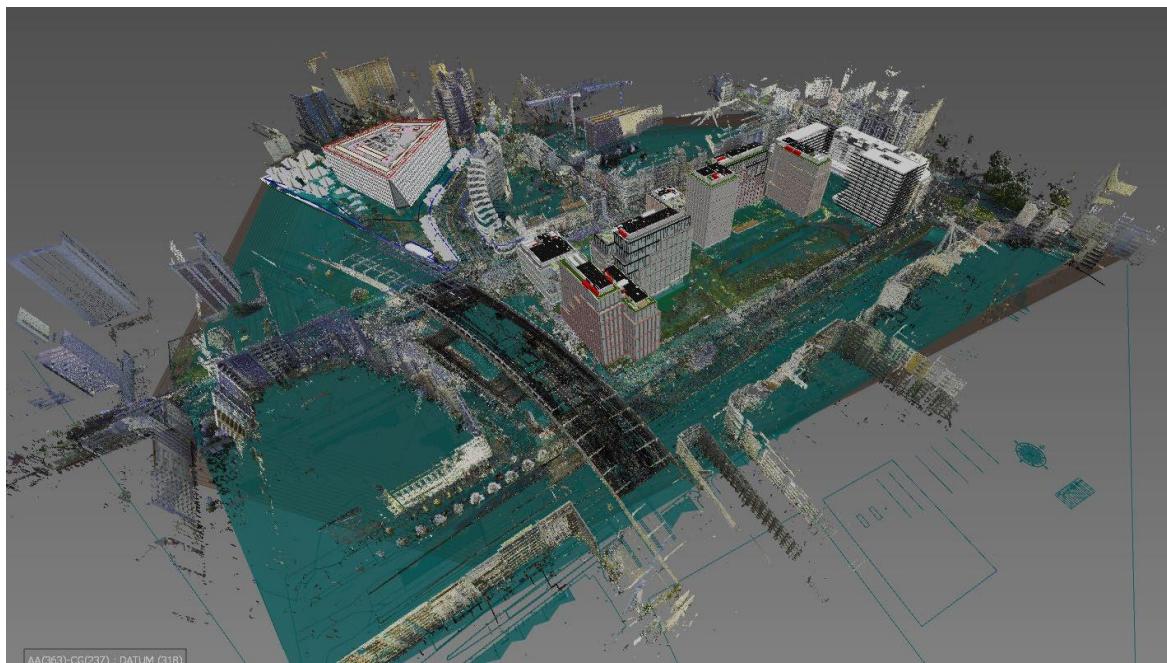


Figure 30. Le modèle collaboratif du projet (Roux et Lima, 2022).

a) LA DÉTECTION DES INCOHÉRENCES PENDANT LA PHASE DE CONCEPTION

La détection des incohérences s'est opérée de manière continue en utilisant un logiciel spécialisé qui compare les problèmes et les erreurs sur le terrain avec le modèle fédéré.

Cette opération est faite en deux niveaux. Le premier niveau représente la détection des incohérences de point de vue architectural, entre les éléments de la conception architecturale et les éléments des autres spécialités, incluant la structure. Le deuxième représente la détection des incohérences structurelles avec les éléments du reste des spécialités, selon une tolérance de 0,02 m (Roux et Lima, 2022). La figure 31 représente les deux niveaux de détection des incohérences.

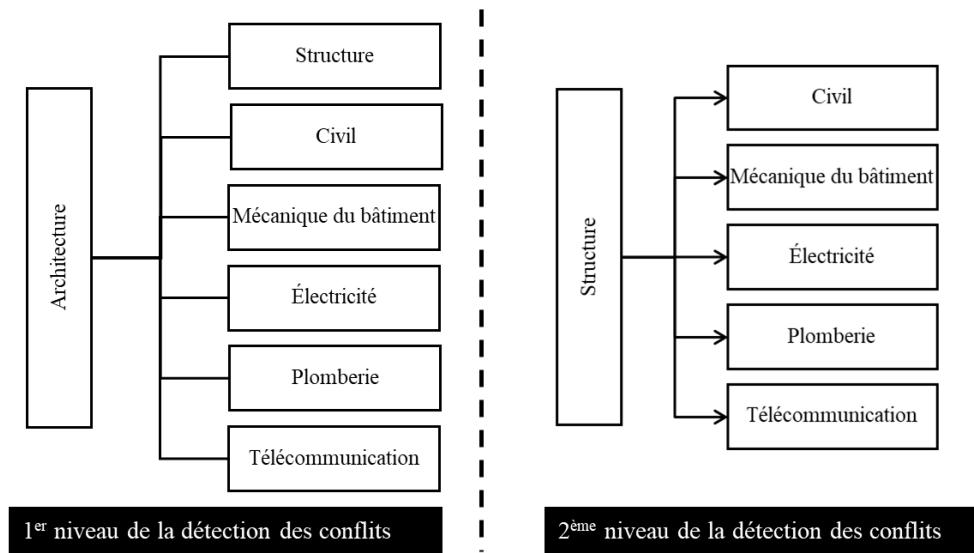


Figure 31 : Niveaux de la détection des conflits, par l'auteur.

Les vérifications des incohérences sont faites aussi bien pendant la conception qu'en phase de construction. Des réunions de coordination avaient lieu toutes les deux semaines pour traiter les problèmes identifiés, qui étaient ensuite suivis sur le CDE sous forme d'issues attribuées aux équipes concernées pour la correction (Lima et al., 2024). La Figure A2. 3 (voir l'annexe 2) présente un exemple de l'attribution des incohérences aux équipes pour correction.

Grâce à un effort collectif de trois ans, et lors du processus de QC, l'équipe a pu identifier et corriger environ 1 300 incohérences à toutes les étapes de la conception. Parmi celles-ci, 500 problèmes non résolus dans la parcelle C (figure 27), analysés et classés par ordre de gravité. Ces incohérences concernent des situations qui, dans le cadre des méthodes de coordination traditionnelles, seraient difficiles à repérer, car elles ne sont pas aisément perceptibles dans les plans ou les sections isolés, et encore moins dans les plans combinés de différentes disciplines (Hilgemberg, 2024). Un calendrier de coordination intense a été créé par spécialité pour les résoudre (Lima et al., 2024). Les consultants de *Limsen* ajoutent que :

« Je voudrais également présenter un exemple de rapport d'économies potentielles que nous avons réalisé à la fin de la phase de conception détaillée. Nous avons identifié 500 situations problématiques. Pour chacune d'elles, nous avons attribué une note de gravité allant de 0 à 3, selon leur importance. En multipliant ces situations par le temps estimé de résolution pour chaque type de classe, nous avons calculé qu'elles pourraient représenter 1 600 jours de retard sur un chantier. Bien sûr, certaines de ces situations peuvent être résolues simultanément (par exemple, cinq à la fois), mais cela signifierait tout de même près d'un an de retard sur l'ensemble du projet. Ce calcul permet d'estimer une économie potentielle d'environ 4 millions d'euros, rien que pour une seule des parcelles du projet » (Plannerly, 2022, p. 25:38).

L'intégration du BIM dans ce projet a permis la détection des centaines de conflits dans chaque discipline pendant la conception, comme représentée dans la figure 32 tout au long du cycle de la conception. Les incohérences détectées sont divisées en 4 types selon la complexité et la durée nécessaire pour les résoudre, comme l'explique le tableau 14. Des exemples des incohérences détectées entre différentes disciplines pendant la phase de la conception sont présentés dans la Figure A2. 4, Figure A2. 5 et la Figure A2. 6 (voir l'annexe 2).

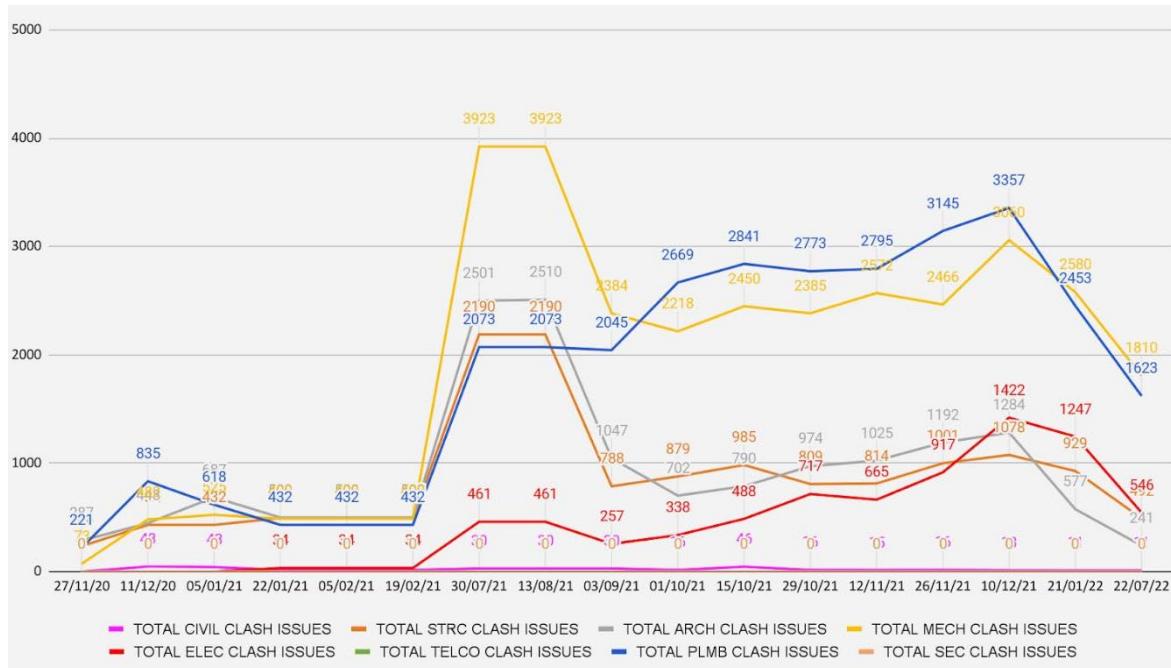


Figure 32. Nombre des conflits détectés par discipline dans le temps (Roux et Lima, 2022).

Tableau 14 : Estimation des optimisations de coût et délai faites après la détection et la résolution des incohérences.

| | Nombre des incohérences analysées | L'optimisation dans le calendrier du projet (par jour) | Estimation des économies faites après la résolution des conflits |
|---------------------------|-----------------------------------|--|--|
| Incohérence type 0 | 129 | 0 | 0,00 € |
| Incohérence type 1 | 228 | 92 | 1 185 600 € |
| Incohérence type 2 | 71 | 71 | 923 000 € |
| Incohérence type 3 | 85 | 170 | 2 210 000 € |
| Total | 513 | 333 | 4 318 600 € |

Source : (Roux et Lima, 2022), modifié.

b) LA DÉTECTION DES INCOHÉRENCES PENDANT LA PHASE DE LA CONSTRUCTION

Le modèle fédéré développé dans le cadre de ce projet s'est avéré particulièrement bénéfique, y compris durant la phase de construction. Lors des travaux de terrassement pour les murs de soutènement, le modèle a permis d'analyser les interférences entre les réseaux municipaux existants et les implantations prévues au plan (Hilgemberg, 2024). Cette démarche a facilité les échanges avec les autorités publiques et a permis de prendre des décisions éclairées afin de corriger rapidement les écarts d'exécution, notamment au niveau des fondations, en ajustant les niveaux supérieurs pour éviter des modifications tardives et coûteuses.

4.1.2.4 La maturité de BIM et ses dimensions

Aller jusqu'à 5D a été très bénéfique pour ce projet. Certaines parties prenantes ont utilisé les méthodes traditionnelles pour définir les quantités des matériaux et leurs coûts pour certaines parties des parcelles A et B1. Alors, les conseillers de management de projet ont décidé de faire une vérification de ces quantités avec le BIM. Des variations de l'estimation allant d'environ 4,7 % à environ 11,4 % ont été remarquées dans certaines disciplines, comme les montre la figure 33. L'utilisation du BIM avec une certaine maturité de niveau 2 et la dimension 5D, a permis de corriger les coûts et optimiser le budget.

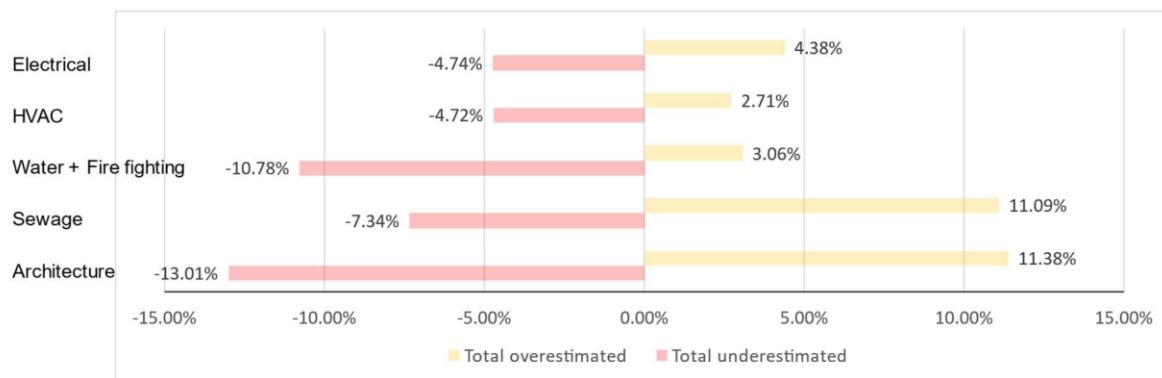


Figure 33. Variations de l'estimation budgétaire découvertes par disciplines aux parcelles A et B1 après l'utilisation du BIM (Hilgemberg, 2024).

4.1.3 Analyse et discussion

L'analyse de l'impact du BIM sur le QM dans cette étude est faite par rapport au corpus de PMBOK 6^e édition de PMI (2016). Ce choix a été fait, car il propose une approche universelle, structurée et efficace. Les résultats de l'étude de cas montrent que le BIM est impliqué dans les trois processus de management de la qualité : QP, QA et QC. Son BEP en tant qu'actif organisationnel est parmi les données d'entrée qui peut aider à mieux préparer le plan de management de la qualité au processus de QP, afin de structurer l'utilisation du BIM et soutenir la mise en œuvre de la politique de qualité.

L'un des résultats les plus tangibles concerne la réduction du coût des défauts internes (une composante du CoQ), lors du processus de QC. L'étude a révélé qu'en identifiant et en traitant 513 incohérences via le modèle fédéré BIM, plus de 4,3 millions d'euros de pertes potentielles ont été évités. De plus, 333 jours de retard ont pu être anticipés, ce qui confirme la valeur ajoutée du BIM pour le respect des objectifs projet, comme le soutiennent Sholeh et al. (2020). Ces observations confortent les travaux de Chelson (2010); Hartmann (2010); Shewale et al. (2023); Sinenko et al. (2020), qui reconnaissent le rôle du BIM dans la détection, le management et la réduction des défauts.

