

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

IMPLÉMENTATION DES TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES DANS LA GESTION DES
PROJETS DE CONSTRUCTION DURABLE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN GESTION DE PROJET

PAR
CHAIMA BOUZIANE

Mars 2024

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

SOMMAIRE

La gestion de projets de construction est intrinsèquement complexe, et malgré les avancées dans d'autres secteurs grâce à l'intégration des technologies numériques, le secteur de la construction demeure à la traîne en matière de digitalisation. Ce mémoire examine l'incorporation des technologies numériques dans les projets de construction à travers une revue de la littérature récente. Plus précisément, il se penche sur la convergence technologique de ces approches et outils, soulignant l'amélioration de la gestion de projets de construction. Les technologies principales abordées sont le Building Information Modeling (BIM) et le jumeau numérique, avec des intégrations à diverses technologies émergentes. Le BIM s'est révélé efficace dans le domaine du confort thermique et de l'efficacité énergétique des bâtiments. Cependant, la littérature actuelle ne fournit pas une revue complète du concept de jumeau numérique en matière de confort thermique et de consommation d'énergie. L'industrie de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction adopte de plus en plus une collaboration hautement efficace, soulignant la nécessité d'appliquer le BIM dans le cloud, avec un intérêt particulier pour l'application de la technologie blockchain et du jumeau numérique. Face à la baisse de productivité dans le secteur de la construction par rapport à l'industrie manufacturière, cette recherche explore l'utilisation maximale d'outils technologiques en construction, en les intégrant avec le BIM et le jumeau numérique. L'objectif est de démontrer l'utilité de chaque convergence technologique à chaque étape du cycle de vie d'un projet, en évaluant leur impact sur l'efficacité énergétique, opérationnelle et l'optimisation significative d'un projet de construction. Une approche exploratoire programmatique abductive, basée sur une enquête, guide la recherche qualitative et quantitative, adoptant une approche logique de résolution de problèmes. Les résultats obtenus mettent en lumière la contribution des technologies numériques dans l'industrie de la construction, fournissant des indications de leur impact sur l'efficacité énergétique, opérationnelle et l'optimisation, tout en soulignant les défis d'optimisation et le besoin d'avancées technologiques dans le secteur de la construction.

Mots clés : Gestion de projet de construction, Technologies numériques, BIM, Digital Twins, Efficacité énergétique et opérationnelle, Durabilité, Optimisation, Intelligence Artificielle, Construction 4.0, Construction 5.0.

TABLE DES MATIÈRE

SOMMAIRE	ii
TABLE DES MATIÈRE.....	XIII
LISTE DES TABLEAUX	XIV
LISTE DES FIGURES.....	XV
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	XVI
REMERCIEMENT	XVII
CHAPITRE 1 - PARTIE INTRODUCTIVE	17
1.1 CONVERSATION.....	17
1.1.1 La transition numérique.....	18
1.1.2 L'industrialisation de la construction	20
1.1.3 La construction durable	27
1.2 PERSPECTIVES ET DEBATS	29
1.2.1 Le BIM une approche transformant l'industrie de la construction.....	29
1.2.2 L'intégration de l'approche BIM au cycle de vie d'un projet	30
1.2.3 La perspective de la gestion centralisée des modèles numériques	31
1.2.4 Implications futures du jumeau numérique dans la construction.....	33
1.3 PROBLEMATIQUE	35
1.4 LOCALISATION DE LA RECHERCHE	38
1.5 OBJECTIFS ET QUESTIONS DE RECHERCHE	41
1.6 PERIMETRE DE LA RECHERCHE	43

CHAPITRE 2 - REVUE DE LITTÉRATURE	45
2.1 LE BUILDING INFORMATION MODELING (X1).....	45
2.1.1 Évolution et application du Building Information Modeling	46
2.1.2 La synergie Building information modeling Durabilité Économie circulaire.....	52
2.1.3 Convergence des blockchains et du building information modeling.....	55
2.1.4 Le Building information modeling au service de l'analyse énergétique	60
2.2 LE JUMEAU NUMÉRIQUE (X2).....	61
2.2.1 Évolution et applications des jumeaux numériques.....	64
2.2.2 La synergie Jumeau Numérique Efficacité énergétique Confort thermique	65
2.2.3 La convergence de jumeau numérique et la Block chaine.....	70
2.2.4 Une feuille de route pour les technologies perturbatrices.....	73
2.3 L'EFFICACITE ENERGETIQUE ET OPERATIONNEL (Y1).....	76
2.3.1 La modélisation de l'efficacité énergétique :.....	77
2.3.2 Efficacité énergétique et opérationnel dans les bâtiments écologiques	78
2.4 OPTIMISATION (Y2).....	81
2.4.1 Optimisation et conception architectural algorithmique.....	82
2.4.2 L'intelligence artificielle (IA)	85
2.4.2.1 <i>Application des sous-domaines de l'IA dans l'industrie de la construction</i>	85
2.4.2.2 <i>Optimisation de la gestion de projet de construction au travers l'IA</i>	87
2.4.2.3 <i>L'optimisation du management de projet grâce à l'IA</i>	89
2.5 L'INDUSTRIE DE CONSTRUCTION (Z).....	92
2.5.1 La transformation numérique des entreprises et PME.....	93
2.5.2 La technologie digital au sein des entreprises de construction	96
2.5.3 La synergie entre la digitalisation et la durabilité dans les entreprises de construction .	99
2.5.4 De l'industrie 4.0 à l'évolutionnisme de l'industrie 5.0	99
2.5.5 Optimisation de la construction via la transition vers la Construction 5.0	101
2.6 MISE EN EVIDENCE DES RELATIONS ENTRE LES FACTEURS.....	104
2.6.1 Synthèse des propositions.....	105
2.6.2 Cadre conceptuel de la recherche	107
2.6.2 Résumé des objectifs, questions de recherche et propositions	109
CHAPITRE 3 - MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE.....	111
3.1 POSITIONNEMENT DE LA RECHERCHE	112

3.2	THEORIES MOBILISEES.....	113
3.3	NIVEAU D'ANALYSE ET UNITES D'ANALYSE.....	114
3.4	APPROCHE DE RECHERCHE.....	115
3.6	METHODOLOGIES MOBILISÉES.....	117
3.7	HORIZON DE TEMPS	117
3.8	TECHNIQUES, PLANS ET PROCEDURES DE COLLECTES DE DONNEES ET DE TRAITEMENTS.....	118
3.8.1	La première section du questionnaire est liée au test de proposition 1.1.....	119
3.8.2	La deuxième section du questionnaire est liée au test de la proposition 1.2	121
3.8.3	La troisième section du questionnaire est liée au test de la proposition 2.1	123
3.8.4	La quatrième section du questionnaire est liée au test de la proposition 2.2	125
3.8.5	La cinquième section du questionnaire est liée au test de la proposition 3.1	127
3.8.6	La sixième section du questionnaire est liée au test de la proposition 3.2.....	131
3.8.7	La septième section du questionnaire est liée au test de la proposition 4.1.....	134
3.8.8	La huitième section du questionnaire est liée au test de la proposition 4.1	138
CHAPITRE 4 - RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....		141
4.1	ÉVALUATION DE LA PROPOSITION 1.1	141
4.1.1	Opinion sur l'intégration de la modélisation 3D en vue d'améliorer l'efficacité	142
4.1.2	Opinion sur l'intégration de la modélisation 4D en vue d'améliorer l'efficacité	143
4.1.3	Opinion sur l'intégration de la modélisation 5D en vue d'améliorer l'efficacité	143
4.1.4	Opinion sur l'intégration de la modélisation 6D en vue d'améliorer l'efficacité	144
4.1.5	Opinion sur l'intégration de la modélisation 7D en vue d'améliorer l'efficacité	145
4.1.6	Opinion sur l'intégration de la modélisation 8D en vue d'améliorer l'efficacité	146
4.1.7	Opinion sur l'intégration de l'approche LEAN en vue d'améliorer l'efficacité.....	147
4.1.8	Opinion sur l'intégration de l'approche DAS en vue d'améliorer l'efficacité	148
4.1.9	Opinion sur l'intégration de BWPE en vue d'améliorer l'efficacité	149
4.1.10	Opinion sur l'intégration de ANFIS en vue d'améliorer l'efficacité.....	150
4.1.11	Opinion sur l'intégration de la modélisation BIM avec l'IA en vue d'améliorer l'efficacité	151
4.2	ÉVALUATION DE LA PROPOSITION 1.2	154
4.2.1	Opinion sur l'intégration de la Jumeau numérique avec l'outil HVAC en vue d'améliorer	156

4.2.2	Opinion sur l'intégration de Jumeau numérique avec le capteur et les dispositif IOT en vue d'améliorer l'efficacité.....	157
4.2.3	Opinion sur l'intégration de le Jumeau numérique avec l'apprentissage automatique algorithmique en vue d'améliorer l'efficacité.....	158
4.2.4	Opinion sur l'intégration de la J.N avec l'IA en vue d'améliorer l'efficacité.....	159
4.2.5	Opinion sur l'utilisation de l'entretien prédictif avec la DT en vue d'améliorer l'efficacité.....	160
4.2.6	Opinion sur l'utilisation du scanner 3D avec la D T en vue d'améliorer l'efficacité.....	161
4.2.7	Opinion sur l'utilisation des neurones artificielle et du code QR avec la J.N en vue d'améliorer l'efficacité.....	162
4.2.8	Opinion sur l'utilisation du Chat bot avec le J.N en vue d'améliorer l'efficacité.....	164
4.2.9	Opinion sur l'utilisation des drones UAV avec la DT en vue d'améliorer l'efficacité...	165
4.2.10	Opinion sur l'utilisation de la robotique avec le JN en vue d'améliorer l'efficacité.....	165
4.2.11	Opinion sur l'utilisation de l'analyse des données avec le Jumeau numérique en vue d'améliorer l'efficacité.....	166
4.2.12	Opinion sur l'utilisation de l'automatisation des taches avec le Jumeau numérique en vue d'améliorer l'efficacité.....	166
4.3	ÉVALUATION DE LA PROPOSITION 2.1	168
4.3.1	Opinion sur l'intégration du BIM avec l'outil PSs en vue d'améliorer L'optimisation	169
4.3.2	Opinion sur l'intégration du BIM avec Autodesk Revit en vue d'améliorer l'optimisation.....	170
4.3.3	Opinion sur l'intégration du BIM avec Autodesk insight 360° en vue d'améliorer une optimisation technique significative.....	171
4.3.4	Opinion sur l'intégration du BIM avec l'approche décisionnelle BIM écologie en vue d'améliorer une optimisation technique significative.....	171
4.3.5	Opinion sur l'intégration du BIM avec la Blockchain en vue d'améliorer l'optimisation.....	172
4.3.6	Opinion sur l'intégration du BIM avec l'IA en vue d'obtenir une optimisation technique.....	173
4.4	ÉVALUATION DE LA PROPOSITION 2.2	175
4.4.1	Opinion sur l'intégration du JN avec l'interface utilisateur en vue d'améliorer l'optimisation.....	176
4.4.2	Opinion sur l'intégration du Jumeau numérique avec l'interface utilisateur en vue d'améliorer l'optimisation.....	177
4.4.3	L'intégration du JN avec l'algorithme d'apprentissage automatique en vue d'améliorer l'optimisation.....	178
4.4.4	L'intégration du JN avec l'IA en vue d'améliorer l'optimisation.....	178
4.4.5	L'intégration du JN avec l'espace de travail interactif en vue d'améliorer l'optimisation.....	178
4.4.6	L'intégration du Jumeau numérique avec la modélisation prédictive en vue d'améliorer l'optimisation.....	179
4.4.7	L'intégration du Jumeau numérique avec la blockchain en vue d'améliorer l'optimisation.....	179
4.5	ÉVALUATION DE LA PROPOSITION 3.1	181

4.5.1	Opinion sur l'implication de la 3D BIM pendant la phase de Conception.....	185
4.5.2	Opinion sur l'implication de la 4D BIM pendant la phase de planification.....	185
4.5.3	Opinion l'implication de la 5D BIM pendant la phase de planification.....	185
4.5.4	Opinion l'implication de la 6D BIM pendant la phase de Conception.....	186
4.5.5	Opinion l'implication de la 7DBIM pendant la phase de clôture.....	186
4.5.6	Opinion sur l'implication de la 8DBIM pendant la phase de clôture.....	186
4.5.7	Opinion sur l'implication LEAN avec BIM pendant la phase de planification.....	187
4.5.8	Opinion sur la convergence BIM avec DAS en phase de conception.....	187
4.5.9	Opinion sur l'implication de l'outil BWPE pendant la phase de conception.....	187
4.5.10	Opinion sur l'implication de la 7D BIM pendant la phase de clôture.....	188
4.5.11	Opinion sur l'implication de l'outil ANFIS avec BIM pendant la conception.....	188
4.5.12	Opinion sur l'implication de l'IA avec le BIM en phase de planification.....	188
4.6	ÉVALUATION DE LA PROPOSITION 3.2.....	191
4.6.1	Opinion sur l'implication de l'outil HVAC avec la JN pendant la phase de conception et planification.....	194
4.6.2	L'implication de Capteur et dispositif IoT avec la JN pendant la phase d'exécution et de surveillance.....	194
4.6.3	L'implication de la modélisation 4D et 5D pendant la phase de conception.....	194
4.6.4	L'implication de l'IA avec le JN en phase de conception.....	195
4.6.5	L'implication de l'entretien préventif avec la JN pendant la phase de surveillance et contrôle.....	195
4.6.6	L'implication du scanner 3D en phase de conception.....	195
4.6.7	L'implication de neurones artificielles et du code QR avec le Jumeau numérique en phase de conception.....	196
4.6.8	L'implication de Chat bot avec la JN pendant la phase de surveillance et contrôle.....	196
4.6.9	L'implication de drone UAV avec la DT pendant la phase de conception.....	196
4.6.10	L'implication de ANFIS avec la JN pendant la phase de conception.....	197
4.7	ÉVALUATION DE LA PROPOSITION 4.1.....	200
4.7.1	Opinion sur l'intégration la 3D BIM pendant la phase de Conception.....	203
4.7.2	Opinion sur l'intégration de la 4D BIM pendant la phase de Conception.....	203
4.7.3	Opinion sur l'intégration de la 5D pendant la phase de Conception.....	203
4.7.4	Opinion sur l'intégration de la 6D BIM pendant la phase de Conception.....	204
4.7.5	Opinion sur l'intégration de la 7D BIM pendant la phase de Conception.....	204
4.7.6	Opinion sur l'intégration de la 8D BIM pendant la phase de Conception.....	204
4.7.7	Opinion sur l'intégration de l'approche LEAN- BIM pendant la phase de Planification.....	205
4.7.8	Opinion sur l'intégration BIM- DAS pendant la phase de Conception.....	205
4.7.9	Opinion sur l'intégration de l'outil BWPE pendant la phase de Conception.....	205
4.7.10	Opinion sur l'intégration de l'outil ANFIS pendant la phase de Conception.....	206
4.7.11	Opinion sur l'intégration de l'IA pendant la phase de Conception.....	206
4.8	ÉVALUATION DE LA PROPOSITION 4.2.....	209
4.8.1	Opinion sur l'implication de l'outil HVAC avec le Jumeau numérique pendant la phase de conception et planification.....	212

4.8.2.	Opinion sur l'implication de IoT avec le JN pendant la phase d'exécution et de surveillance.....	212
4.8.3	Opinion sur l'implication d'apprentissage automatique avec le Jumeau numérique pendant la phase de conception	212
4.8.4	Opinion sur l'implication de l'IA avec le Jumeau numérique pendant la phase de conception.....	213
4.8.5	Opinion sur l'implication de l'entretien préventif avec le Jumeau numérique	213
4.8.6.	Opinion sur l'implication de scanner 3D avec le JN pendant la phase conception et exécution.....	214
4.8.7	Opinion sur l'implication de neurones artificielles et du code QR avec le JN pendant la phase de conception.....	214
4.8.8	Opinion sur l'implication de Chat bot avec le Jumeau numérique pendant la phase surveillance et contrôle	214
4.8.9	Opinion sur l'implication de drone UAV avec la JN pendant la phase de conception d'exécution, de surveillance et contrôle.....	215
4.8.10	Opinion sur l'implication de ANFIS (Outil de signalisation des déchets de la construction) avec la JN pendant la phase de conception et planification.....	215
CHAPITRE 5 - CONCLUSION ET CONTRIBUTION ENVISAGÉE		218
5.1	CONTRIBUTION MANAGERIALE	224
5.2	CONTRIBUTION THÉORIQUE.....	225
5.3	LIMITES DE RECHERCHE.....	226
5.4	ORIENTATION FUTURE	227
BIBLIOGRAPHIE		229