Le CDE du BIM a permis une traçabilité des données de la qualité liées aux processus de QP, de QA et de QC tout au long du cycle de vie du projet. Contrairement aux méthodes traditionnelles, aucune perte d'information n'a été constatée lors des transitions entre les phases. Cette gestion rigoureuse de l'information renforce non seulement la cohérence des livrables, mais elle répond aux exigences de traçabilité et d'amélioration continue stipulées par la norme ISO 9001: 2015. Cela appuie les conclusions de Hilgemberg (2024); Preidel et al. (2016); Wang et al. (2022) à propos de la gestion d'information liée au management de la qualité durant le cycle de vie du projet.

Ainsi, l'intégration du modèle fédéré, partagé via le CDE, a significativement renforcé le processus de QA, en facilitant la collaboration et la coordination entre les parties prenantes. Ce modèle a mobilisé efficacement les compétences d'environ 243 intervenants qui font partie d'environ 50 parties prenantes, réparties sur deux pays (le Portugal et le Royaume-Uni), facilitant l'intégration de 45 modèles de différentes disciplines. Cette approche a stimulé l'implication du personnel et le management des relations, deux principes importants de l'ISO 9001: 2015, et parmi les pratiques de management de la qualité, comme l'explique le PMBOK 6e édition. Ces résultats sont cohérents avec les constats de Lu et al. (2013); Poirier et al. (2017); Qiu (2011); Zollinger et al. (2010).

Un autre impact notable est la simplification des processus décisionnels, qui touche principalement le QA et le QC. Grâce aux visualisations en 3D, aux outils de simulation et à

la disponibilité des données en temps réel, les décisions ont pu être prises de manière proactive, rapide et fondée sur des faits, soit pendant la conception ou la construction. La facilitation de la prise de décision après la détection de l'incohérence entre les murs de soutènement et les réseaux municipaux représentent un bon exemple. Cela valide les apports soulignés par Azhar (2011); Bank et al. (2010); Sinenko et al. (2020), et incarne le principe ISO de l'approche factuelle pour la prise de décision.

Enfin, le recours à une démarche BIM 5D avec maturité niveau 2, et avec les autres aspects clés du BIM, a permis de renforcer la quantification, la planification et la coordination. Cela a mené à une amélioration mesurable de la productivité, à une réduction du retravail, et à un meilleur respect des délais et des coûts. Ces résultats corroborent ceux de Chelson (2010); Shewale et al. (2023); Sinenko et al. (2020). Le BIM a aidé à préparer un plan d'inspection en planifiant et en coordonnant les inspections à travers des outils de gestion de projet et des vues en 3D en fournissant des informations en temps réel. Il a contribué également à corriger les défauts de la construction et à prévenir les futures lacunes, soutenant ainsi l'amélioration continue du travail, un principe fondamental du management de la qualité selon l'ISO 9001: 2015.

Ces résultats appuient ainsi la proposition 1 formulée dans cette recherche, en confirmant que l'intégration du BIM contribue concrètement à l'amélioration du management de la qualité et constitue un levier opérationnel pour la mise en pratique des principes du management de la qualité de la norme ISO 9001: 2015.

4.1.4 Synthèse

L'intégration du BIM dans la gestion de la qualité influence profondément les trois processus fondamentaux de management de la qualité : la QP, la QA et le QC. Dans le cadre de la planification de la qualité, le BIM contribue à une meilleure préparation du plan de management de la qualité grâce à la structuration des informations via le CDE, au développement de livrables normalisés à travers le BEP, à l'application des objectifs de la qualité comme la réduction des coûts et du délai, et l'optimisation des processus. Et à la mise

en œuvre des principes d'amélioration continue et d'approche processus énoncés par l'ISO 9001: 2015.

En ce qui concerne l'assurance qualité, le BIM renforce les mécanismes d'exécution par la traçabilité des données et l'interopérabilité des modèles partagés dans un environnement collaboratif. Grâce au modèle fédéré et à l'utilisation d'un CDE conforme à la norme ISO 19650, la collaboration entre les parties prenantes s'améliore considérablement, soutenant une meilleure coordination interdisciplinaire et garantissant la conformité aux exigences. Ce processus mobilise ainsi les principes d'implication du personnel, de management des relations, d'orientation client et de leadership. Par ailleurs, la disponibilité des informations en temps réel, issue de la maturité BIM et des dimensions nD, favorise une prise de décision rapide, proactive et fondée sur les faits, ce qui appuie pleinement le principe d'une approche factuelle pour la prise de décision.

Enfin, dans le cadre du contrôle de la qualité, le BIM permet une traçabilité des données et une détection rapide et automatisée des défauts dès les phases amont, notamment via la coordination 3D et les logiciels de la détection des incohérences. Cela permet une gestion efficace des incohérences, une réduction du retravail, des coûts de la qualité et le délai du projet. À travers ces apports, le BIM se positionne comme un catalyseur de performance en matière de qualité, en assurant à la fois une meilleure cohérence, une gestion fluide de l'information, une productivité accrue et une réponse agile aux exigences des projets complexes. Le tableau 15 présente une synthèse des impacts du BIM sur chacun des processus du management de la qualité, ainsi que les principes de l'ISO 9001: 2015 mobilisés.

Tableau 15 : Récapitulatif de l'impact du BIM sur le management de la qualité.

| Impact | QP | QA | QC | Principes de QM de l'ISO 9001 :2015 mis en œuvre |
|--|----|----|----|--|
| Aider à mieux préparer le plan de management de la qualité | ✓ | | | – Amélioration continue |
| Réduction des coûts de la qualité | | ✓ | | – Amélioration continue |
| Réduction des délais du projet | | ✓ | | – Amélioration continue |
| Optimisation des processus | ✓ | ✓ | ✓ | – Approche processus – Amélioration continue |
| Traçabilité des données de la qualité | ✓ | ✓ | ✓ | – Amélioration |
| Collaboration et coordination entre les parties prenantes | | ✓ | | – Orientation client – Management des relations – Implication du personnel |
| Facilitation de la prise de décision | | ✓ | ✓ | – Prise de décision – Leadership |
| Détection, management et réduction des défauts | | | ✓ | – Amélioration |

Source : Par l'auteur.

4.2 L'ÉTUDE DE CAS DE LA PROPOSITION 2, IMPACT DE L'IA, PLUS PRÉCISÉMENT L'OPT SUR LE MANAGEMENT DE LA QUALITÉ

La deuxième proposition présentée dans la section 2.6 porte sur l'impact de l'IA sur le management de la qualité des projets de construction. Elle soutient que l'intégration de l'IA, en particulier l'OPT, contribue à l'amélioration du management de la qualité dans les projets de construction en influençant ses trois processus : QP, QA et QC. Cette contribution se manifeste par une prise de décision plus éclairée, l'intégration des objectifs du projet sous forme de métriques mesurables, ainsi qu'un renforcement des mécanismes d'amélioration continue. L'OPT permet ainsi de soutenir une qualité optimale tout au long du cycle de vie du projet.

4.2.1 Présentation de l'étude de cas : *Project Discovery* d'Autodesk à Toronto, Canada

Le *Projet Discovery*, choisi comme étude de cas, sert à aménager les nouveaux bureaux d'*Autodesk* situés au bâtiment de *MaRs Discovery District* à Toronto, le géant connu de développement des logiciels de création et de contenu numérique. Ce projet est conçu en août 2016 par la firme d'architectes *The Living*, et les travaux ont été achevés en septembre 2017 (Saini, 2017). Les bureaux occupent 60 000 pieds carrés sur 2 étages utilisés par 250 employés (Gerfen, 2018; Keane, 2017). L'objectif est de concevoir un espace de bureau moderne et efficace, qui répond aux besoins de l'utilisateur.

Ce projet a été sélectionné car il constitue un exemple pertinent des impacts concrets de l'application enrichissante de l'IA aux projets de la construction. Les informations sont prises de multiples sources publiées en ligne par Autodesk, *Autodesk Research*, des articles scientifiques, des blogues scientifiques et des vidéos sur YouTube. La liste des sources est présentée à l'appendice 2.

Des contraintes à différents niveaux ont été révélées pendant la préparation à la conception notamment : la taille et les contours de l'espace, les exigences du programme spacio-fonctionnel², l'emplacement fixe des noyaux de circulation et les locaux techniques, exigences par rapport au nombre du personnel qui peut atteindre jusqu'à 300 personnes, la diversité des départements, les équipes et les styles de travail du personnel (Gerfen, 2018; Nagy et al., 2017; Walmsley et Villaggi, 2018). Pour aboutir l'objectif, la firme d'architectes avec la collaboration d'*Autodesk* a utilisé la conception générative.

² Le programme spacio-fonctionnel : désigne la répartition des espaces d'un projet selon leurs fonctions, surfaces et relations fonctionnelles, servant de base à la conception architecturale.

4.2.2 Méthode et résultats de l'utilisation de l'IA dans ce projet

Les données utilisées dans cette étude de cas proviennent d'une analyse documentaire réalisée conformément à la méthodologie exposée à la section 3.10. Cette analyse s'appuie sur diverses sources secondaires, incluant des articles scientifiques, des rapports techniques et des publications professionnelles portant sur l'application de l'intelligence artificielle et de l'optimisation dans le domaine de la conception. Les documents collectés ont été codés et comparés afin d'identifier les éléments récurrents relatifs à la qualité, tels que la performance, la productivité, la précision des décisions et l'amélioration continue. Sur cette base analytique, cette section présente la méthode et les résultats issus de l'intégration des algorithmes d'optimisation dans le projet étudié et leur impact sur le management de la qualité.

La conception de ce projet a commencé pendant la période où Autodesk a montré de l'intérêt à explorer et intégrer le GD dans leurs produits. Le processus de GD suit une séquence en trois étapes comme illustrée dans la figure 34 :

- Étape 1 : Génération du modèle géométrique de la conception
- Étape 2 : Évaluation de chaque solution selon des objectifs quantitatifs et qualitatifs
- Étape 3 : Évolution des conceptions générées.

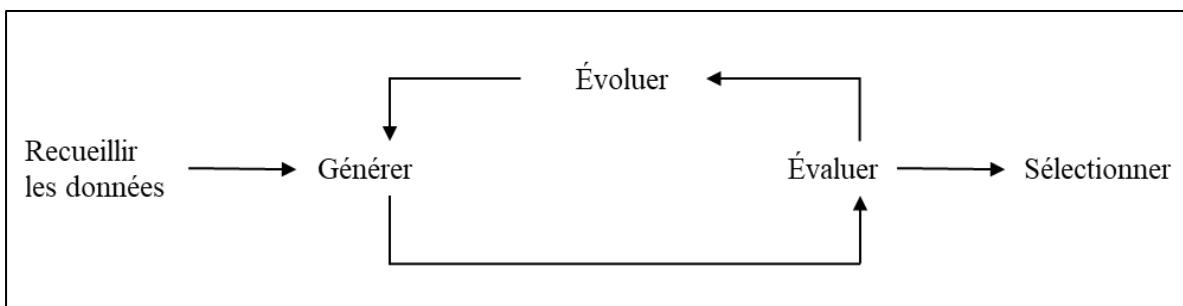


Figure 34. Présentation simplifiée de la méthode GD (Walmsley et Villaggi, 2018), modifié.

4.2.2.1 Étape 1 : Génération du modèle géométrique de la conception

La figure 35 illustre le processus de la génération du modèle géométrique de la conception. Celui-ci débute par une modélisation géométrique de base (vue 0), où le contour architectural de l'étage est défini afin de délimiter l'espace de conception. Cette opération prépare le terrain pour les traitements automatisés à venir. Les vues suivantes représentent la planification spatiale, une opération traditionnellement difficile à résoudre pour un concepteur humain, car elle requiert réflexion, intuition, règles empiriques, et un processus itératif de conception et de test de multiples solutions avant de sélectionner la plus appropriée (Nagy et al., 2017). Les concepteurs procèdent à la délimitation des zones exclues de la génération, telles que les locaux techniques, les espaces de circulation horizontale (corridors), et verticale (escaliers), ainsi qu'un axe central, servant de structure organisationnelle à la disposition spatiale (vue 1).

À partir de là, une série de zones fonctionnelles est définie (vue 2), représentant différentes unités (départements). Chaque zone est associée à une fonction précise et guidée par des contraintes spatiales ou relationnelles. Dans la vue 3, l'organisation spatiale est automatisée à travers des algorithmes d'optimisation géométrique, ceux-ci déplacent dynamiquement les points d'ancrage des zones fonctionnelles sur l'axe central, créant des divisions angulaires adaptées à l'usage. Cette optimisation locale améliore la fluidité et l'accessibilité des espaces. La vue 4 montre la génération automatique des espaces d'usage partagés, comme les espaces de réunion. Enfin, la vue 5 illustre la génération de l'ameublement fonctionnel, intégré dans chaque zone selon sa fonction, et l'affectation des employeurs selon leurs préférences. Dans cette étape, quinze unités fonctionnelles sont générées, chacune pilotée par trois paramètres géométriques indépendants, soit un total de 45 paramètres définissant l'espace de conception.

Sur le plan de l'intelligence artificielle, cette première étape mobilise principalement des algorithmes heuristiques d'optimisation, dont le *Greedy fill algorithm*, ou l'algorithme de remplissage glouton (Nagy et al., 2017). Il permet d'assurer la cohérence fonctionnelle et

géométrique des espaces générés, sans encore explorer de variantes multiples ni effectuer de sélection optimisée.

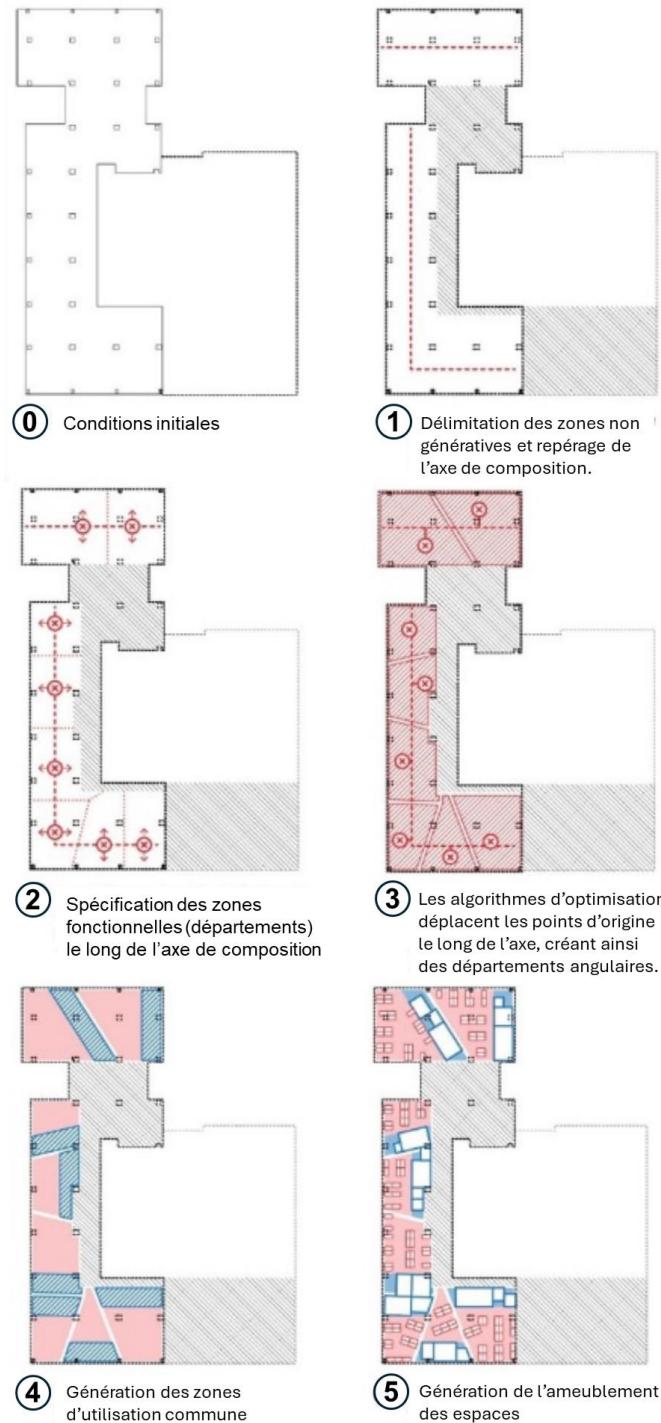


Figure 35. Étape de la création du modèle géométrique (Gerfen, 2018), modifié.

4.2.2.2 Étape 2 : Évaluation de chaque solution selon des objectifs quantitatifs et qualitatifs

Après la génération du modèle géométrique, le processus de conception générative entre dans une phase d'évaluation, fondée sur l'intégration de données qualitatives et quantitatives. Du côté qualitatif, les préférences individuelles des employés sont prises en compte. Celles-ci ont été recueillies à travers un questionnaire distribué aux futurs usagers, afin de déterminer leurs styles de travail préférés et leurs besoins d'agencement spatial (Gerfen, 2018; Nagy et al., 2017; Walmsley et Villaggi, 2018). Quant aux données quantitatives, elles sont définies par les concepteurs selon les normes et les objectifs du projet, et incluent notamment la lumière naturelle, l'atmosphère de l'intérieur, la productivité et les vues sur l'extérieur (Gerfen, 2018; Nagy et al., 2017; Walmsley et Villaggi, 2018).

Ces différents critères, illustrés à la figure 36, sont ensuite convertis en métriques d'évaluation (la méthode QFD, voir la section 2.5.1), constituant une grille d'analyse multicritère sur laquelle se base l'algorithme d'optimisation. Comme illustré dans la figure 37, ces données alimentent une boucle d'évaluation automatique où chaque solution générée est notée, en fonction de sa capacité à répondre aux attentes exprimées par les usagers et aux performances mesurables attendues.

Ces données traduisent les exigences fonctionnelles et spatiales des parties prenantes, définies lors du processus de QP, et servent de références pour les vérifications dans le cadre de QA.

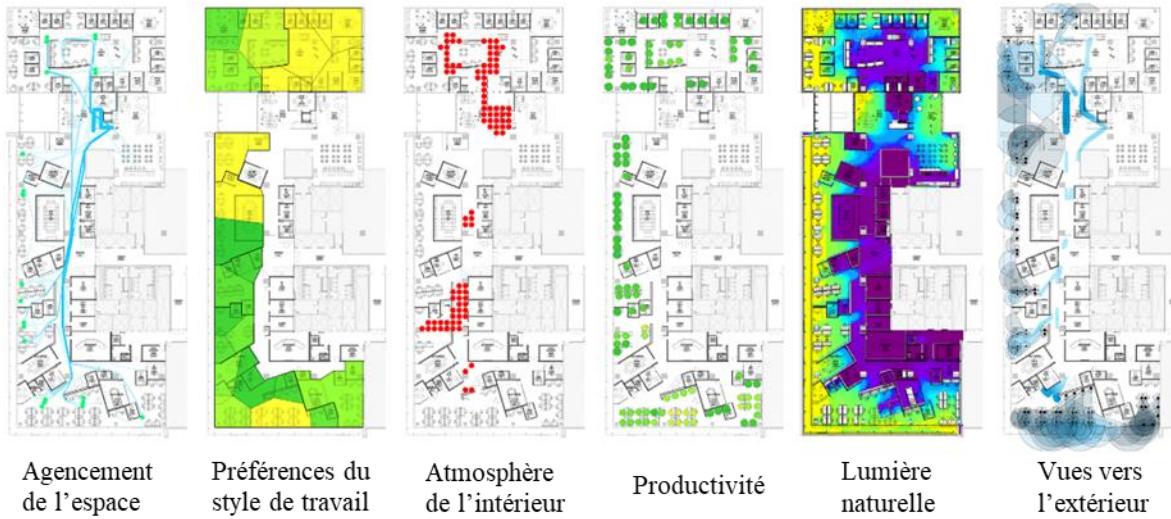


Figure 36. Les paramètres de l'évaluation (Walmsley et Villaggi, 2018), modifié.

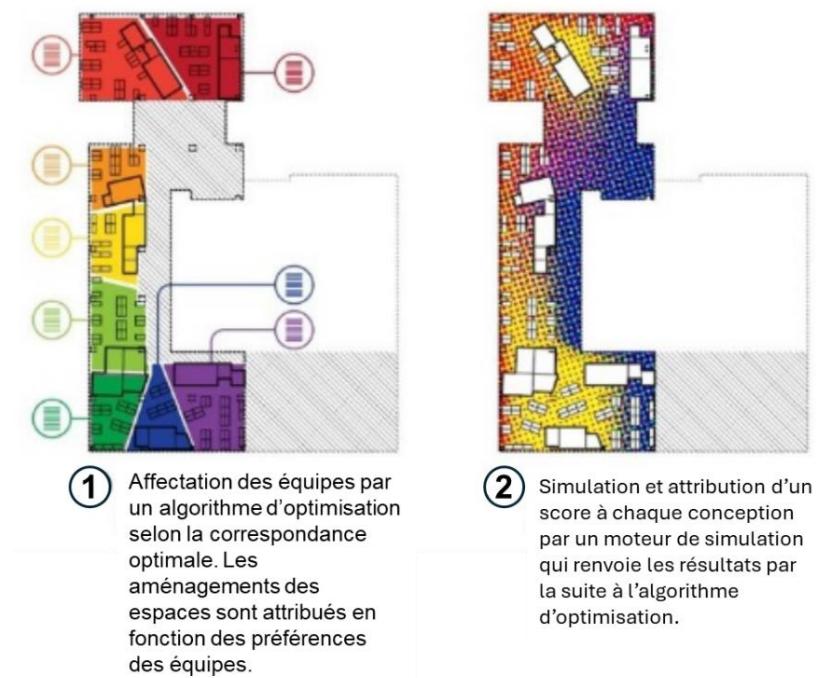


Figure 37. L'étape de l'évaluation (Gerfen, 2018), modifié.

4.2.2.3 Étape 3 : Évolution des conceptions générées

Une fois les premières solutions générées et évaluées, le processus entre dans une phase d'optimisation évolutive, pilotée par un algorithme génétique multiobjectif, ou *Multi-Objective Genetic Algorithm* (MOGA). Ce type d'algorithme s'inspire du principe de l'évolution naturelle pour faire évoluer progressivement les conceptions, génération après génération. Il fonctionne par échantillonnage stochastique et ajuste les paramètres d'entrée en apprenant au fil des itérations.

Concrètement, le système a d'abord produit une population (le terme utilisé en GD pour cette opération) initiale de 100 conceptions, puis a appliqué une série d'optimisations sur 100 générations successives, réparties sur une durée de cinq jours (Nagy et al., 2017). À l'issue de ce processus, un total de 10 000 variantes de conception a été généré (Gerfen, 2018; Nagy et al., 2017; Saini, 2017; Walmsley et Villaggi, 2018), formant ainsi une base riche pour la sélection de solutions performantes et innovantes.

4.2.2.4 La sélection des résultats

Une fois les étapes de génération terminées, les résultats sont regroupés en catégories à l'aide d'un algorithme d'apprentissage non supervisé, notamment le *K-means*, en fonction des similarités entre les conceptions et leurs performances selon les métriques définies. Ensuite, des analyses croisées entre paires de métriques sont effectuées à l'aide du front de Pareto, une méthode d'optimisation, qui permet d'identifier les compromis les plus pertinents entre les objectifs concurrents (par exemple : l'agencement de l'espace vs l'atmosphère de l'intérieur), comme le montre la figure 38. Cette méthode permet de sélectionner un ensemble des meilleures conceptions. Finalement, huit modèles ont été retenus et transmis à Autodesk pour la prise de décision finale.

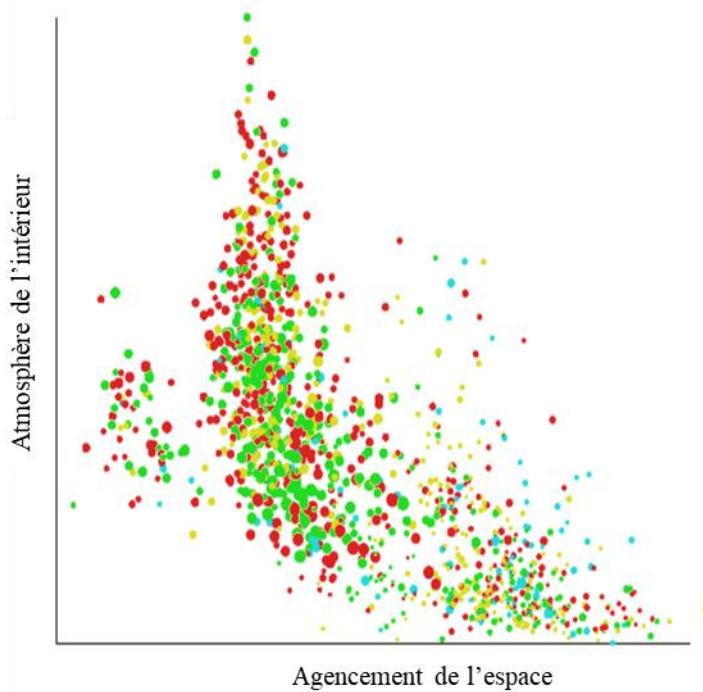


Figure 38. Résultat de l'analyse Pareto entre les deux métriques : agencement de l'espace et l'atmosphère de l'intérieur (Nagy et al., 2017), modifié.

Les algorithmes de l'IA ont permis l'amélioration de la qualité de la conception en mettant en œuvre les exigences des occupants. Stoddart et al. (2017) ont bien expliqué comment la qualité de la conception est améliorée. D'abord, la gestion de l'agencement des espaces a facilité la collaboration en minimisant les distances de déplacement entre les équipes, améliorant ainsi l'efficacité opérationnelle. Ensuite, l'IA a pris en compte les préférences des employés, garantissant une meilleure acceptabilité des espaces selon leurs attentes en matière d'éclairage naturel, d'isolation acoustique et de configuration de travail. De plus, l'optimisation de l'atmosphère de l'intérieur et des espaces partagés a favorisé des interactions fluides, tout en respectant un équilibre entre espaces collaboratifs et zones de concentration. L'amélioration de la productivité a été un autre bénéfice clé, grâce à la réduction des distractions visuelles et sonores. Enfin, le projet a maximisé l'utilisation de la lumière naturelle et des vues sur l'extérieur, contribuant ainsi à un environnement de travail plus agréable et énergétiquement efficace. La Figure A3. 1, Figure A3. 2, Figure A3. 3 et la

Figure A3. 4 (voir l'annexe 3), présentent une visualisation photo-réalistique du bâtiment après le choix de la conception.

David Benjamin, le fondateur de la firme d'architectes *The Living* explique en détail la qualité obtenue de la conception dans une vidéo publiée par Autodesk (2019). Il dit que les lumières sont orientées dans différentes directions pour éclairer précisément les zones d'activité intense. La salle de jeux est littéralement peinte avec les différentes couleurs issues de la simulation de lumière naturelle du lieu. Il ajoute :

« Lorsque le design génératif peut explorer un immense champ de conception et générer un grand nombre d'options bien plus que ce qu'un humain pourrait créer manuellement, cela nous donne, en tant qu'humains, la possibilité d'utiliser notre jugement, nos valeurs et notre créativité pour explorer des solutions qui n'auraient pas été envisageables autrement. » (Autodesk, 2019, p. 2:00)

4.2.3 Analyse et discussion

L'étude de cas du *Project Discovery* met en lumière l'intégration pertinente de plusieurs algorithmes d'optimisation dans la phase de la conception, et démontre leur potentiel à enrichir le management de la qualité aux projets de construction. Elle permet non seulement de confirmer plusieurs constats issus de la littérature (section 2.5.1), mais également de souligner les apports distincts à chacun des processus qualité définis par le PMBOK 6^e.

D'abord, l'approche générative adoptée dans ce projet repose sur des algorithmes heuristiques (*Greedy fill*) et évolutionnaires (MOGA), qui ont permis de soutenir les processus de la planification spatiale³ et de la conception architecturale dès le début du projet. Le *Greedy Fill Algorithm* joue un rôle essentiel dans l'organisation initiale des zones fonctionnelles : en affectant automatiquement les espaces selon des contraintes relationnelles

³ La planification spatiale est un terme utilisé en architecture, il désigne l'organisation fonctionnelle et logique des espaces intérieurs, en tenant compte des usages, des circulations, de l'ergonomie et des contraintes du projet.

et spatiales, il structure le modèle géométrique de manière à réduire les conflits d'usage et à favoriser une cohérence fonctionnelle. Cette organisation préparatoire traduit une adaptation concrète de la méthode QFD, en transformant les exigences qualité des usagers, recueillies par questionnaires, en critères mesurables. Ce résultat illustre comment l'OPT soutient le processus de QP tout en préparant un suivi efficace dans le cadre de la QA et du QC. Ce constat renforce la proposition 2 et appuie les recherches de Wang et al. (2023). Ce mécanisme incarne deux principes essentiels du management de la qualité : l'orientation client et la gestion des relations, comme dicté par l'ISO 9001: 2015.