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Comparaison entre le BIM et le jumeau numérique.....	35
Tableau 2 Présentation des objectifs et questions de recherche.....	41
Tableau 3 Les principaux éléments d'impact de l'AI sur le management de projet	92
Tableau 4 Résumé des objectifs, questions de recherche et propositions	109
Tableau 5 Catégorie d'avis pour la proposition 1.1	120
Tableau 6 Catégories d'avis pour la proposition 1.2	122
Tableau 7 Catégories d'avis pour la proposition 2.1	124
Tableau 8 Catégories d'avis pour la proposition 2.2	126
Tableau 9 Catégorie d'avis pour la proposition 3.1	128
Tableau 10 Catégories d'avis pour la proposition 3.2	132
Tableau 11 Catégories d'avis pour la proposition 4.1	135
Tableau 12 Catégorie d'avis pour la proposition 4.2.....	139
Tableau 13 Échantillon des répondants au questionnaire.	141
Tableau 14 Détail des réponses obtenues pour la proposition P1.1	141
Tableau 15 Détails des réponses obtenues pour la proposition 1.2.....	155
Tableau 16 Détails des réponses obtenues pour la proposition 2.1	169
Tableau 17 Détails des réponses obtenues pour la proposition 2.2.....	176
Tableau 18 Détails des réponses obtenu pour la proposition 3.1	183
Tableau 19 Détails des réponses obtenues pour la proposition 3.2.....	192
Tableau 20 Détails des réponses obtenues pour la proposition 4.1	201
Tableau 21 Détails des réponses obtenues pour la proposition 4.2.....	210

LISTE DES FIGURES

Figure 1 PIB du secteur des TIC, 2016-21 (Dollars constant de 2012).....	20
Figure 2 Les différents aspects de la Construction 4.0.....	22
Figure 3 Quelques aspects de combinaison de la Construction 4.0 et de l'intelligence artificiel.....	26
Figure 4 Les éléments fondamentaux nécessaires pour élaborer un jumeau numérique du bâtiment et les distinctions par rapport au BIM.....	34
Figure 5 Cadre conceptuel préliminaire.....	37
Figure 6 Représentation en diagramme de Venn de la localisation du domaine de recherche.....	39
Figure 7 Synergie entre les fonctionnalités BIM et les principes LEAN.....	51
Figure 8 L'incorporation du BIM dans la construction circulaire et l'évaluation du CCV.....	55
Figure 9 Type d'intégration de BIM et ACV.....	59
Figure 10 Un modèle conceptuel de technologie de jumeau numérique.....	63
Figure 11 Cadre construction 5.0.....	103
Figure 12 Cadre conceptuel de l'étude.....	107
Figure 13 Oignon de recherche selon Sander.....	112
Figure 14 Mise en évidence de la proposition 1.1 au travers du cadre conceptuel de l'étude.....	119
Figure 15 Mise en évidence de la proposition 1.2 au travers du cadre conceptuel de l'étude.....	121
Figure 16 Mise en évidence de la proposition 2.1 au travers du cadre conceptuel de l'étude.....	123
Figure 17 Mise en évidence de la proposition 2.2 au travers du cadre conceptuel de l'étude.....	125
Figure 18 Mise en évidence de la proposition 3.1 au travers du cadre conceptuel de l'étude.....	127
Figure 19 Mise en évidence de la proposition 3.2 au travers du cadre conceptuel de l'étude.....	131
Figure 20 Mise en évidence de la proposition 4.1 au travers du cadre conceptuel de l'étude.....	134
Figure 21 Mise en évidence de la proposition 4.2 au travers du cadre conceptuel de l'étude.....	138
Figure 22 Histogramme d'évaluation de la proposition 1.1.....	153
Figure 23 Histogramme de la proposition 1.2.....	167
Figure 24 Histogramme de la proposition 2.1.....	174
Figure 25 Histogramme de la proposition 2.2.....	180
Figure 26 Histogramme de la proposition 3.1.....	189
Figure 27 Histogramme de la proposition 3.2.....	198
Figure 28 Histogramme de la proposition 4.1.....	207
Figure 29 Histogramme de la proposition 4.2.....	216

LISTE DES ABRÉVIATIONS

TIC	Technologies de l'information
IA	Intelligence Artificielle
PIB	Produit Intérieur Brut
CPS	Systèmes Cyber-physiques
UAV	Véhicules Aériens sans Pilote
XR	La réalité étendue
IC	Industrie de la Construction
WSN	Capteurs sans Fil
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CPPS	Systèmes de Production Cyber-physiques
IOT	Internet des objets
JN	Jumeau Numérique
Q&M	Exploitation et la Maintenance
AEC	Architecture, Engineering, and Construction
SBD	La conception basée sur des ensembles
FSC	Facteurs Critiques de Succès
DFD	Conception pour le démontage
DFA	Conception pour l'adaptabilité
CCV	Coût du Cycle de vie
ACV	Analyse Cycle de vie
GPC	Gestion Projet de Construction
BCT	Blockchain

REMERCIEMENT

Au nom de la gratitude et de la reconnaissance, je souhaite exprimer mes sincères remerciements à Dieu, source infinie de sagesse et de soutien.

Mes remerciements les plus chaleureux s'adressent à ma direction de recherche, Professeur Christophe Bredillet, pour sa guidance éclairée, ses conseils judicieux et son dévouement sans faille, ont été des piliers essentiels dans la réalisation de ce mémoire.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude au comité d'évaluation pour son engagement et le temps précieux qu'il consacra à examiner ce modeste travail.

À ma famille, À mes proches et amis dont le soutien indéfectible a été ma force tout au long de ce parcours, je suis profondément reconnaissante. Votre encouragement constant et vos sacrifices ont été les fondements de mes succès.

Un remerciement spécial s'adresse aux professionnels qui ont généreusement consacré de leur temps pour participer au sondage. Leurs contributions ont été d'une valeur inestimable, enrichissant ainsi cette recherche par leur expertise et leurs perspectives précieuses.

Enfin, ma reconnaissance va à toutes les personnes qui, par leur enseignement, leur mentorat et leurs inspirations, ont contribué à mon développement académique et professionnel. Merci infiniment !

CHAPITRE 1 - PARTIE INTRODUCTIVE

Ces dernières années, les projets de construction ont gagné en complexité, avec des budgets et des délais de plus en plus contraignants, ainsi que des exigences de qualité plus élevées. Face à ces défis, l'industrie de la construction est confrontée à la nécessité morale de se tourner vers la numérisation. Cependant, bien que la numérisation soit une tendance en croissance depuis plusieurs années (Shafei, et al., 2022), en raison de ses avantages tangibles, tels que l'efficacité accrue, la réduction des délais et des coûts, l'amélioration de la qualité des constructions grâce à une meilleure visualisation et compréhension des plans, la promotion de la collaboration entre les acteurs du projet, ainsi que la contribution à la durabilité en optimisant l'utilisation des ressources et en réduisant l'impact environnemental, elle permet également aux professionnels de la construction de rester compétitifs et de répondre aux exigences du marché en constante évolution (Botton & Forgues, 2018).

1.1 CONVERSATION

L'industrie de la construction est déjà l'une des industries les plus importantes à l'échelle mondiale. Cependant, l'avènement de la numérisation et de l'automatisation dans le domaine de la construction, également connu sous le nom de construction 4.0 a apporté des changements significatifs dans la gestion des projets, des chaînes d'approvisionnement et des produits. Cette transformation s'est opérée grâce à l'adoption de technologies innovantes (Shafei, Radzi et al., 2022).

« Ainsi, la construction 4.0 est censée se trouver à la convergence de trois grandes dimensions :

- La transition numérique.
- L'industrialisation de la construction.
- La construction durable (Boton & Forgues, 2018). »

1.1.1 La transition numérique

La transformation numérique et les révolutions industrielles ont conduit à l'évolution de l'industrie vers une économie commerciale et industrielle. Les avancées technologiques telles que la machine à vapeur en 1780, l'électricité en 1870, l'électronique et l'automatisation en 1980 ont joué un rôle majeur dans ces changements. La révolution industrielle 4.0 caractérisée par la mondialisation et les technologies numériques représente la dernière étape de cette évolution offrant de nouvelles opportunités d'amélioration de la productivité et de l'efficacité industrielle (Boton & Forgues, 2018).

L'essence même de l'industrie 4.0 réside dans l'interconnexion des machines au moyen d'un réseau ou d'internet (Shafei et al., 2022). D'ailleurs, la création du premier ordinateur commercial en 1945 est directement lié à l'expérience menée au laboratoire de l'université de Manchester, qui a introduit le concept novateur d'un calculateur numérique programmable avec une mémoire enregistrée. Cette avancée majeure initiée par le scientifique influent John von Neumann a ouvert la voie au développement de l'ordinateur tel que nous le connaissons aujourd'hui (Abiteboul & Viéville, 2018).

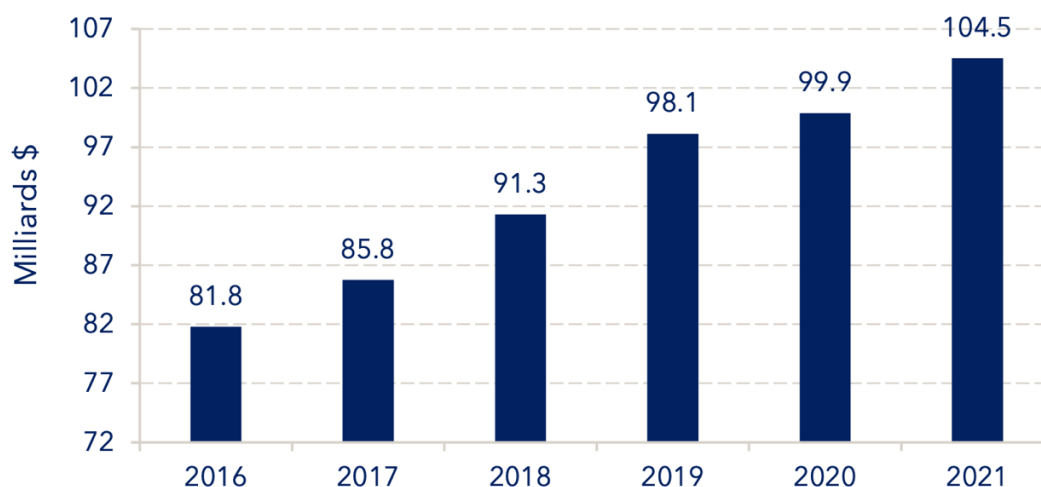
L'article de Shafei et al. décrit le passage de Rajab, I.A.A dans leur article "Is It the dawn of industrial revolution 4.0 in Malaysia", qui explique que le secteur des technologies numériques, des technologies de l'information et des communications (TIC) a connu un développement significatif. Cela offre à l'industrie une gamme de biens, de

services et de technologies facilitant l'accès et l'échange d'informations, le traitement des données ainsi que l'exploration et la rapidité. Ces avancées technologiques ont stimulé une compétition rapide dans les compétences numériques pour créer des applications dans divers domaines tels que la médecine, l'éducation, la finance, la défense, l'astronomie et même la créativité.

Ces développements s'appuient sur les technologies cyber-physiques de nouvelle génération, notamment l'intelligence artificielle (IA), la robotique et la nanotechnologie. La transformation numérique a le potentiel d'améliorer la qualité, la sécurité, la durabilité, la productivité et la compétitivité dans la réalisation des projets. Selon le Forum économique mondial, l'adoption de technologies numériques stimule la productivité, rationalise la gestion et les procédures de projet, et améliore la qualité et la sécurité (WEF, 2016).

Le Canada, tout comme de nombreux autres pays dans le monde, possède des talents dans des domaines tels que l'intelligence artificielle, la cyber sécurité, la réalité augmentée et virtuelle, l'informatique quantique, les réseaux de prochaine génération et les semiconducteurs. Malgré les répercussions de la pandémie en 2019, le secteur des technologies de l'information et des communications (TIC) au Canada a connu une croissance soutenue et significative en termes de production, d'emploi, de croissance économique et d'innovation (Direction générale de l'automobile, du transport, des technologie numérique, et des compétences sectorielles, 2021, p. 6).

Figure 1 PIB du secteur des TIC, 2016-21 (Dollars constant de 2012)¹



Afin de se conformer aux exigences de l'industrie 4.0, l'industrie de la construction doit entreprendre une transformation majeure en adoptant et en mettant en œuvre des technologies émergentes (Shafei et al., 2022). L'introduction de nouvelles technologies a été une innovation qui s'est répandue aussi rapidement que toute autre innovation dans le monde, transformant de nombreux domaines d'application. La construction a également bénéficié des avancées numériques grâce à son processus d'industrialisation.

1.1.2 L'industrialisation de la construction

Boton et Forgues citent dans leur article des écrits de Teichloz sur l'industrie de la construction qui a connu un retard par rapport aux technologies de l'information comparativement aux autres secteurs tels que l'aéronautique et l'automobile. Pendant une

¹Direction générale de l'automobile, du transport, des technologie numérique, et des compétences sectorielles. (2021), consulté le 15.01.2023.

période prolongée, ce domaine a été perçu comme peu enclin à adopter les technologies de l'information (Teichloz, cité dans Boton et Forgues, 2018).

La construction 4.0 est l'équivalent de l'industrie 4.0 dans l'industrie de la construction (Kor, et al., 2021), et se réfère, pour certains auteurs, à l'ubiquité, d'où l'utilisation des connectivités numériques pour des prises de décisions réelles. D'autres acteurs la définissent comme un moyen de complémentarité entre les approches technologiques de la construction. Alors que d'autres ont élargi le concept au-delà d'un cadre technologique pour répondre aux défis de l'industrie actuelle, différentes définitions sont données au concept de la construction 4.0 (Botton, & Forgues, 2018), dont l'objectif principal vise à promouvoir la numérisation en utilisant les systèmes cyber-physiques (CPS) pour atteindre une performance optimale.

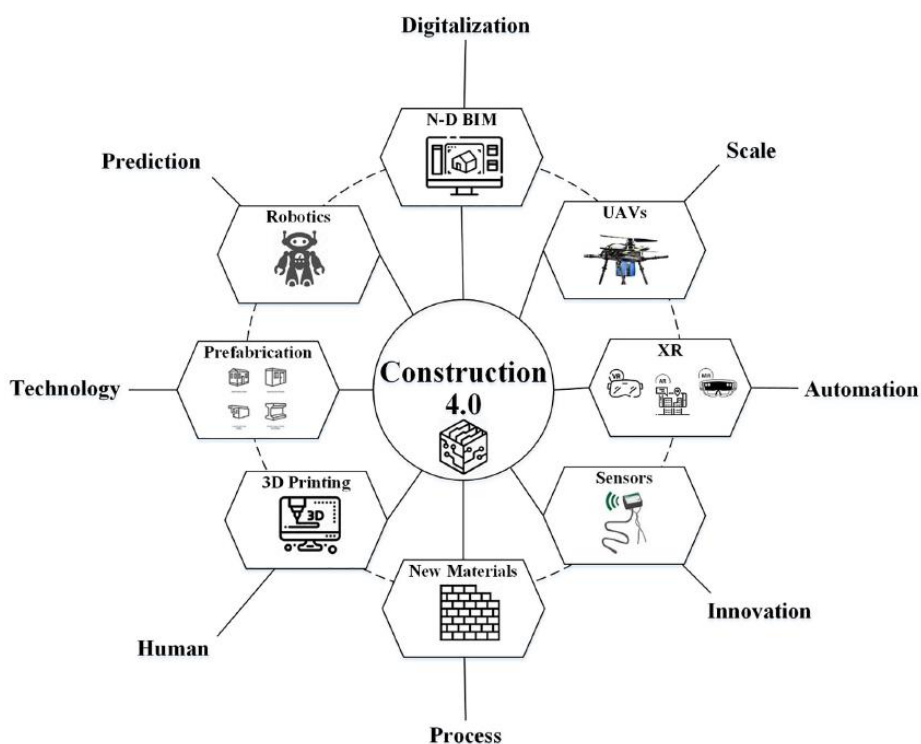
La construction 4.0 intègre des technologies qui soutiennent les sites de construction intelligents, la simulation et la virtualisation. Parmi ces technologies figurent la préfabrication, l'impression 3D, l'automatisation, la réalité étendue (XR), les véhicules aériens sans pilote (UAV), divers types de capteurs, les robots et le big data, qui sont utilisés pour améliorer les processus de prise de décision en temps réel. Cependant, la construction 4.0 se décompose principalement en trois scénarios :

Domaine physique/automatisation : il s'agit de l'intégration de l'ingénierie numérique de bout en bout et des technologies pour automatiser l'environnement physique de la construction.

Simulations et modélisation : cela fait référence aux outils de modélisation et de simulation utilisés pour la conception, la construction et l'exploitation des bâtiments et des infrastructures.

Numérisation : cela implique l'intégration de l'ingénierie numérique de bout en bout et des technologies pour automatiser l'environnement physique de la construction (Kor, et al.,2021).

Figure 2 Les différents aspects de la Construction 4.0²



Ces différents scénarios de la construction 4.0 visent à améliorer l'efficacité, la qualité et la performance des projets de construction en tirant parti des avantages offerts par la numérisation et les CPS (Kor, et al., 2021). La construction 4.0 introduit un changement majeur en favorisant une connexion décentralisée entre le monde physique et

² Kor, M., Yitmen, I., & Alizadehsalehi, S. (2021). P. 05.

le cyberspace grâce à une connectivité omniprésente. La promesse fondamentale de la révolution de la construction 4.0 réside dans la possibilité d'automatiser de manière quasi complète l'ensemble du cycle de vie d'un projet. Cette automatisation repose sur l'utilisation de jumeaux numériques à toutes les étapes, depuis la planification jusqu'à l'exploitation, en passant par la conception et la construction (Boton & Forgues, 2020).