Ensuite, l'OPT a offert un soutien substantiel au processus de QA. Environ 10 000 conceptions ont été générées en seulement cinq jours avec le MOGA, en intégrant des métriques d'audit de qualité. Cela reflète une amélioration notable de la productivité et de la performance des processus, dans une opération qui requiert traditionnellement intuition et expérience humaine. Ce constat renforce la proposition 2 et rejoint les conclusions de Abioye et al. (2021). Le MOGA repose sur les principes de sélection naturelle, croisement et mutation, permettant de faire évoluer les solutions au fil des générations selon les performances observées. Dans ce projet, le *MOGA* a été utilisé pour affiner les combinaisons de paramètres géométriques et fonctionnels à travers 100 générations, afin d'identifier des alternatives plus performantes en termes de confort, de lumière naturelle ou de productivité. Cette approche évolutive traduit un mécanisme d'amélioration continue, propre aux logiques qualité, ce qui appuie notre proposition et illustre l'un des principes de management de la qualité de l'ISO 9001: 2015.

La sélection finale de 8 variantes, sur les 10 000 générées, illustre la manière dont l'optimisation algorithmique soutient une prise de décision éclairée, tout en intégrant des éléments subjectifs liés aux préférences des utilisateurs. Ce processus appuie notre proposition et s'aligne avec les constats de Chen et al. (2010), en montrant que l'OPT permet d'équilibrer l'objectivité algorithmique et le jugement humain, conformément au principe de la prise de décision défini par la norme ISO 9001: 2015. Par ailleurs, la génération rapide de ce vaste ensemble de solutions en seulement cinq jours démontre la capacité de l'OPT à

offrir un compromis optimal entre la qualité et la durée. Ce constat renforce les apports de Abioye et al. (2021); Akcay et İşikyıldız (2020); Pham et Ngoc Q. K (2025), en montrant que l'optimisation algorithmique est un levier concret d'amélioration de la performance dans des contextes complexes de gestion de projet.

En outre, la phase de sélection finale, fondée sur des analyses de clusters (*K-means*) et sur le front de Pareto, illustre l'intérêt d'une optimisation multicritère dans le contrôle qualité (QC). Le regroupement des conceptions selon leurs performances permet de mieux cerner les compromis et d'identifier les modèles les plus performants. Cette méthode d'analyse croisée facilite un contrôle rigoureux de la conformité aux exigences, soutenant le rôle stratégique de l'OPT dans le suivi et l'ajustement de la qualité. Ce constat complète et enrichit notre proposition.

Enfin, les bénéfices perçus, tels que l'amélioration de la collaboration, la réduction des nuisances sonores et l'optimisation de l'éclairage naturel, présentés par Stoddart et al. (2017), montrent que les effets de l'OPT ne se limitent pas aux seules métriques de performance, mais s'étendent également à la qualité perçue et l'expérience utilisateur, confirmant que l'intelligence artificielle peut renforcer la mise en œuvre des principes de management de la qualité, comme l'orientation client.

Ces résultats appuient ainsi la proposition 2 formulée dans cette recherche, en confirmant que l'intégration de l'IA, particulièrement l'OPT contribue concrètement à l'amélioration du management de la qualité et constitue un levier opérationnel pour la mise en pratique des principes du management de la qualité de la norme ISO 9001: 2015.

4.2.4 Synthèse

L'optimisation algorithmique soutient le processus de planification de la qualité, en traduisant efficacement les exigences des parties prenantes en critères mesurables, favorisant ainsi une structuration rigoureuse des objectifs qualité dès les premières phases de

conception. Ces critères mesurables facilitent par la suite l'exécution de la qualité et le contrôle de la qualité.

Ensuite, elle a renforcé le processus d'assurance qualité en automatisant la génération et l'évaluation d'un large spectre de solutions, ce qui améliore la performance globale des processus et la productivité, assurant une meilleure conformité aux standards, et un soutien aux mécanismes d'amélioration continue.

Enfin, elle contribue au processus de contrôle qualité en facilitant la sélection multicritère des solutions optimales, en favorisant des prises de décision fondées sur des preuves, et en assurant une gestion précise de la conformité aux exigences, tant techniques qu'expérientielles. Le tableau 16 présente un récapitulatif de l'impact de l'OPT sur le QM.

Tableau 16 : Récapitulatif de l'impact de l'OPT sur le management de la qualité.

| Impact | QP | QA | QC | Principes de QM de l'ISO 9001 :2015 mis en œuvre |
|--|----|----|----|---|
| Transférer les exigences non métriques mesurables | ✓ | ✓ | ✓ | <ul style="list-style-type: none"> - Orientation client - Approche processus |
| Structuration rigoureuse des objectifs qualité dès les premières phases | ✓ | | | <ul style="list-style-type: none"> - Approche processus - Prise de décision |
| Évaluation systématique selon des critères de performance | ✓ | ✓ | | <ul style="list-style-type: none"> - Prise de décision - Leadership |
| Prise de décision éclairée et multicritère | ✓ | ✓ | | <ul style="list-style-type: none"> - Prise de décision - Leadership - Approche processus |
| Optimisation du compromis coût – durée – qualité | | | ✓ | <ul style="list-style-type: none"> - Amélioration continue |
| Amélioration de la productivité et de la performance globale des processus | ✓ | | | <ul style="list-style-type: none"> - Amélioration continue - Approche processus |
| Amélioration continue | ✓ | ✓ | ✓ | <ul style="list-style-type: none"> - Amélioration continue - Approche processus |

Source : Par l'auteur.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce mémoire a permis d'explorer l'impact du BIM et de l'intelligence artificielle, en particulier l'optimisation algorithmique, sur le management de la qualité dans les projets de construction. En mobilisant un cadre théorique basé sur le PMBOK 6^e édition, deux propositions ont été formulées et examinées à travers des études de cas concrètes.

Les résultats confirment et élargissent le cadre théorique. Elle indique que l'utilisation du BIM renforce l'ensemble des processus de management de la qualité. Par son apport à l'amélioration de la collaboration, la traçabilité des informations, facilitation de la prise des décisions, et la détection et le management des défauts. Les résultats indiquent aussi que le BIM aide à mieux préparer le plan de management de la qualité et à réduire les coûts de la qualité et les délais du projet, qui est parmi les contributions de cette étude. Quant à l'intégration de l'IA, l'OPT se révèle particulièrement pertinent en phase de planification et de conception. Il soutient les trois processus qualité en traduisant les exigences des clients en critères mesurables, en automatisant la génération et l'évaluation de solutions multiples, et en favorisant des décisions éclairées basées sur des comparaisons multicritères. En ce sens, l'OPT représente un levier stratégique pour une gouvernance de la qualité plus proactive, agile et alignée sur les exigences complexes des projets contemporains.

L'une des contributions majeures de cette recherche réside dans l'analyse différenciée de l'impact du BIM et de l'OPT sur chacun des trois processus de management de la qualité, la planification (QP), l'assurance (QA) et le contrôle (QC), tels que définis par le PMBOK 6^e édition. Contrairement aux approches globales de la qualité souvent rencontrées dans la littérature, ce travail met en lumière les apports spécifiques de chaque technologie à chaque processus, ce qui renforce la pertinence managériale de leur intégration.

Sur le plan pratique, les résultats offrent aux acteurs de la construction des pistes concrètes pour intégrer stratégiquement le BIM et l'OPT dans leurs démarches qualité. Ils

montrent que, lorsqu'elles sont utilisées dans un cadre structuré, ces technologies permettent des gains tangibles en matière de coût, de délais, de coordination et de performance.

Cependant, cette recherche présente certaines limites. Elle repose sur un nombre restreint d'études de cas, ce qui limite la généralisation des résultats. De plus, l'accès aux données et aux outils utilisés dans les projets a parfois été partiel, et l'analyse documentaire peut comporter des biais liés à l'interprétation des sources.

Cependant, cette recherche présente certaines limites. Elle repose sur un nombre restreint d'études de cas, ce qui restreint la généralisation des résultats. De plus, l'accès aux données et aux outils utilisés dans les projets a parfois été partiel, ce qui a limité l'analyse directe des informations. Par ailleurs, l'étude s'appuie exclusivement sur des documents secondaires. Cette approche peut introduire des biais et des omissions par rapport aux données primaires, offrir moins de détails sur certains aspects spécifiques ou contextuels, et réduire la possibilité de vérifier directement la fiabilité des informations. Enfin, certaines évolutions récentes du domaine peuvent ne pas être entièrement reflétées dans la littérature consultée.

Des recherches futures pourraient porter sur un plus grand nombre de cas dans divers contextes (géographiques, contractuels, organisationnels) afin de valider les résultats. Il serait également pertinent d'explorer plus en profondeur les conditions organisationnelles nécessaires à l'adoption efficace de l'IA dans les projets de construction, en mettant l'accent sur les enjeux de formation, de gouvernance des données et de transformation numérique. Les recherches futures pourraient aussi discuter l'impact de l'intégration des jumeaux BIM/IA. Enfin, afin de renforcer la robustesse des conclusions, il serait souhaitable d'intégrer des données primaires, par exemple par des entretiens avec les parties prenantes, des groupes de discussion ou des enquêtes, ce qui permettrait de mieux contrôler les biais, de vérifier les informations issues des documents secondaires et d'apporter des perspectives inédites sur l'adoption et l'utilisation de l'IA et du BIM dans le secteur de la construction.

APPENDICE

APPENDICE 1 : LISTE DES SOURCES D'INFORMATIONS DE L'ÉTUDE DE CAS 1, LE FUTUR SIÈGE DE FIDELIDADE À LISBONNE, PORTUGAL

| Nature | Titre | Citation |
|--------------------------|--|-------------------------------------|
| Article | Lima, F., Roux, S., Hipólito, A., Feio, C. et Silva, A. (2024, 8-10 mai). <i>Projeto da sede da Fidelidade: Ciclo de vida BIM do programa preliminar à obra. 5º Congresso Português de Building Information Modelling</i> , Braga, Portugal. | (Lima et al., 2024) |
| Vidéo | Plannerly. (2022). <i>Étude de cas BIM-Gestion BIM sur un grand projet (développement à usage mixte)</i> . Plannerly. https://www.youtube.com/watch?v=4cLD03fSnTg | (Plannerly, 2022) |
| Document du gouvernement | Câmara municipal de Lisboa. (2018). <i>Operação Integrada de Entrecampos (Opération Intégrée Entrecampos)</i> . https://www.am-lisboa.pt/documentos/1532191722R6yTJ7pt1Rx39NC9.pdf | (Câmara municipal de Lisboa, 2018a) |
| Document du gouvernement | Câmara municipal de Lisboa. (2018). <i>Recomendação 026/03 —1^a e 3^a CP— Sobre a Operação Integrada de Entrecampos (Recommandation 026/03 —1^{re} et 3^e CP— concernant l'Opération Intégrée d'Entrecampos)</i> . https://am-lisboa.pt/documentos/1531413877I4jAQ4cv6Cl39CT2.pdf | (Câmara municipal de Lisboa, 2018b) |
| Mémoire de recherche | Hilgemberg, A. (2024). <i>The Value of BIM for Owners: A multi-stakeholder study focused on an office building</i> [Mémoire de master inédite, University of Minho]. https://bimaplus.org/wp-content/uploads/2024/10/21-2024-AlineHilgembergdaCosta.pdf | (Hilgemberg, 2024) |

| | | |
|----------------------|---|----------------------|
| Rapport d'entreprise | Roux, S. et Lima, F. (2022). <i>Managing a 310,000 sqm Mixed-use Development with Plannerly.</i> https://plannerly.com/wp-content/uploads/2022/12/BIM-Case-Study-by-Limsen-Consultants.pdf | (Roux et Lima, 2022) |
| Vidéo | Lima, F. et Roux, S. (2022). <i>Filipe Lima and Sébastien Pinto da França Roux from LIMSEN in the Technology in Practice Lounge.</i> https://www.youtube.com/watch?v=gtaHacmAHDc | (Lima et Roux, 2022) |

APPENDICE 2 : LISTE DES SOURCES D'INFORMATIONS DE L'ÉTUDE DE CAS 2, PROJET DISCOVERY D'AUTODESK À TORONTO, CANADA

| Nature | Titre | Citation |
|---------------------|---|---------------------|
| Article | Nagy, D., Lau, D., Locke, J., Stoddart, J., Villaggi, L., Wang, R., Zhao, D. et Benjamin, D. (2017, 22-24 mai). <i>Project Discover: An Application of Generative Design for Architectural Space Planning.</i> 8th annual Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design (SimAUD), Toronto, Canada. https://doi.org/10.22360/simaud.2017.simaud.007 | (Nagy et al., 2017) |
| Blogue scientifique | Saini, R. (2017, 11 novembre). <i>After designing Autodesk Toronto Office, Project Discover goes to design Au 2017 Exhibit Hall.</i> Graphic Speak. https://gfpspeak.com/archives/designing-autodesk-discover/ | (Saini, 2017) |
| Blogue scientifique | Gerfen, K. (2018, 12 janvier). <i>Autodesk MaRS Office.</i> The architect magazine. https://www.architectmagazine.com/project-gallery/autodesk-mars-office_o | (Gerfen, 2018) |
| Blogue scientifique | Keane, K. (2017, 21 septembre). <i>Autodesk's Move to MaRS Complete.</i> Architect Magazine. https://www.architectmagazine.com/practice/autodesk-move-to-mars-complete_o | (Keane, 2017) |

| | | |
|-----------------------|---|------------------------------|
| Document d'entreprise | Walmsley, K. et Villaggi, L. (2018). <i>Generative Urban Design : a collaboration between Autodesk Research and Van Wijnen</i> . Autodesk university. https://static.au-uw2-prd.autodesk.com/Class_Handout_CS239262_Generative_Urban_Design_a_collaboration_between_Autodesk_Research_and_Van_Wijnen_Kean_Walmsley.pdf | (Walmsley et Villaggi, 2018) |
| Vidéo | Stoddart, J., Nagy, D. et Villaggi, L. (2017). <i>MaRS Generative Design</i> . https://www.youtube.com/watch?v=HmpY9s_XkHc | (Stoddart et al., 2017) |
| Vidéo | Autodesk. (2019). <i>How Autodesk used Generative Design to create their Toronto office</i> . https://www.youtube.com/watch?v=ZQmfgGKtlXQ | (Autodesk, 2019) |

ANNEXE 1

Tableau A1. 1. Les mots clés trouvés dans l'analyse cooccurrence.