Dans le secteur de la construction, cette connexion entre les deux univers est déjà présente grâce à des approches technologiques telles que le BIM (Building Information Modeling). Par exemple, il est désormais possible de créer des modèles numériques complets d'un projet de construction et même d'établir une liaison bidirectionnelle entre le chantier réel et ces modèles numériques (Boton & Forgues, 2020).

Le terme "Building Information Model" a été proposé pour la première fois au début des années 90 (Ruikar, et al., 2021). Le BIM, un concept en évolution depuis plus de cinquante ans, est largement reconnu comme une « source unique de vérité » pour les informations à la fois géométriques et non géométriques au sein de l'industrie de la construction (Sepasgozar, et al., 2023, p.13). Cependant, chaque phase du cycle de vie du projet peut être divisée en différentes couches d'informations superposées, ce qui nécessite la mise en place de stratégies d'échange d'informations efficaces afin de garantir une interopérabilité tout au long du processus. À partir de la conception assistée par ordinateur (CAO), les outils de conception et de gestion des bâtiments ont évolué pendant des décennies (Sepasgozar, et al., 2023).

Le BIM en phase de conception : l'utilisation croissante des modèles BIM en tant que jumeaux numériques permet de les interroger par le biais de simulations du produit physique, tel que le bâtiment, pour évaluer sa constructibilité, sa rentabilité (4D, 5D) et sa durabilité (par exemple, analyse énergétique).

Pendant la phase de construction : les modèles BIM continue de servir de jumeaux numériques, mais sont renforcés par d'autres technologies permettant d'automatiser leur connexion à la réalité du chantier. Ces technologies comprennent principalement des systèmes de production cyber-physiques (CPPS), tels que des capteurs, des drones, de la robotique embarquée et des systèmes de surveillance.

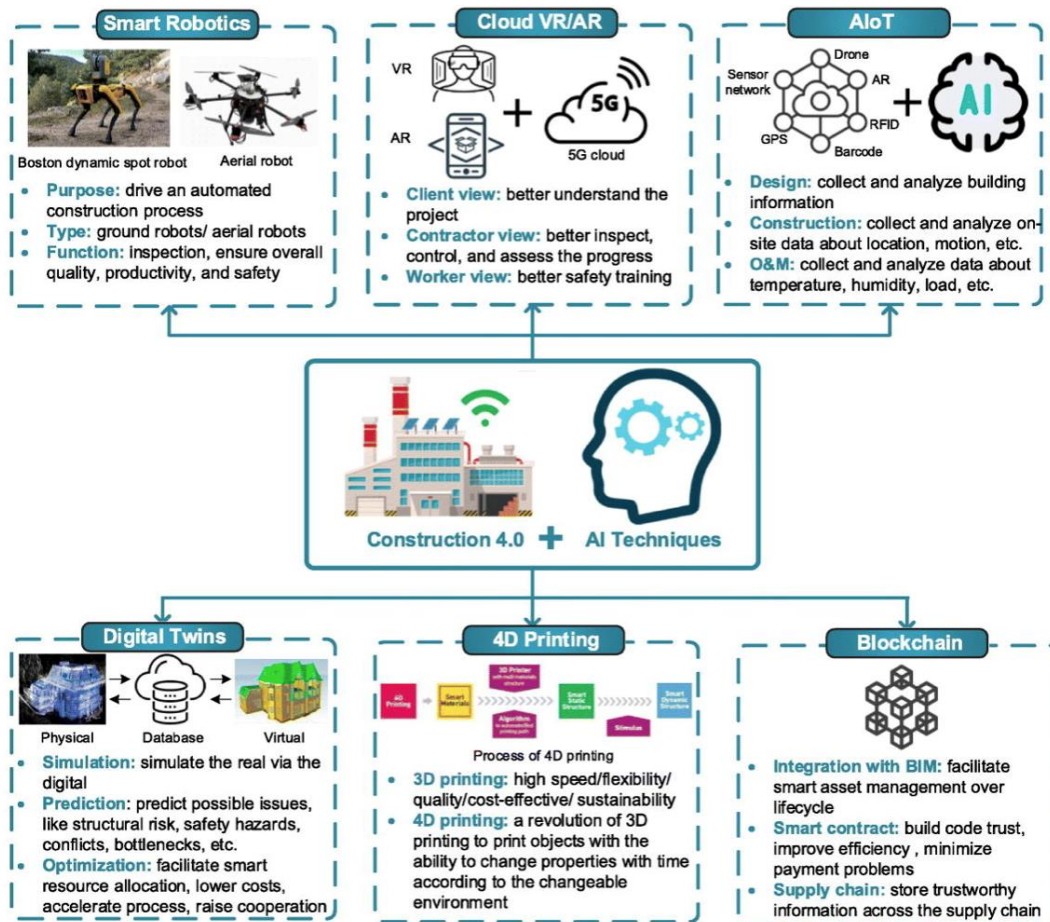
En phase d'exploitation : le BIM et l'IoT, combinés à d'autres capteurs CPS, permettent de surveiller les performances de l'installation et de mettre en place un système efficace de gestion de la maintenance préventive (Boton & Forgues, 2020). La transition numérique dans la construction 4.0 ne se limite pas uniquement à l'utilisation du BIM, mais englobe également plusieurs technologies actuellement disponibles (Boton & Forgues, 2020). Tel que le jumeau numérique qui est une représentation virtuelle d'un objet ou d'un système physique, tel qu'un bâtiment ou une installation, qui permet de simuler et de surveiller son fonctionnement en temps réel (Boje, et al., 2020). Un jumeau numérique est généralement créé en utilisant des données collectées à partir de capteurs et d'autres sources, telles que des modèles BIM. Elle permet de représenter l'état actuel de l'objet physique ou du système. Le Jumeau numérique est une représentation numérique dynamique de l'objet physique qui offre la possibilité de simuler, d'analyser et d'optimiser les performances, les opérations et la maintenance de l'objet physique ou du système (Sepasgozar et al., 2023).

Ces deux technologies ouvrent la voie à la convergence d'autres technologies numériques, offrant ainsi des solutions nécessaires et complémentaires pour l'industrie de la construction (Sepasgozar et al., 2023). Dans le contexte de l'industrie 4.0, l'ingénierie de la construction est constamment en évolution vers la numérisation et l'intelligence, visant à accroître l'automatisation, la productivité et la fiabilité. L'industrie de la construction se transforme ainsi tout au long de la chaîne de valeur, englobant la planification, la construction, l'exploitation et la maintenance (O&M), cependant l'intelligence artificielle (IA) joue un rôle essentiel en tant que pilier des stratégies

numériques dans la gestion de l'environnement, en modifiant la manière dont les projets de construction sont exécutés (Abioye, et al., 2021).

L'intelligence artificielle (IA) offre des possibilités étendues pour améliorer considérablement la productivité grâce à l'analyse rapide et précise de grandes quantités de données. De plus, les systèmes et technologies d'IA peuvent résoudre des problèmes pratiques complexes et non linéaires, et une fois entraînés, ils sont capables de faire des prédictions et des généralisations à grande vitesse (Darko, et al., 2020). Cependant, il est possible de concevoir un avenir révolutionnaire dans lequel la conception, la fabrication et l'utilisation des matériaux de construction intègrent de manière minutieuse l'intelligence artificielle, le big data et d'autres technologies émergentes (Wang, et al., 2023). Malgré la quantité sans précédent de données d'ingénierie disponibles dans les projets de construction, l'adoption des techniques d'IA reste en retard par rapport à d'autres industries en termes de processus (Pan, Y., & Zhang, L. 2021). Cependant, au cours des dernières années, il est devenu manifeste que le secteur de la construction doit embrasser la numérisation et renforcer rapidement ses compétences technologiques (Abioye, et al., 2021).

Figure 3 Quelques aspects de combinaison de la Construction 4.0 et de l'intelligence artificiel³



L'intégration de diverses technologies numériques dans l'industrie de la construction revêt une importance capitale à toutes les étapes du cycle de vie d'un projet, ainsi qu'au-delà de sa phase d'exploitation. Cette adoption s'accompagne souvent de nombreux défis supplémentaires, tels que l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments et l'optimisation des coûts globaux. Dans ce contexte, le concept de

³ Pan, Y., & Zhang, L. (2021). P. 13.

construction durable est étroitement lié à la mise en œuvre des technologies numériques dans l'industrie de la construction.

1.1.3 La construction durable

L'émergence du concept de bâtiment écologique découle de la préoccupation croissante de la société face aux impacts environnementaux négatifs de l'industrie de la construction qui représente une part importante des problèmes environnementaux et environ un tiers de la consommation mondiale d'énergie (Loo, et al., 2023).

Parallèlement, l'intérêt mondial pour les bâtiments intelligents a progressivement augmenté au fil des années. L'adoption de ces bâtiments intelligents a récemment attiré une attention particulière en raison des multiples avantages qu'ils offrent, que ce soit dans les pays développés ou en développement. Ainsi, les produits de l'environnement bâti sont désormais conçus pour optimiser l'utilisation de l'énergie, favoriser le recyclage des matériaux et créer un environnement durable à faible empreinte carbone. Cette évolution démontre l'application réussie de ces technologies dans l'industrie de la construction (Ejidike, C. C., & Mewomo, M. C. 2023).

Les bâtiments écologiques et intelligents peuvent donc être considérés de manière conjointe, soulignant leur synergie en faveur d'un avenir durable. Il est possible de dire que la dimension durable de la construction est étroitement liée non seulement aux préoccupations environnementales, mais également à l'utilisation des technologies numériques tout au long du cycle de vie d'un projet. L'application de ces technologies numériques vise à améliorer la qualité et l'efficacité de la gestion des projets de construction. Malgré les avantages mentionnés, les recherches montrent un certain retard dans l'implémentation de ces technologies numériques dans l'industrie de la construction par rapport à d'autres secteurs (Boton et Forgues, 2020).

Le domaine de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction (AEC) est réputé pour faire face à des défis en matière de planification, de gestion des risques et de logistique, entraînant souvent des problèmes de conception, des retards, des dépassements de coûts et des litiges contractuels. Au cours des dernières décennies, le BIM a montré une identification précoce et une correction des problèmes potentiels avant leur apparition sur le chantier, ce qui est extrêmement bénéfique (Cheng, et al.,2021).

Cependant, malgré les avantages du BIM, il est nécessaire de rechercher des solutions plus substantielles pour répondre aux besoins du secteur AEC (Kor, et al.,2021).

Les techniques puissantes d'apprentissage automatique, telles que l'apprentissage en profondeur, ont été largement utilisées dans l'industrie de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction (AEC) pour diagnostiquer et prédire les causes de problèmes, ainsi que pour mettre en place des mesures préventives. Ainsi, le jumeau numérique permet de créer des conceptions plus efficaces et optimisées. Ces avancées technologiques ont permis à l'industrie AEC de faire preuve d'une résilience exceptionnelle au cours des dernières années (Alizadehsalehi et al., 2020).

1.1.4 Enjeu majeur

L'enjeu majeur pour l'industrie de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction (AEC) réside dans la pleine intégration des technologies numériques, telles que le Building Information Modeling (BIM), le jumeau numérique et l'intelligence artificielle (IA), afin de favoriser une transformation positive et durable du secteur (Kor, et al., 2021). En adoptant ces avancées technologiques dans leur stratégie opérationnelle, les entreprises de construction seront mieux préparées pour faire face aux défis futurs, gagner en compétitivité sur le marché et proposer des solutions innovantes et durables.

1.2 PERSPECTIVES ET DEBATS

L'industrie de la construction a l'opportunité de progresser vers une approche plus personnalisée, intelligente et connectée, ce qui permettrait d'améliorer significativement l'efficacité, la qualité et la durabilité des projets (Shafei, Radzi et al., 2022).

1.2.1 Le BIM une approche transformant l'industrie de la construction

Un exemple éloquent de cette approche globale dans l'industrie de la construction est la Modélisation des Informations du Bâtiment (BIM). Le BIM a gagné en renommée car il intègre l'ensemble du cycle de vie du bâtiment, offrant une alternative supérieure à l'approche traditionnelle 2D sur papier, qui présente divers inconvénients tels que des limitations dans la représentation détaillée du projet, des difficultés de coordination entre les parties prenantes et une gestion inefficace des modifications, pouvant impacter la maintenance et l'exploitation (Teisserenc, B., & Sepasgozar, 2022).

En revanche, la méthodologie BIM favorise la collaboration multidisciplinaire et la gestion efficace de l'information grâce à une modélisation tridimensionnelle complète tout au long du cycle de vie du projet (Silva et al., 2022).

La nature complète de l'approche BIM peut être caractérisée par différentes dimensions, couramment désignées sous les termes 3D (la modélisation tridimensionnelle des éléments physiques), 4D (Données temporelles), 5D (Données budgétaires), 6D (Environnementales) et 7D (Administratives), qui offrent une vision globale et intégrée du projet (Czmoch & Pękala, 2014 ; Simões, 2012 cités dans Silva et al., 2022). Cette approche holistique permet de mieux appréhender les différentes facettes du projet, ce qui renforce la prise de décisions éclairées et l'efficacité opérationnelle. Ainsi, le BIM

représente un outil essentiel pour l'industrie de la construction dans sa quête d'amélioration continue et d'adaptation aux défis du futur.

A l'instar, la mise en œuvre du BIM (Building Information Modeling) est confrontée à plusieurs défis, ce qui rend essentiel une meilleure compréhension des Facteurs Critiques de Succès (FSC) pour élaborer des stratégies appropriées (Ozorhon et Karahan, 2017). Malgré de nombreuses études portant sur les Facteurs Critiques de Succès (FSC) pouvant influencer la mise en œuvre du BIM, peu se sont penchées sur les relations entre ces facteurs (Liao et Teo, 2017). Cependant, l'utilisation du BIM présente des défis à la fois sur les aspects techniques et non techniques (Chan et al., 2019).

1.2.2 L'intégration de l'approche BIM au cycle de vie d'un projet

L'évaluation de la réussite des projets BIM a identifié certains obstacles à une mise en œuvre réussie, tels que les modifications de conception et l'insuffisance de programmes de formation adéquats (Won et Lee, 2016). Le manque de connaissances peut également entraîner des erreurs de conception des ajustements, mettant en évidence l'importance d'une préparation préalable non technique (Won et al., 2013). Pourtant, la phase de conception, sujette à divers risques, peut bénéficier d'une gestion efficace grâce à l'utilisation du BIM, qui permet de mieux gérer cette étape avant de passer aux étapes suivantes (Malekitabar et al., 2016 ; Othman et Alamoudy, 2021).

Malgré le fait que le BIM soit devenu une réalité dans de nombreux pays, des professionnels de l'industrie de la construction civile, à l'exemple des Brésiliens, rencontrent encore des défis dans son adoption et son utilisation (Menezes et al., 2013). Son utilisation en tant que processus plutôt qu'en tant qu'outil reste peu courante, contribuant à l'apparition d'erreurs de conception, de retards et à des pertes de temps et de matériaux en raison du manque d'intégration entre la conception et la production

(Fernandes & González, 2014 ; Rabelo, Lyrio Filho & Amorim, 2008), comme rapporté par Viera et al. (2017). Par ailleurs, l'article de Zhang et al. souligne l'importance de poursuivre les efforts pour améliorer l'efficacité dans le secteur de la construction en adoptant et en appliquant le BIM au Pakistan.

L'utilisation du BIM dans le domaine de la construction offre une approche globale qui englobe l'ensemble du cycle de vie du bâtiment (Tchana et al., 2019). Cette approche permet de créer, gérer et échanger des informations tout au long du projet en utilisant un jumeau numérique, qui est défini en fonction du degré d'intégration des données entre les objets physiques et numériques. Ainsi, l'exemple du projet national MINND se focalise sur l'interopérabilité de l'information, la gestion des modèles de données, la visualisation 3D, la capitalisation pour l'optimisation, et l'archivage précis des modifications subies par un Jumeau Numérique (Tchana et al., 2019).

1.2.3 La perspective de la gestion centralisée des modèles numériques

L'utilisation de multiples modèles numériques peut entraîner des problèmes d'archivage à long terme, de traçabilité et d'archivage des historiques de modification, pour résoudre ce défi, il est préconisé d'adopter une approche basée sur un seul jumeau numérique centralisant toutes les informations nécessaires pour assurer une gestion cohérente et efficace des données tout au long du projet (Kor, Yitmen, & Alizadehsalehi, 2023).

Les jumeaux numériques ont une application étendue dans différents domaines. Ils s'intègrent rapidement dans divers secteurs tels que l'industrie manufacturière, à l'exemple de la NASA qui utilise des Jumeaux Numériques pour le développement de véhicules et d'avions de nouvelle génération (Attaran, M., & Celik, B. G. 2023), les villes intelligentes et le réseau électrique intelligent. Dans les villes intelligentes, la connectivité

croissante grâce à l'Internet des objets (IoT) offre un potentiel extrêmement efficace pour les jumeaux numériques (Attaran, M., & Celik, B. G. 2023).