| Mot clé | Catégorie | Occurrence | Année moyenne | Citation moyenne |
|------------------------------------|------------------|-------------------|----------------------|-------------------------|
| quality management | | 1 | 38 | 2009.9 |
| construction projects | | 1 | 12 | 2015.1 |
| communication | | 1 | 6 | 2012.8 |
| factor analysis | | 1 | 6 | 2014.7 |
| supply chain management | | 1 | 6 | 2015.7 |
| survey | | 1 | 6 | 2012.8 |
| construction materials and methods | | 1 | 5 | 2015.2 |
| construction quality | | 1 | 5 | 2015.0 |
| defects | | 1 | 5 | 2015.0 |
| relationship quality | | 1 | 5 | 2019.0 |
| quality performance | | 1 | 4 | 2017.8 |
| total quality management (tqm) | | 1 | 4 | 2016.8 |
| bayesian network | | 1 | 3 | 2020.7 |
| bench marks | | 1 | 3 | 2008.0 |
| commitment | | 1 | 3 | 2014.7 |
| construction defects | | 1 | 3 | 2020.7 |
| construction sites | | 1 | 3 | 2011.0 |
| earned value management | | 1 | 3 | 2017.7 |
| engineering | | 1 | 3 | 2009.0 |
| subcontractors | | 1 | 3 | 2013.3 |
| quality | 2 | 50 | 2010.2 | 25.3 |
| management | 2 | 11 | 2010.0 | 8.2 |
| safety | 2 | 8 | 2014.4 | 55.6 |
| time | 2 | 8 | 2010.0 | 10.9 |
| construction project management | 2 | 7 | 2013.6 | 20.6 |
| cost | 2 | 7 | 2013.3 | 18.9 |
| housing | 2 | 6 | 2010.3 | 18.2 |
| information management | 2 | 5 | 2008.4 | 26.0 |
| benchmarking | 2 | 4 | 2008.5 | 52.0 |
| customer satisfaction | 2 | 4 | 2006.8 | 29.3 |
| models | 2 | 4 | 2003.5 | 38.8 |
| planning | 2 | 4 | 2008.8 | 45.8 |
| service quality | 2 | 4 | 2007.8 | 24.8 |
| decision support systems | 2 | 3 | 2011.0 | 27.3 |
| key performance indicators | 2 | 3 | 2013.3 | 13.0 |

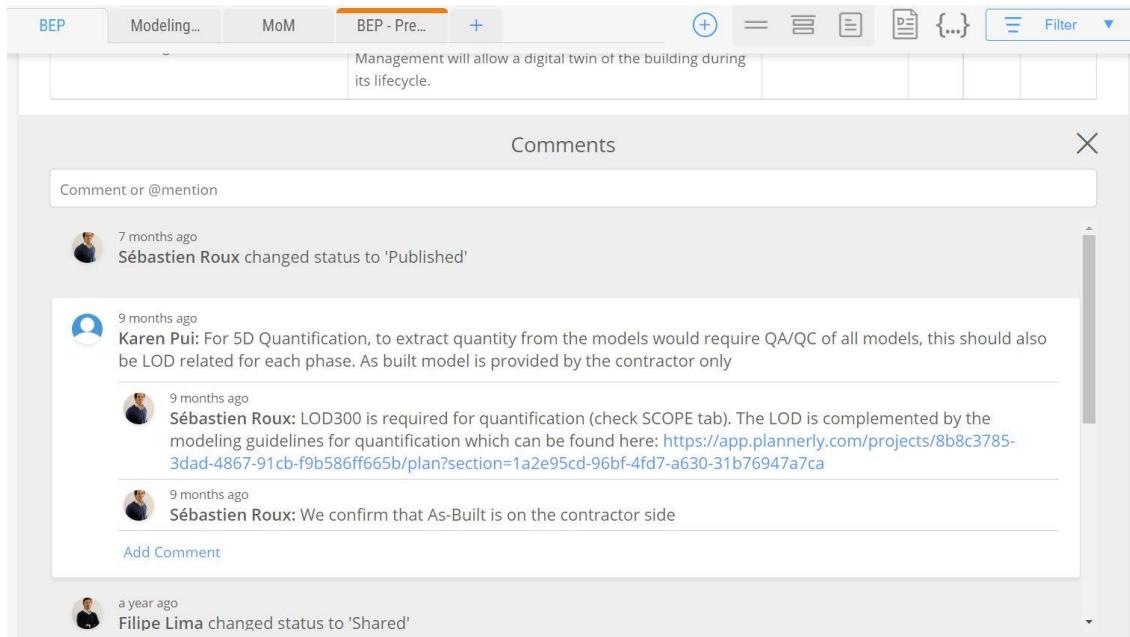
| | | | | |
|----------------------------|---|----|--------|-------|
| pakistan | 2 | 3 | 2015.7 | 56.7 |
| risk | 2 | 3 | 2009.0 | 67.3 |
| total quality management | 3 | 17 | 2013.1 | 34.5 |
| project performance | 3 | 16 | 2015.8 | 54.1 |
| tqm | 3 | 8 | 2007.8 | 27.8 |
| quality management system | 3 | 6 | 2014.2 | 19.8 |
| iso 9000 | 3 | 5 | 2003.0 | 35.6 |
| quality management systems | 3 | 5 | 2014.6 | 15.6 |
| assessment | 3 | 4 | 2011.0 | 31.0 |
| indonesia | 3 | 4 | 2019.0 | 23.0 |
| iso 9001 | 3 | 4 | 2018.8 | 18.8 |
| nigeria | 3 | 4 | 2015.8 | 16.5 |
| quality improvement | 3 | 4 | 2018.3 | 12.8 |
| construction companies | 3 | 3 | 2018.7 | 22.0 |
| critical success factors | 3 | 3 | 2012.7 | 62.7 |
| jordan | 3 | 3 | 2022.7 | 2.7 |
| libya | 3 | 3 | 2016.3 | 5.7 |
| construction industry | 4 | 78 | 2008.5 | 49.9 |
| contractors | 4 | 15 | 2008.6 | 43.5 |
| continuous improvement | 4 | 7 | 2007.6 | 36.3 |
| bids | 4 | 6 | 2007.2 | 40.7 |
| fuzzy sets | 4 | 5 | 2009.4 | 137.2 |
| infrastructure | 4 | 5 | 2010.0 | 128.0 |
| decision making | 4 | 4 | 2009.5 | 55.5 |
| building defects | 4 | 3 | 2014.0 | 42.0 |
| classification | 4 | 3 | 2008.0 | 27.0 |
| data analysis | 4 | 3 | 2005.3 | 23.7 |
| evaluation | 4 | 3 | 2008.7 | 78.3 |
| financial management | 4 | 3 | 2006.3 | 196.0 |
| lean construction | 4 | 3 | 2007.3 | 73.7 |
| research | 4 | 3 | 2007.7 | 85.0 |
| construction management | 5 | 5 | 2008.3 | 48.9 |
| scheduling | 5 | 8 | 2013.4 | 20.4 |
| costs | 5 | 6 | 2012.2 | 32.8 |
| optimization | 5 | 5 | 2016.0 | 17.2 |
| resource management | 5 | 5 | 2013.8 | 17.6 |
| cost and schedule | 5 | 4 | 2014.5 | 49.8 |
| design/build | 5 | 4 | 2008.0 | 27.5 |
| consultants | 5 | 3 | 2003.7 | 11.0 |
| consulting services | 5 | 3 | 2007.0 | 15.7 |
| delivery | 5 | 3 | 2010.3 | 73.7 |
| project delivery | 5 | 3 | 2014.3 | 11.0 |

| | | | | |
|---------------------------------|----|----|--------|-------|
| risk management | 6 | 15 | 2011.8 | 57.6 |
| case study | 6 | 10 | 2017.2 | 26.3 |
| construction project | 6 | 6 | 2014.7 | 107.2 |
| china | 6 | 4 | 2012.5 | 64.0 |
| cost overrun | 6 | 4 | 2014.8 | 202.5 |
| supply chain | 6 | 4 | 2012.3 | 90.0 |
| culture | 6 | 3 | 2004.3 | 52.3 |
| design management | 6 | 3 | 2019.7 | 26.3 |
| lean | 6 | 3 | 2018.0 | 12.0 |
| performance management | 6 | 3 | 2009.7 | 18.7 |
| system dynamics | 6 | 3 | 2012.7 | 62.7 |
| design | 7 | 6 | 2007.3 | 47.8 |
| buildings | 7 | 5 | 2010.6 | 101.4 |
| cost of quality | 7 | 5 | 2010.0 | 34.4 |
| knowledge management | 7 | 5 | 2012.0 | 15.4 |
| singapore | 7 | 5 | 2004.4 | 27.2 |
| building information modeling | 7 | 3 | 2017.7 | 89.0 |
| collaboration | 7 | 3 | 2021.3 | 23.0 |
| developing countries | 7 | 3 | 2017.7 | 18.7 |
| measurement | 7 | 3 | 2005.7 | 50.0 |
| project quality | 7 | 3 | 2019.0 | 11.3 |
| quality control | 8 | 45 | 2008.3 | 30.9 |
| contracts | 8 | 8 | 2006.5 | 35.1 |
| innovation | 8 | 5 | 2010.6 | 71.0 |
| cost control | 8 | 4 | 2005.8 | 38.3 |
| asphalt pavements | 8 | 3 | 2005.3 | 12.7 |
| client relationships | 8 | 3 | 2005.0 | 73.0 |
| organizations | 8 | 3 | 2007.3 | 47.7 |
| partnership | 8 | 3 | 2006.7 | 55.7 |
| quality assurance | 9 | 11 | 2010.0 | 38.5 |
| procurement | 9 | 8 | 2011.1 | 11.9 |
| contractor selection | 9 | 6 | 2009.5 | 123.2 |
| quality function deployment | 9 | 6 | 2008.5 | 32.8 |
| construction quality management | 9 | 4 | 2022.3 | 4.3 |
| fuzzy set | 9 | 3 | 2019.7 | 13.0 |
| prequalification | 9 | 3 | 2007.7 | 127.0 |
| tendering | 9 | 3 | 2011.0 | 67.0 |
| productivity | 10 | 13 | 2006.4 | 37.7 |
| simulation | 10 | 10 | 2011.3 | 30.6 |
| constructability | 10 | 4 | 2005.5 | 12.8 |
| highway construction | 10 | 4 | 2010.3 | 10.0 |
| construction equipment | 10 | 3 | 2009.3 | 9.0 |

| | | | | |
|------------------------|----|----|--------|-------|
| <u>cost management</u> | 10 | 3 | 2016.7 | 4.3 |
| <u>highway design</u> | 10 | 3 | 2011.0 | 8.0 |
| <u>pavement</u> | 10 | 3 | 2009.7 | 22.3 |
| <u>construction</u> | 11 | 36 | 2013.8 | 34.4 |
| <u>rework</u> | 11 | 14 | 2012.0 | 71.4 |
| <u>hong kong</u> | 11 | 11 | 2006.9 | 34.5 |
| <u>performance</u> | 11 | 9 | 2010.3 | 41.2 |
| <u>australia</u> | 11 | 6 | 2006.0 | 97.3 |
| <u>causes</u> | 11 | 3 | 2016.0 | 34.0 |
| <u>contracting</u> | 11 | 3 | 2016.7 | 32.7 |
| <u>quality costs</u> | 11 | 3 | 2001.7 | 170.3 |

Source : Par l'auteur à partir de Scopus.

ANNEXE 2

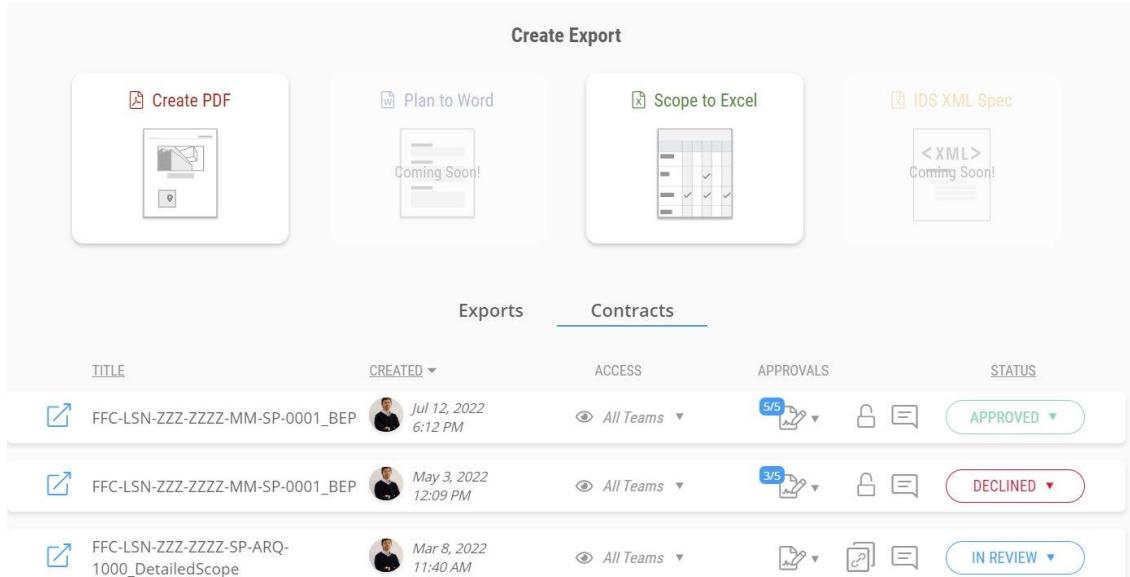


The screenshot shows a digital twin management interface. At the top, there is a navigation bar with tabs: BEP, Modeling..., MoM, BEP - Pre..., and a plus sign. Below the tabs is a search bar with the placeholder text: 'Management will allow a digital twin of the building during its lifecycle.' To the right of the search bar are icons for filter, search, and a three-dot menu.

Below the search bar is a 'Comments' section. It starts with a text input field labeled 'Comment or @mention'. Below this, a comment from Sébastien Roux is shown, dated 7 months ago, stating: 'Sébastien Roux changed status to 'Published''. A reply from Karen Pui, dated 9 months ago, says: 'Karen Pui: For 5D Quantification, to extract quantity from the models would require QA/QC of all models, this should also be LOD related for each phase. As built model is provided by the contractor only'. Sébastien Roux then replies, dated 9 months ago, with a link: 'Sébastien Roux: LOD300 is required for quantification (check SCOPE tab). The LOD is complemented by the modeling guidelines for quantification which can be found here: <https://app.plannerly.com/projects/8b8c3785-3dad-4867-91cb-f9b586ff665b/plan?section=1a2e95cd-96bf-4fd7-a630-31b76947a7ca>'. Sébastien Roux confirms, dated 9 months ago, that 'As-Built is on the contractor side'. There is a 'Add Comment' button at the bottom of this section.

At the bottom of the comments section, a message from Filipe Lima, dated a year ago, states: 'Filipe Lima changed status to 'Shared''. There is a 'Comments' section icon to the right of this message.

Figure A2. 1. Exemple des commentaires partagés sur le CDE (Roux et Lima, 2022)



The screenshot shows a 'Create Export' section with four options: 'Create PDF', 'Plan to Word', 'Scope to Excel', and 'IDS XML Spec', each with a 'Coming Soon!' message.