Un exemple d'innovation dans le domaine des jumeaux numériques réside dans leur exploitation basée sur la blockchain (BCT). Cette technologie offre un potentiel de renforcement de la sécurité de l'information, de facilitation de la collaboration pair-à-pair (P2P) et d'automatisation grâce à des contrats intelligents basés sur la BCT. En capturant et en enregistrant les données essentielles du projet liées à sept dimensions BCDT, ces dimensions comprennent les aspects spatiaux (3D), temporels (4D), les coûts (5D), la maintenance (6D), la durabilité (7D), la sécurité (8D) et les aspects contractuels (cD). Cependant, des défis tels que le coût de déploiement et la complexité du développement de contrats intelligents doivent être pris en compte pour une mise en œuvre réussie (Teisserenc & Sepasgozar, 2022).

Un autre exemple des jumeaux numériques qui utilisent des capacités d'intelligence artificielle pour fournir des informations d'état correctes et optimiser la conception et la planification. L'intégration du jumeau numérique et l'apprentissage automatique offre un potentiel prometteur pour une planification et une construction intelligentes.

Un troisième exemple cité dans (Opoku et al., 2021) mettent en évidence l'importance cruciale des jumeaux numérique dans la gestion des installations, où elle joue un rôle essentiel en permettant la réalisation d'analyses "et si" cette approche permet une prise de décision éclairée concernant les activités d'exploitation et d'entretien des bâtiments au sein de l'industrie de la construction. Actuellement, ils reconnaissent les multiples potentiels du jumeau numérique, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives d'application dans ce domaine.

1.2.4 Implications futures du jumeau numérique dans la construction

Il est important de noter que l'industrie de la construction est confrontée à divers défis tels que l'inefficacité opérationnelle, le manque de confiance et de collaboration entre les parties prenantes, la restriction du partage d'informations et la fragmentation de la chaîne de valeur de l'information (Teisserenc & Sepasgozar, 2022). Pour surmonter ces difficultés, l'utilisation de jumeaux numériques peut jouer un rôle essentiel en permettant une détection rapide des problèmes potentiels, ce qui permet d'ajuster les stratégies pour achever les projets de manière sûre, dans les délais et en respectant le budget (Kor et al., 2023 ; Attaran & Celik, 2023).

D'ailleurs, les perspectives pour les jumeaux numériques sont prometteuses, car selon Gartner, plus de 40 % des grandes entreprises mondiales prévoient d'utiliser cette technologie dans leurs projets d'ici 2027 afin d'accroître leurs revenus (Kor et al., 2023).

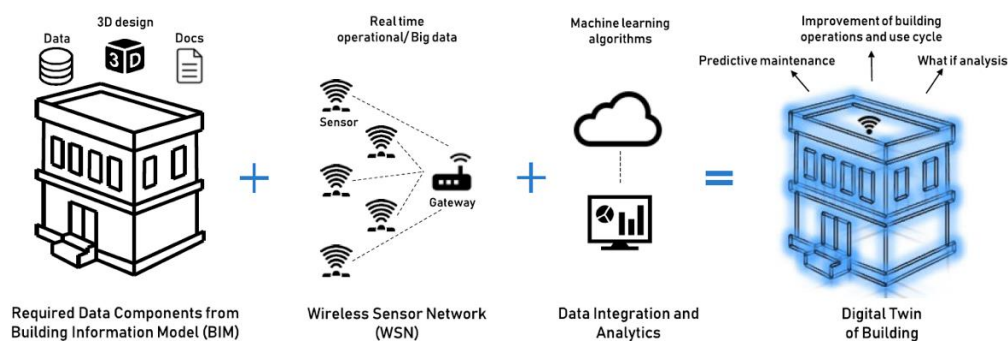
Ces dernières années, les jumeaux numériques ont évolué rapidement, passant de simples idées à des réalisations concrètes. De plus, on s'attend à ce que les jumeaux numériques soient intégrés avec encore plus de technologies, telles que les capacités vocales, la réalité augmentée, l'internet des objets (IoT) et l'intelligence artificielle (IA) (Attaran, M., & Celik, B. G. 2023).

Selon un rapport récent de recherche technologique mondiale, on prévoit que le marché du jumeau numérique connaîtra une croissance de près de 32 milliards de dollars entre 2021 et 2026. De plus, un rapport de 2022 indique que près de 60 % des dirigeants de diverses industries envisagent d'intégrer des jumeaux numériques dans leurs opérations d'ici 2028 (Attaran, M., & Celik, B. G. 2023).

Le jumeau numérique exploite un éventail varié de technologies, incluant l'intelligence artificielle (IA), l'apprentissage automatique et l'analyse de données. Dans le domaine de l'industrie de la construction (IC), les technologies couramment utilisées pour soutenir la mise en œuvre du jumeau numérique comprennent la modélisation des informations du bâtiment (BIM), les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), ainsi que l'apprentissage automatique et l'analyse de données.

Plusieurs études ont examiné ces avancées et ont mis en évidence leur pertinence dans le contexte de l'industrie de la construction.

Figure 4 Les éléments fondamentaux nécessaires pour élaborer un jumeau numérique du bâtiment et les distinctions par rapport au BIM⁴



Cependant, il est important de noter qu'une confusion répandue existe dans l'industrie de la construction, où les jumeaux numériques sont souvent assimilés au Building Information Modeling (BIM) en raison de leurs similitudes. Pour clarifier cette distinction, Khajavi, Motlagh, Jaribion, Werner et Holmström ont souligné les différences

⁴ Khajavi, S. H., Motlagh, N. H., Jaribion, A., Werner, L. C., & Holmström, J. (2019). P. 2.

fondamentales entre ces deux approches, notamment en termes d'objectifs, de technologies utilisées et d'utilisateurs finaux (Khajavi, et al., 2019).

Tableau 1 Comparaison entre le BIM et le jumeau numérique⁵

Differentiator Concept	Application focus	Users	Supporting technology	Software	Stage of life cycle	Concept origin
BIM	Design visualization and consistency, Clash detection, Lean construction, Time and cost estimation, Stakeholders' interoperability [10]	AEC, Facility manager [16], [30]	Detailed 3D model, Common data environment (CDE), Industry Foundation Class (IFC), Construction Operations Building Information Exchange (COBie) [16]	Revit, MicroStation, ArchiCAD, Open source BIMserver, Grevit [16]	Design, Construction, Use (maintenance), Demolition [31]	Charles Eastman [16]
Digital Twin of Building	Predictive maintenance [26], Tenant comfort enhancement, Resource consumption efficiency, What-if analysis, Closed-loop design [23]	Architect, Facility manager	3D model, WSN, Data analytics, Machine learning [32]	Predix, Dasher 360, Ecodomus	Use (operation) [33]	NASA's Apollo program [22]

1.3 PROBLEMATIQUE

L'industrie de la construction est en constante évolution, adoptant progressivement des technologies innovantes pour améliorer l'efficacité, la qualité et la gestion des projets. Deux de ces technologies émergentes sont la Modélisation des Informations du Bâtiment (BIM) et le jumeau numérique.

L'utilisation de la modélisation des informations du bâtiment (BIM) a apporté des améliorations significatives dans le secteur de la construction au fil des ans. Elle a permis d'accroître l'efficacité du processus de construction, de réduire les déchets pendant les travaux et d'améliorer la qualité des projets AEC, en détectant et en corrigeant les problèmes potentiels avant leur apparition sur le chantier. Cependant, malgré ses

⁵ S. Boschert et R. Rosen (2016). J. Daily et J. Peterson (2017). AN Nasaruddin, T. Ito et TB Tuan (2018). cités dans Khajavi, S. H., Motlagh, N. H., Jaribion, A., Werner, L. C., & Holmström, J. (2019). P.15.

avantages, le BIM présente encore certaines limitations et n'est pas suffisant pour répondre à tous les besoins et défis du secteur de la construction (Zhang, J. 2023).

D'autre part, le jumeau numérique, une approche innovante, a suscité un intérêt croissant dans l'industrie AEC (Architecture, Ingénierie et Construction) en permettant une simulation virtuelle en temps réel des actifs physiques. Cependant, son intégration avec les méthodologies de simulation existantes et les données environnementales reste un défi, ses lacunes comprennent des coûts élevés liés aux technologies, aux logiciels, au matériel, ainsi que la nécessité de former des experts. De plus, des défis tels que l'automatisation complète, les codes, les calculs, le stockage, la bande passante réseau, les réglementations, les politiques, la sécurité et les procédures doivent être relevés. Des problèmes liés à la perte de données pendant le transfert et à l'incompatibilité logicielle persistent également (Sepasgozar, S. 2023).