Below this is a 'Contracts' section. It has tabs for 'Exports' and 'Contracts', with 'Contracts' being the active tab. The table shows three tasks:

| TITLE | CREATED | ACCESS | APPROVALS | STATUS |
|--|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| FFC-LSN-ZZZ-ZZZZ-MM-SP-0001_BEP | Jul 12, 2022 6:12 PM | All Teams | 5/5 | APPROVED |
| FFC-LSN-ZZZ-ZZZZ-MM-SP-0001_BEP | May 3, 2022 12:09 PM | All Teams | 3/5 | DECLINED |
| FFC-LSN-ZZZ-ZZZZ-SP-ARQ-1000_DetailedScope | Mar 8, 2022 11:40 AM | All Teams | 2/2 | IN REVIEW |

Figure A2. 2. Exemple de l'approbation d'une tâche partagée (Roux et Lima, 2022).

| AGENDA TOPICS | | MEETING NOTES | ACTION REQUIRED | RESP. | DU DATE | QC |
|---------------|---|--|-----------------|-----------|---------|----|
| 1 | Revisão de colisões entre MECH / PLMB | | | ALL | | ✓ |
| 2 | Compatibilização do RSU com a Estabilidade <ul style="list-style-type: none"> ver Issue #302 | <ul style="list-style-type: none"> Situação será avaliada pelo Miguel Afonso que irá responder ao email da Lqre | | JSJ / LAQ | | |
| 3 | Abrir Issues NMX-04 | | | | | |
| 4 | Altura conduta do lixo 1.88 - confirmar se é possível subir | | | | | |
| 5 | Rever colisões nas slots do tecto do piso 0 entre LIGHT / MECH / PLMB | | | PRO / LSN | | |
| 6 | Confirmar se pode passar AVAC no auditório com Octávio | <ul style="list-style-type: none"> Confirmar com Octávio Inácio | | PRO / LSN | | |

Figure A2. 3. Exemple de l'attribution des incohérences aux équipes pour correction (Roux et Lima, 2022)

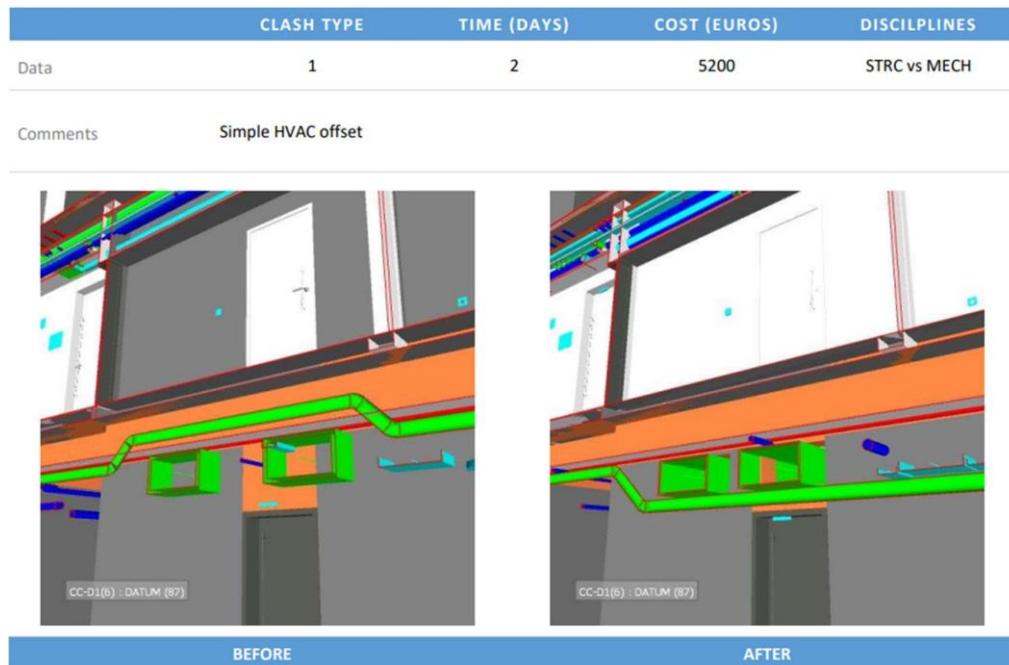


Figure A2. 4. Exemple d'incohérence type 1 (Roux et Lima, 2022).

Figure A2. 5. Exemple d'une incohérence type 2 (Roux et Lima, 2022).

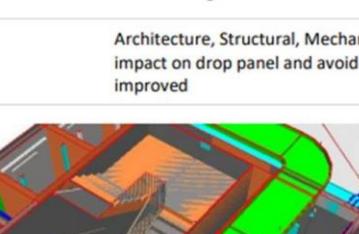
| CLASH TYPE | TIME (DAYS) | COST (EUROS) | DISCIPLINES |
|---|--|--|-------------|
| Data | 3 | 10 | 26000 |
| Comments | Architecture, Structural, Mechanical, Plumbing and Electrical joint effort; Shaft repositioned to reduce impact on drop panel and avoid a severe clash between Mechanical and structural core; MEP routings improved | | |
|  | |  | |
| BEFORE | | AFTER | |

Figure A2. 6. Exemple d'une incohérence type 3 (Roux et Lima, 2022).

ANNEXE 3



Figure A3. 1. Visualisation de l'atmosphère intérieure (Gerfen, 2018)

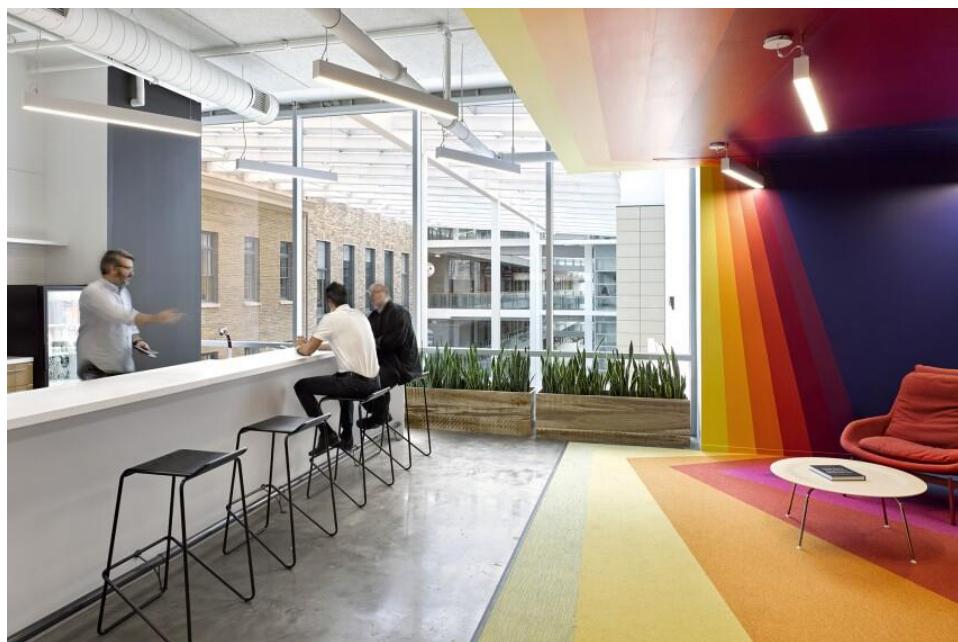


Figure A3. 2. Visualisation de l'atmosphère intérieure (Gerfen, 2018)

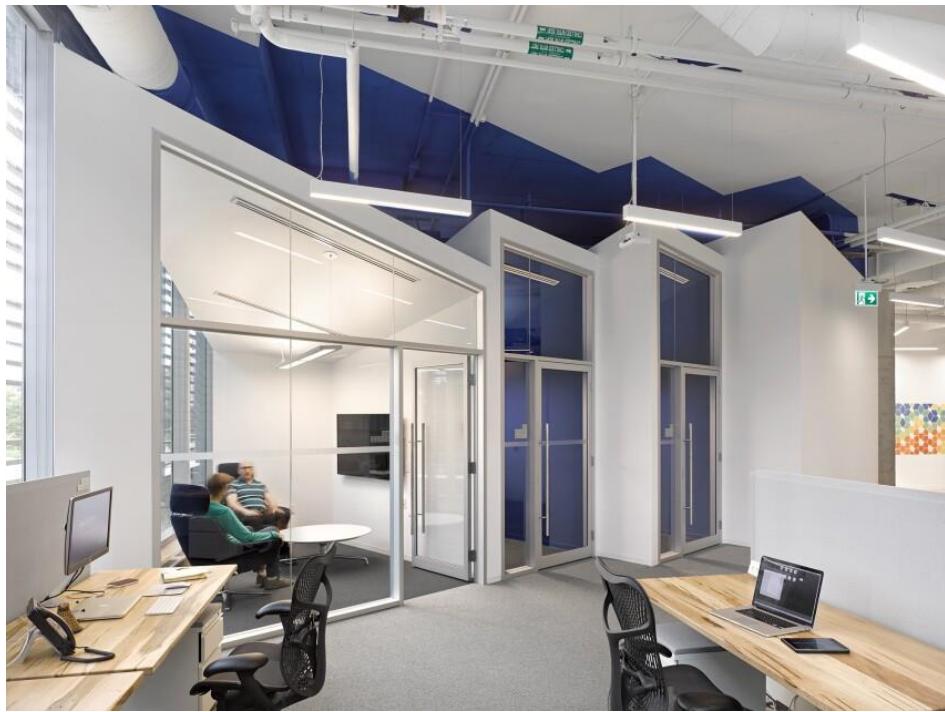


Figure A3. 3. Visualisation de l'atmosphère intérieure (Gerfen, 2018)



Figure A3. 4. Visualisation de l'atmosphère intérieure (Gerfen, 2018)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdelbary, M., Edkins, A. et Dorra, E., M. (2020). Reducing CRR in fast-track projects through BIM. *Journal of Information Technology in Construction*, volume 25, pages 140-160. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2020.009>
- Abdelsayed, M., Bucci, C. et Kucykowicz, M. (2022). *Favoriser les meilleures conditions d'exécution des projets de construction*. Ordre des ingénieurs du Québec. https://www.oiq.qc.ca/wp-content/uploads/2022/05/Guide-OIQ_Favoriser-meilleures-conditions-execution-construction_2022-02.pdf
- Abioye, S. O., Oyedele, L. O., Akanbi, L., Ajayi, A., Davila Delgado, J. M., Bilal, M., Akinade, O. O. et Ahmed, A. (2021). Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges. *Journal of Building Engineering*, volume 44(1). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103299>
- Achkar, E. (2017). *A BIM-integrated approach to Construction Quality Management* [Mémoire de master inédit, Eindhoven University of Technology]. <https://research.tue.nl/en/studentTheses/a-bim-integrated-approach-to-construction-quality-management>
- Ahmad Latiffi, A., Mohd, S., Kasim, N. et Fathi, M. S. (2013). Building Information Modeling (BIM) Application in Malaysian Construction Industry. *International Journal of Construction Engineering and Management*, volume 2, pages 1-6. <https://doi.org/10.5923/s.ijcem.201309.01>
- Akcay, C. et Işıkyıldız, S. (2020). Multi-objective optimization of time-cost-quality in construction projects using genetic algorithm. *Revista de la Construcción. Journal of Construction*, volume 19(3), pages 335-346. <https://doi.org/10.7764/rdlc.19.3.335-346>
- Alturki, R. (2021). Research Onion for Smart IoT-Enabled Mobile Applications. *Scientific Programming*, volume 2021(1). <https://doi.org/10.1155/2021/4270998>
- Arditi, D. et Alothaimeen, I. (2019). Overview of Multi-Objective Optimization Approaches in Construction Project Management. Dans N. Vakhania et F. Werner (dir.), *Multicriteria Optimization - Pareto-Optimality and Threshold-Optimality*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.88185>

- Association Pour l'Emploi des Cadres [APEC]. (2017). *Le BIM, tendance métiers dans le bâtiment.*
<https://corporate.apec.fr/files/live/sites/corporate/files/Nos%20%C3%A9tudes/pdf/BIM-tendances-metiers-dans-batiment.pdf>
- Aune, A. (1998). Quality and quality management at a crossroads. *Total Quality Management & Business Excellence*, 9, 6-12.
- Autodesk. (2019). *How Autodesk used Generative Design to create their Toronto office.*
<https://www.youtube.com/watch?v=ZQmfgGKtlXQ>
- Autodesk. (n.d). *ISO 19650, the Common Data Environment, and Autodesk Construction Cloud.* Autodesk. <https://www.autodesk.com/autodesk-university/article/ISO-19650-Common-Data-Environment-and-Autodesk-Construction-Cloud>
- Azhar, S. (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. *Leadership and Management in Engineering*, volume 11(3), pages 241-252. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127)
- Bakar, A., Haron, A. et Rahman, R., A. (2021). Building Information Modelling Execution Plan (BEP): A Comparison of Global Practice. *International Journal of Engineering Technology and Sciences*, volume 7, pages 63-73.
<https://doi.org/10.15282/ijets.7.2.2020.1005>
- Bank, L. C., McCarthy, M., Thompson, B. P. et Menassa, C. C. (2010, 15-17 Decembre). *Integrating Bim with system dynamics as a decision-making framework for sustainable building design and operation.* First International Conference on Sustainable Urbanization (ICSU 2010), Hong Kong.
<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=d992701cacdad30d5de82180c086fb40e8ca5c7a>
- Bassir, D., Lodge, H., Chang, H., Majak, J. et Chen, G. (2023). Application of artificial intelligence and machine learning for BIM: review. *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, volume 14(2023).
<https://doi.org/10.1051/smdo/2023005>
- Basu, R. (2013). Managing quality in projects: An empirical study. *International Journal of Project Management*, volume 32(1), pages 178-187.
<https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.02.003>
- Beladi, R. (2023, 5 décembre). Report on Algeria Construction Market Overview (2022-2027). *International Supermarket News Magazine*, article.
<https://internationalsupermarketnews.com/archives/14059>

- Bernard, S. (2024, 30 mai). *Qu'est ce qu'un Environnement de Données Commun ou CDE ?* axeobim. <https://axeobim.fr/environnement-de-donnees-commun-cde-role-et-benefices/>
- Biju, J. (2022, 19 juillet). *How to Manage the Common Data Environment and why it matters?* medium. <https://medium.com/@Desapex/how-to-manage-the-common-data-environment-and-why-it-matters-b1a10d1c5719>
- Blaikie, N. W. H. (2010). *Designing social research : the logic of anticipation* (2^e éd.). Polity Press. <https://search.worldcat.org/fr/title/798874599>
- Borkowski, A. S. (2023). A Literature Review of BIM Definitions: Narrow and Broad Views. *Technologies, volume 11*(6). <https://doi.org/doi:10.3390/technologies11060176>
- Boton, C. et Kubicki, S. (2014, 18-20 juin). *Maturité des pratiques BIM : Dimensions de modélisation, pratiques collaboratives et technologies*. Interaction des Maquettes Numériques. Séminaire de Conception Architecturale Numérique (SCAN'14), Luxembourg, Luxembourg. <https://hal.science/hal-01025675v1/document>
- Câmara municipal de Lisboa. (2018a). *Operação Integrada de Entrecampos (Opération Intégrée Entrecampos)*. <https://www.am-lisboa.pt/documentos/1532191722R6yTJ7pt1Rx39NC9.pdf>
- Câmara municipal de Lisboa. (2018b). *Recomendação 026/03 —1^a e 3^a CP— Sobre a Operação Integrada de Entrecampos (Recommandation 026/03 —1re et 3e CP— concernant l'Opération Intégrée d'Entrecampos)*. <https://am-lisboa.pt/documentos/1531413877I4jAQ4cv6Cl39CT2.pdf>
- Chan, A. P. C., Scott, D. et Chan, A. P. L. (2004). Factors affecting the success of a construction project. *Journal of Construction Engineering and Management, volume 130*(1), pages 153-155. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2004\)130:1\(153\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2004)130:1(153))
- Charantimath, P. M. (2011). *Total quality management* (2^e éd.). Dorling KIndersley (India). https://search.worldcat.org/fr/title/904584389?page=endnote&client=worldcat.org-detailed_record
- Chelson, D., E. (2010). *The effects of building information modeling on construction site productivity* (publication n^o 3426238) [thèse de doctorat inédite, University of Maryland, College Park]. <https://www.proquest.com/docview/762401054>
- Chen, L. J. et Luo, H. (2014). A BIM-based construction quality management model and its applications. *Automation in Construction, volume 46*(1), pages 64-73. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.009>
- Chen, Y., Okudan, G. E. et Riley, D. R. (2010). Decision support for construction method selection in concrete buildings: Prefabrication adoption and optimization. *Automation*

- in Construction, volume 19(6), pages 665-675.*
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.02.011>
- Cheng, M. Y. et Tran, D. H. (2015). Opposition-based Multiple Objective Differential Evolution (OMODE) for optimizing work shift schedules. *Automation in Construction, volume 55*, pages 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.021>
- Cheng, Y. M. (2018). *Building Information Modeling for Quality Management*. ICEIS 2018 - 20th International Conference on Enterprise Information Systems, Funchal, Madeira, Portugal. <https://doi.org/10.5220/0006796703510358>
- Chung, H. W. (1999). *Understanding quality assurance in construction : a practical guide to ISO 9000 for contractors*. E & FN Spon.
<http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/15772/1/10.pdf>
- Commission de la construction de Québec. (2025). *L'industrie de la construction*.
<https://www.ccq.org/fr-CA/En-tete/qui-sommes-nous/industrie-de-la-construction>
- Das, A., Das, H. S. et Das, H. S. (2021). Impact of Cuckoo Algorithm in Speech Processing. Dans N. Dey (dir.), *Applications of Cuckoo Search Algorithm and its Variants* (p. pages 207-228). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5163-5_9
- Davies, N., Wenman, L., Woddy, P., Purvis, R. et Jackson, R. (2015). *AEC (UK) BIM Technology Protocol*. <https://aecuk.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/06/aecukbimtechnologyprotocol-v2-1-1-201506022.pdf>
- Demeestère, R. (2005). Pour une vue pragmatique de la comptabilité. *Revue française de gestion, volume 157(4), pages 103-114.*
https://ideas.repec.org/a/cai/rfglav/rfg_157_0103.html
- Demirel, H. O., Goldstein, M. H., Li, X. et Sha, Z. (2024). Human-Centered Generative Design Framework: An Early Design Framework to Support Concept Creation and Evaluation. *International Journal of Human–Computer Interaction, volume 40(4)*, pages 933-944. <https://doi.org/10.1080/10447318.2023.2171489>
- Demski, J. (2024, 17 novembre). Understanding Quality Control in Construction. *Quickbase blog*. <https://www.quickbase.com/blog/quality-control-in-construction>
- Denzin, N. K. et Lincoln, Y. S. (2005). Introduction: The Discipline and Practice of Qualitative Research. Dans *The Sage handbook of qualitative research* (3^e éd., p. 1-32). Sage Publications Ltd. https://uk.sagepub.com/sites/default/files/upm-binaries/40425_Chapter1.pdf
- Ding, L., Zhou, Y. et Akinci, B. (2014). Building Information Modeling (BIM) application framework: The process of expanding from 3D to computable nD. *Automation in Construction, volume 46, pages 82-93.*
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.04.009>

- Domingues, L. F. et Santos, E. T. (2020). *Improving the Design Process Quality Using BIM: A Case Study*. 18th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering ICCCBE 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51295-8_32
- Doukari, O., Seck, B. J. et Greenwood, D. (2022). *The efficient generation of 4D BIM construction schedules: A case study of the Nanterre 2 CESI project in France*. Frontiers in Built Environment. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.998309>
- Duarte-Vidal, L., Herrera, R. F., Atencio, E. et Muñoz-La Rivera, F. (2021). Interoperability of Digital Tools for the Monitoring and Control of Construction Projects. *Applied Sciences, volume 11(21)*. <https://doi.org/10.3390/app112110370>
- Dźwigoł, H. (2023). Case studies as a research method in management science. *Scientific Papers of Silesian University of Technology Organization and Management Series, volume 2023(180)*. <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2023.180.6>
- Eastman, C., Sacks, R., Lee, G. et Teicholz, P. (2018). *BIM handbook : a guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers* (3^e éd.). Wiley. <https://www.benardmakaa.com/wp-content/uploads/2021/11/BIM-Handbook -A-Guide-to-Building-Information-Modeling-for-Owners-Designers-Engineers-Contractors-and-Facility-Managers-Wiley-2018.pdf>
- Eber, W. (2020). Potentials of artificial intelligence in construction management. *Organization, Technology and Management in Construction: an International Journal, 12(1)*, 2053-2063. <https://doi.org/10.2478/otmcj-2020-0002>
- Eischet, O. (2023, 26 janvier). *BIM Maturity Levels Explained*. Medium. <https://medium.com/specter-automation-insights/bim-maturity-levels-explained-922060c163ef>
- Eisenhardt, K. M. et Graebner, M. E. (2007). Theory building from cases: Opportunities and challenges. *Academy of Management Journal, volume 50(1)*, pages 25-32. <https://doi.org/10.5465/AMJ.2007.24160888>
- Elbeltagi, E. (2007, 7-11 Avril). *Evolutionary Algorithms for Large Scale Optimization In Construction Management*. The Future Trends in the Project Management, Riyadh, KSA. https://www.academia.edu/67998850/Evolutionary_Algorithms_for_Large_Scale_Optimization_In_Construction_Management
- Ellis, G. (2023, 21 décembre). The Evolution of BIM Dimensions: 3D, 4D, 5D & Beyond. <https://www.autodesk.com/blogs/construction/bim-dimensions/>
- Flynn, B. B., Schroeder, R. G. et Sakakibara, S. (1994). A framework for quality management research and an associated measurement instrument. *Journal of Operations*

Management, volume 11(4), pages 339-366. [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(97\)90004-8](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(97)90004-8)

Fortin, M. F. et Gagnon, J. (2022). *Fondements et étapes du processus de recherche : méthodes quantitatives et qualitatives* (4e édition^e éd.). Chenelière éducation.

Fortune Business Insight. (2025, 12 mai). *AI in Construction Market Size*. <https://www.fortunebusinessinsights.com/ai-in-construction-market-109848>

Gerfen, K. (2018, 12 janvier). *Autodesk MaRS Office*. The architect magazine. https://www.architectmagazine.com/project-gallery/autodesk-mars-office_o

Grand, F., Ortas, L., Picinbono, G. et Valton, P. (2018). La Gestion des données dans les processus BIM. *Techniques de l'ingénieur*. <https://www.techniques-ingenieur.fr/res/pdf/extract/Encyclopedia/c3204?offerId=ti255>

Guay, J. (2010). La qualité dans la réalisation des projets de bâtiment. *Le bulletin revay*, volume 29(3). <https://revay.com/wp-content/uploads/2020/10/v29no3fr.pdf>

Guéneau, J. (2019). Le métier d'architecte et le BIM. Nouvelles répartitions des tâches et des responsabilités dans les métiers de la création. *Techniques & culture, Volume Varia*. <https://doi.org/10.4000/tc.10327>

Guichet-emplois Canada. (2025, 14 janvier). *Construction (SCIAN 23): Québec, 2024*. Guichet-emplois Canada. <https://www.guichetemplois.gc.ca/analyse-tendances/rapports-marche-travail/quebec/construction>

Gupta, S., Sharma, P. et Kumar, L. (2017). Identifying and Assessing the Usefulness and Validity of 6D and 7D BIM in Construction Practices. *International journal of construction Engineering and planning*, volume 3(2), pages 22-31. <https://doi.org/10.37628/IJCE.V3I2.233>

Gurmu, A. T. et Mahmood, M., N. (2024). Critical Factors Affecting Quality in Building Construction Projects: Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Construction Engineering and Management*, volume 150(3). <https://doi.org/10.1061/JCEMD4.COENG-13794>

Harrison, C. et Thurnell, D. (2014, 3-5 Septembre). *5D BIM in a consulting quantity surveying environment*. Building a Better New Zealand conference 2014, Auckland, New Zeland. <https://www.researchbank.ac.nz/items/066f9359-3a0c-4c98-a36b-90ec20203200>

Hartmann, T. (2010, 16-18 novembre). *Detecting design conflicts using building information models: a comparative lab experiment*. CIB W78 2010, 27th International Conference Applications of IT in the AEC Industry, Le Caire, Egypte. <https://itc.scix.net/pdfs/w78-2010-57.pdf>

Hendel, M., Le Couédic, D. et Université de Bretagne Occidentale. (2011). *Qualité, qualité architecturale et démarche qualité dans le secteur de la construction en Algérie, 2000-2011* (publication n° 2011BRES1007) [thèse de doctorat inédite, Université de Bretagne Occidentale]. WorldCat.

Hilgemberg, A. (2024). *The Value of BIM for Owners: A multi-stakeholder study focused on an office building* [Mémoire de master inédite, University of Minho]. <https://bimaplus.org/wp-content/uploads/2024/10/21-2024-AlineHilgembergdaCosta.pdf>

Holkar, R. N. et Pataskar, S. (2021). Quality Management In Construction Industry By Using Building Information Modelling (BIM). *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, volume 23(09), pages 265-276. <https://doi.org/10.51201/JUSST/21/08391>

Holzmann, V. et Lechiara, M. (2022). Artificial Intelligence in Construction Projects: An Explorative Study of Professionals' Expectations. *European Journal of Business and Management Research*, volume 7(3), pages 151-162. <https://doi.org/10.24018/ejbmр.2022.7.3.1432>

Hurtado, K. et Sullivan, K. (2012). How to measure the benefits of BIM — A case study approach. *Automation in Construction*, volume 24(2012), pages 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.02.008>

Ibidapo, T. A. (2022). Quality Management. Dans T. A. Ibidapo (dir.), *From Industry 4.0 to Quality 4.0: An Innovative TQM Guide for Sustainable Digital Age Businesses* (p. pages 367-380). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-04192-1_16

Janga Reddy, M. et Nagesh Kumar, D. (2007). An efficient multi-objective optimization algorithm based on swarm intelligence for engineering design. *Engineering Optimization*, volume 39(1), pages 49-68. <https://doi.org/10.1080/03052150600930493>

Kaner, I., Sacks, R., Kassian, W. et Quitt, T. (2008). Case studies of BIM adoption for precast concrete design by mid-sized structural engineering firms. *Electronic Journal of Information Technology in Construction*, volume 13(2008), pages 303-323. <https://www.itcon.org/paper/2008/21>

Keane, K. (2017, 21 septembre). *Autodesk's Move to MaRS Complete*. Architect Magazine. https://www.architectmagazine.com/practice/autodesks-move-to-mars-complete_o

Khalesi, H., Balali, A., Valipour, A., Antuchevičienė, J., Migilinskas, D. et Zigmund, V. (2020). Application of Hybrid SWARA–BIM in Reducing Reworks of Building Construction Projects from the Perspective of Time. *Sustainability*, volume 12(21). <https://doi.org/10.3390/su12218927>

- Koutamanis, A. (2020). Dimensionality in BIM: Why BIM cannot have more than four dimensions? *Automation in Construction*, volume 114(2020). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103153>
- Lima, F. et Roux, S. (2022). *Filipe Lima and Sébastien Pinto da França Roux from LIMSEN in the Technology in Practice Lounge*. <https://www.youtube.com/watch?v=gtaHacmAHdc>
- Lima, F., Roux, S., Hipólito, A., Feio, C. et Silva, A. (2024, 8-10 mai). *Projeto da sede da Fidelidade: Ciclo de vida BIM do programa preliminar à obra*. 5º Congresso Português de Building Information Modelling, Braga, Portugal.
- Lindholm, J., Johansson, P. et Yitmen, I. (2025). Toward a BIM information delivery framework based on common data environment. *Construction Innovation*, volume 25(7), pages 139-157. <https://doi.org/10.1108/CI-06-2024-0185>
- Lu, W., Zhang, D. et Rowlinson, S. (2013, 2-4 Septembre). *BIM collaboration: A conceptual model and its characteristics*. 29th Annual Association of Researchers in Construction Management Conference, ARCOM 2013, Amsterdam, Pays-Bas. https://www.arcom.ac.uk/-docs/proceedings/ar2013-0025-0034_Lu_Zhang_Rowlinson.pdf
- McCarthy, J., Minsky, M. L., Rochester, N. et Shannon, C. E. (2006). A Proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence, August 31, 1955. *AI Magazine*, volume 27(4), pges 12-14. <https://doi.org/10.1609/aimag.v27i4.1904>
- McPartland, R. (2017, septembre). *What is a federated Building Information Model?* National Building Specification. <https://www.thenbs.com/knowledge/what-is-a-federated-building-information-model>
- Mésároš, P. et Mandičák, T. (2017). Exploitation and Benefits of BIM in Construction Project Management. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 245(6). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/6/062056>
- Miller, M. D. (1998). *Quality building projects through constructability* (publication n° DTIC ADA359909) [mémoire de master inédite, University of Texas at Austin]. <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA359909.pdf>
- Mills, T. H. (2010, 16-18 novembre). *Achieving BIM And CIM Implementation Through Quality Management*. CIB W78 2010: 27th International Conference, Le Caire, Egypte. <https://itc.scix.net/pdfs/w78-2010-119.pdf>
- Mirshokraei, M., De Gaetani, C. et Migliaccio, F. (2019). A Web-Based BIM-AR Quality Management System for Structural Elements. *Applied Sciences*, volume 9(19). <https://doi.org/10.3390/app9193984>

- Mucci, T. (2024, octobre). *The history of AI*. IBM. <https://www.ibm.com/think/topics/history-of-artificial-intelligence>
- Nagy, D., Lau, D., Locke, J., Stoddart, J., Villaggi, L., Wang, R., Zhao, D. et Benjamin, D. (2017, 22-24 mai). *Project Discover: An Application of Generative Design for Architectural Space Planning*. 8th annual Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design (SimAUD), Toronto, Canada. <https://doi.org/10.22360/simaud.2017.simaud.007>
- Nguyen, P. T., Nguyen, T. A., Cao, T., Vo, K. D., Huynh, V. D. B., Nguyen, Q. H. T. T., Phan, P. T. et Le, L. P. (2018). Construction Project Quality Management using Building Information Modeling 360 Field. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, volume 9(10), pages 228-233. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2018.091028>
- Nilsson, N. (2010). *The quest for artificial intelligence: A history of ideas and achievements*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511819346>
- Omar, M. F., Abdullah, M. A. H., Rashid, N. A., Fatt, H. L., Rani, A. L. A. et Ishak, H. (2023, 9-10 décembre). *Competitiveness of Industrialised Building System (IBS) and Conventional Method in Construction Industry in Terms of Quality*. 4th international conference on civil and environmental engineering (CENVIRON2021): Challenges and Opportunities in the Post-Covid 19 World: Towards a Resilient Nation, Perlis, Malaysia. <https://doi.org/10.1063/5.0133525>
- Opoku, A., Ahmed, V. et Akotia, J. (2016). Choosing an appropriate research methodology and method. Dans *Research Methodology in the Built Environment* (1^e éd.). Routledge. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9781315725529-4/choosing-appropriate-research-methodology-method-alex-opoku-vian-ahmed-julius-akotia>
- Organisation Internationale de Normalisation [ISO]. (2015). *ISO 9000:2015*. Organisation Internationale de Normalisation. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/45481/7a88f2b85cec4438a96de8da61970d1c/ISO-9000-2015.pdf>
- Organisation Internationale de Travail [OIT]. (2020). *Developing the construction industry for employment-intensive infrastructure investments*. Organisation internationale de travail. <https://www.ilo.org/publications/developing-construction-industry-employment-intensive-infrastructure>
- Pan, Y. et Zhang, L. (2023). Integrating BIM and AI for Smart Construction Management: Current Status and Future Directions. *Archives of Computational Methods in Engineering*, volume 30(2), pages 1081-1110. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09830-8>

- Peshkov, V. V., Doroshenko, T. G. et Sukhanova, I. A. (2019, 25 avril). Contract bidding and quality of industrial and civil construction Dans. Investments, Construction, Real Estate: New Technologies and Special-Purpose Development Priorities, Irkutsk, Russie. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/667/1/012076>
- Pesqueux, Y. (2020). Définition de la notion de qualité, chronologie et fondements de la gestion de la qualité. <https://shs.hal.science/halshs-02615732/document>
- Pham, V. H. et Ngoc Q. K. (2025). Biologically inspired optimization for multi-objective construction management: the MOGPOO model. *Engineering, Construction and Architectural Management*. <https://doi.org/10.1108/ECAM-05-2024-0619>
- Piaseckienė, G. (2022). Dimensions of BIM in literature: Review and analysis. *Mokslas – Lietuvos ateitis / Science – Future of Lithuania, volume 14*, pages 1-11. <https://doi.org/10.3846/mla.2022.16071>
- Plannerly. (2022). *Étude de cas BIM-Gestion BIM sur un grand projet (développement à usage mixte)*. Plannerly. <https://www.youtube.com/watch?v=4cLD03fSnTg>
- Poirier, E. A., Forques, D. et Staub-French, S. (2017). Understanding the impact of BIM on collaboration: a Canadian case study. *Building Research & Information, volume 45(6)*, pages 681-695. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1324724>
- Preidel, C., Borrman, A. et Beetz, J. (2021). Prüfung der Einhaltung von Normen und Richtlinien mittels BIM. Dans *Building information modeling : Technologische Grundlagen und industrielle Praxis* (p. 443-462). https://doi.org/10.1007/978-3-658-33361-4_23
- Preidel, C., Borrman, A., Oberender, C. H. et Tretheway, M. (2016). *Seamless Integration of Common Data Environment Access into BIM Authoring Applications: the BIM Integration Framework*. 11th European Conference on Product and Process Modelling (ECPHM 2016), Limassol, Chypre. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4487.4488>
- Project Management Institute [PMI]. (2016). *Construction Extension to the PMBOK Guide* (3^e éd.). Project Management Institute. <http://www.books24x7.com/marc.asp?bookid=119829>
- Project Management Institute [PMI]. (2017). *Guide du corpus des connaissances en management de projet (guide PMBOK)* (6^e éd.). Project Management Institute, Inc.
- Qiu, X. (2011, 29-31 juillet). *Building Information Modelling (BIM) Adoption of Construction Project Management Based on Hubei Jingzhou Bus Terminal Case*. 2011 International Conference on Business Computing and Global Informatization, Shanghai, China. <https://doi.org/10.1109/BCGIn.2011.176>

- Reddy, K. P. (2012). *BIM for building owners and developers : making a business case for using BIM on projects*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119572602>
- Rehman, M. A. U., Chaabane, A. et Khan, S. A. (2021, 14 juillet). *Review of Construction Supply Chain Optimization Papers for Performance Improvement*. Proc. 29th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC), Lima, Peru. <https://doi.org/10.24928/2021/0132>
- Rich, E., Knight, K. et Nair, S. B. (2010). *Artificial intelligence* (3^e éd.). Tata McGraw Hill.
- Robert, P., Rey-Debove, J. et Rey, A. (2010). Le petit Robert : dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française. Dans (Nouv. éd. du Petit Robert^e éd.). Dictionnaires Le Robert.
- Roux, S. et Lima, F. (2022). *Managing a 310,000 sqm Mixed-use Development with Plannerly*. <https://plannerly.com/wp-content/uploads/2022/12/BIM-Case-Study-by-Limsen-Consultants.pdf>
- Sacks, R., Girolami, M. et Brilakis, I. (2020). Building Information Modelling, Artificial Intelligence and Construction Tech. *Developments in the Built Environment, volume 4*. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100011>
- Saini, R. (2017, 11 novembre). *After designing Autodesk Toronto Office, Project Discover goes to design Au 2017 Exhibit Hall. Graphic Speak*. <https://gfxspeak.com/archives/designing-autodesk-discover/>
- Saunders, M. et Tosey, P. (2013). *The Layers of Research Design*. The association for NLP. <https://www.csd.uoc.gr/~hy109/resources/layers.pdf>
- Saunders, M. N. K., Lewis, P. et Thornhill, A. (2012). *Research methods for business students* (6^e éd.). Pearson.
- Seyis, S. et Özkan, S. (2024). Analysing the added value of common data environments for organisational and project performance of BIM-based projects. *Journal of Information Technology in Construction, volume 29*, pages 247-263. <https://doi.org/10.36680/J.ITCON.2024.012>
- Sheikh, A. A., Ikram, M., Ahmad, R. M., Qadeer, H. et Nawaz, M. (2019). Evaluation of key factors influencing process quality during construction projects in Pakistan. *Grey Systems: Theory and Application, volume 9(3)*, pages 321-335. <https://doi.org/10.1108/GS-01-2019-0002>
- Shewale, M., Khartode, B., Shinde, N. et Sawadatkar, S. (2023). Building Information Modeling (BIM) Process and Assessment methods. *E3S Web of Conferences, volume 405*(2023). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340504011>

- Sholeh, M. N., Fauziyah, S. et Khasani, R. R. (2020). Effect of Building Information Modeling (BIM) on reduced construction time-costs: a case study. *E3S Web of Conferences, volume 202*(2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020202012>
- Simion-Melinte, C. (2013). Quality management in construction I. ways to a new approach of quality [Article]. *Quality - Access to Success, volume 14*(132), pages 73-75. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84873583364&partnerID=40&md5=13ea87b85755e478e640091eedfc1545>
- Sinenko, S., Hanitsch, P., Aliev, S. et Volovik, M. (2020). The implementation of BIM in construction projects. *E3S Web of Conferences, volume 164*(2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016408002>
- Smith, P. R. (2018). Collecting Sufficient Evidence When Conducting a Case Study. *The Qualitative Report, volume 23*(5), pages 1043-1048. <https://doi.org/10.46743/2160-3715/2018.3188>
- Société québécoise des infrastructures [SQI]. (2024). *Feuille de route gouvernementale pour la modélisation des données des infrastructures (2021-2026)*. https://www.sqi.gouv.qc.ca/fileadmin/fdr_bim_gouv/feuille_de_route_actualisee_au_31_mars_2024.pdf
- Stake, R. E. (2003). Case studies. Dans N. K. Denzin et Y. S. Lincoln (dir.), *Strategies of qualitative inquiry* (2^e éd., p. 134-164). Sage Publications, Inc. <https://www.sfu.ca/~palys/Stake2003-CaseStudies.pdf>
- Stanley, R. et Thurnell, D. (2014). The benefits of, and barriers to, implementation of 5D BIM for quantity surveying in New Zealand. *Australasian Journal of Construction Economics and Building, volume 14*, pages 105-117. <https://doi.org/10.5130/AJCEB.v14i1.3786>
- Stoddart, J., Nagy, D. et Villaggi, L. (2017). *MaRS Generative Design*. https://www.youtube.com/watch?v=HmpY9s_XkHc
- Stryker, C. et Kavlakoglu, E. (2024, 9 août). *What is AI?* <https://www.ibm.com/topics/artificial-intelligence>
- Succar, B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction, volume 18*(3), pages 357-375. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003>
- Sudakova, K., Remeš, J. et Tichá, A. (2024). Building Execution Plan as an effective document for Building Information Modelling. *Procedia Computer Science, volume 239*(2024), pages 556-562. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.06.207>

- Taboada, I., Daneshpajouh, A., Toledo, N. et de Vass, T. (2023). Artificial Intelligence Enabled Project Management: A Systematic Literature Review. *Applied Sciences*, volume 13(8), pages 5014 - 5037. <https://doi.org/10.3390/app13085014>
- Talebi, S. (2014, 9-10 octobre). *Rethinking the project development process through use of BIM*. 2nd BIM International Conference, Challenges to Overcome, Lisbonne, Portugal. <https://salford-repository.worktribe.com/output/1423879>
- Turing, A. (1950). I.—COMPUTING MACHINERY AND INTELLIGENCE. *Mind*, volume LIX(236), pages 433-460. <https://doi.org/10.1093/mind/LIX.236.433>
- Van Eck, N. et Waltman, L. (2009). *VOSviewer Manual*. VosViewer. https://www.vosviewer.com/documentation/Manual_VOSviewer_1.0.1.pdf
- Vizcarguenaga-Aguirre, I. et López-robles, J. R. (2020, 20-21 février). *Mono, mixed or multiple strategy approach: a descriptive study of the latest published articles in the International Journal of Project Management*. 3rd International Conference on Research and Education in Project Management – REPM 2020, Bilbao, Espagne. http://eprints.rclis.org/40506/1/2020_Vizcarguenaga-Aguirre_et_al_Researches_REPM2020.pdf
- Walmsley, K. et Villaggi, L. (2018). *Generative Urban Design: a collaboration between Autodesk Research and Van Wijnen*. Autodesk university. https://static.au-uw2-prd.autodesk.com/Class_Handout_CS239262_Generative_Urban_Design_a_collaboration_between_Autodesk_Research_and_Van_Wijnen_Kean_Walmsley.pdf
- Wang, H., Meng, X. et Zhu, X. (2022). Improving knowledge capture and retrieval in the BIM environment: Combining case-based reasoning and natural language processing. *Automation in Construction*, volume 139(2022). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104317>
- Wang, P. (2025). Optimisation of decision making for construction projects of assembly buildings based on improved PSO algorithm. *Archives of Civil Engineering*, volume LXXI(1), pages 113-113. <https://doi.org/10.24425/ace.2025.153324>
- Wang, Q., Xu, X., Ding, X., Chen, T. et Deng, R. (2023). Quality Evaluation Approach for Prefabricated Buildings Using Ant Colony Algorithm and Simulated Annealing Algorithm to Optimize the Projection Pursuit Model. *Buildings*, volume 13(9). <https://doi.org/10.3390/buildings13092307>
- Wenfa, H. et Xinhua, H. (2014). An Innovative Time-Cost-Quality Tradeoff Modeling of Building Construction Project Based on Resource Allocation. *The Scientific World Journal*, volume 2014(1). <https://doi.org/10.1155/2014/673248>

- Westland, J. (2024, 17 novembre). The Quality Assurance Process: Roles, Methods & Tools. *The Project Manager Blog*. <https://www.projectmanager.com/blog/quality-assurance-and-testing>
- Winge, S., Albrechtsen, E. et Mostue, B. A. (2019). Causal factors and connections in construction accidents. *Safety Science*, volume 112, pages 130-141. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.10.015>
- Xu, C., Chen, G. et Hua, H. (2020). Quality problems and countermeasures in construction process. *Journal of Architectural Environment & Structural Engineering Research*, volume 3, pages 24-27. <https://doi.org/10.30564/jaeser.v3i1.1878>
- Yang, A., Han, M., Zeng, Q. et Sun, Y. (2021). Adopting Building Information Modeling (BIM) for the Development of Smart Buildings: A Review of Enabling Applications and Challenges. *Advances in Civil Engineering*, volume 2021, pages 1-26. <https://doi.org/10.1155/2021/8811476>
- Yin, R. K., Campbell, D. T. et Publications;, S. (2018). *Case study research and applications : design and methods* (6^e éd.). SAGE Publications, Inc. <https://uk.sagepub.com/en-gb/eur/case-study-research-and-applications/book250150>
- Zhang, D. et Gao, Z. (2013). *Project Time and Cost Control Using Building Information Modeling*. ICCREM 2013. <https://doi.org/doi:10.1061/9780784413135.052>
- Zollinger, W. R., Sutton, D. L., Montler, G. et Seifried, M. M. (2010). BIM: Sharing project data reduces conflict. *AACE International Transactions*, volume 1, pages 37-53. https://www.researchgate.net/publication/281570939_BIM_Sharing_project_data_reduces_conflict
- Zouinar, M. (2020). Évolutions de l'Intelligence Artificielle : quels enjeux pour l'activité humaine et la relation Humain-Machine au travail ? *Activites*, volume 17(1). <https://doi.org/10.4000/activites.4941>