Afin de relever ces défis et d'optimiser l'utilisation du BIM et du jumeau numérique dans l'industrie de la construction, les entreprises de construction doivent se concentrer sur l'exploration de la prochaine génération de jumeau numérique, en mettant l'accent sur l'amélioration de la visualisation et de la prédiction en temps réel, ainsi que la gestion autonome de l'environnement bâti pour faciliter la prise de décision (Kor, M., et al., 2023). De plus, une évolution vers une approche numérisée et des systèmes plus intelligents est nécessaire pour tirer pleinement parti des avantages de ces technologies (Pan & Zhang, 2021). Cependant, les entreprises qui adoptent ces technologies de pointe se placeront en tête de la concurrence, bénéficiant d'une meilleure efficacité, de coûts réduits et d'une gestion plus intelligente de leurs projets de construction (Wang et al., 2021).

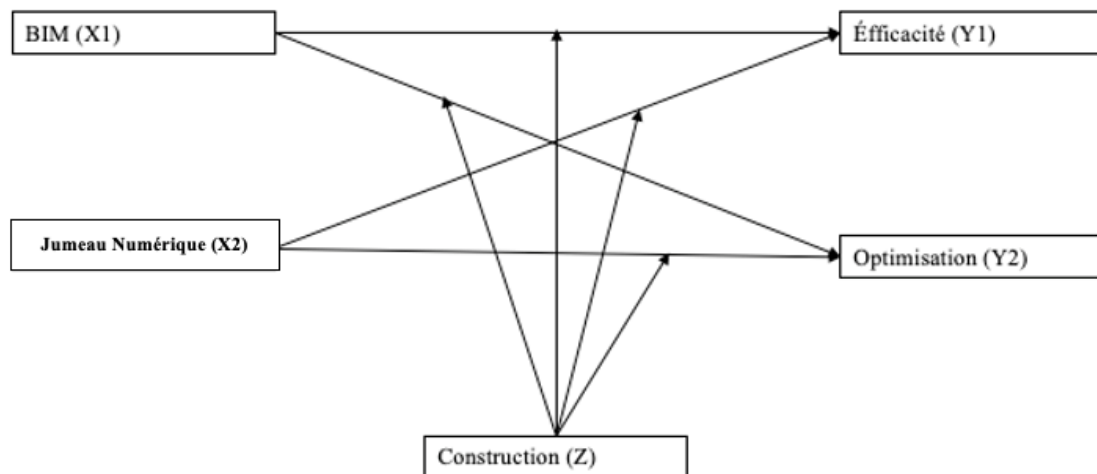
Bien que le BIM et le jumeau numérique aient apporté des améliorations significatives à l'industrie de la construction, leur intégration et leur évolution vers une approche plus numérisée nécessitent une attention particulière pour surmonter les défis

persistants et exploiter pleinement leur potentiel (Kor, M., Yitmen, I., & Alizadehsalehi, S. 2023).

En considération des éléments exposés précédemment, il apparaît essentiel et stimulant de se pencher sur la problématique qui réside dans la manière d'améliorer l'intégration du BIM (X1) et du jumeau numérique (X2), tout en évoluant vers des systèmes plus intelligents, en vue d'accroître l'efficacité tant énergétique qu'opérationnelle (Y1) et d'optimiser l'utilisation de ces technologies émergentes (Y2) dans l'industrie et les projets de construction (Z).

La figure ci-dessous illustre le cadre conceptuel préliminaire de notre étude. Celle-ci permet de visualiser les différentes interactions entre les facteurs de l'étude.

Figure 5 Cadre conceptuel préliminaire

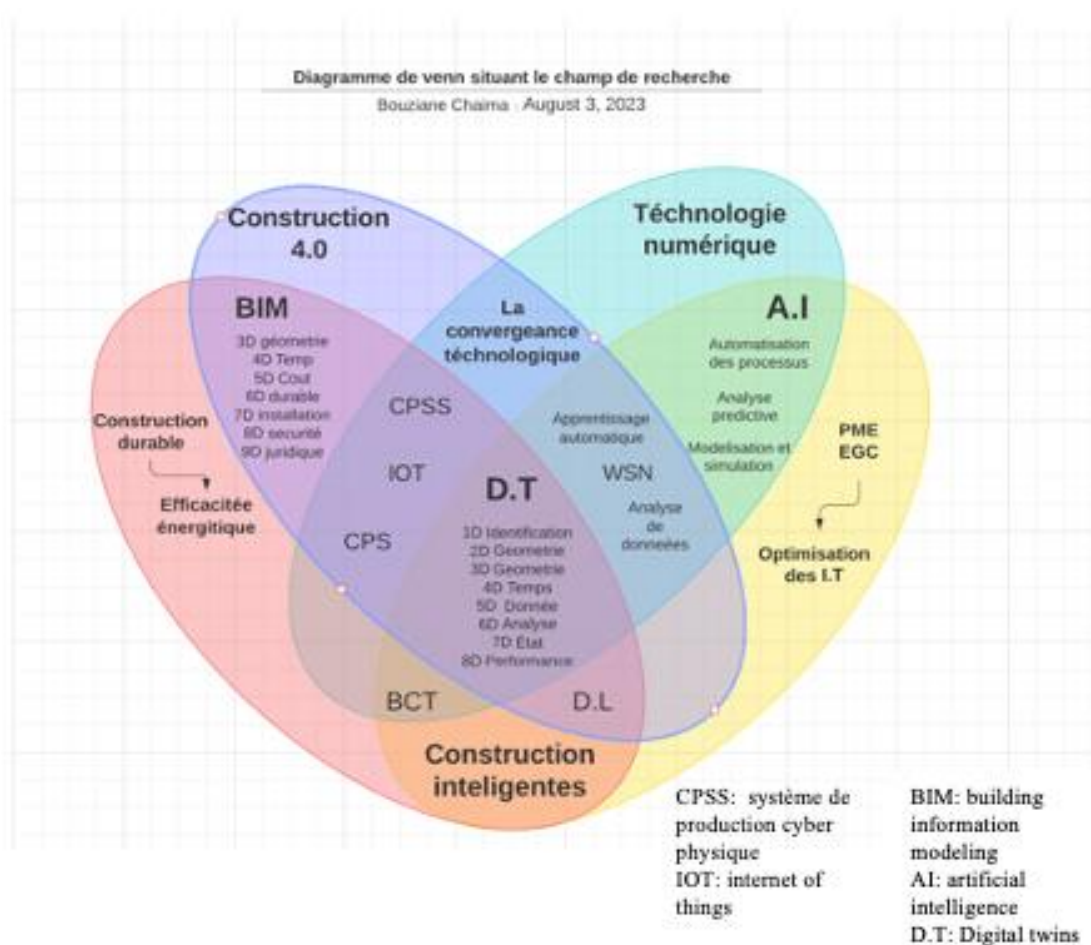


1.4 LOCALISATION DE LA RECHERCHE

La promesse fondamentale inscrite au cœur de la révolution de la Construction 4.0 réside dans la perspective d'une automatisation quasi intégrale du cycle de vie d'un projet durable. Une telle avancée engendre des implications substantielles et favorise une localisation accrue de la recherche dans des domaines de littérature spécifiques. Ce processus de localisation, à son tour, facilite la mise en exergue des travaux préexistants, des cadres de références théoriques pertinents et engendre une clarté quant au type de recherche envisagé.

Dans l'optique d'une analyse approfondie de la problématique, il s'avère judicieux d'examiner l'interaction de quatre sphères distinctes, tel que mis en évidence dans le diagramme de Venn ci-dessous.

Figure 6 Représentation en diagramme de Venn de la localisation du domaine de recherche



Ce schéma de Venn offre une représentation visuelle des interrelations inhérentes à la problématique de l'intégration technologique dans le secteur de la construction durable, il synthétise avec clarté les diverses dimensions de recherche envisagées, en mettant en évidence leur entrecroisement et leur convergence vers une visée commune d'efficacité, de durabilité et d'intelligence dans la gestion des projets de construction.

Ce schéma vise à cerner les relations et les interconnexions entre les différentes facettes de la conceptualisation et la problématique susmentionnée, en soulignant les éléments fondamentaux suivants :

Technologie numérique et intelligence artificielle (IA) : Cette sphère se focalise sur l'analyse approfondie de la technologie numérique, avec une attention particulière portée à l'Intelligence Artificielle (IA) et à ses outils d'application dans le contexte de la construction. Elle évalue comment ces avancées technologiques peuvent être efficacement impliquées pour optimiser divers aspects de la gestion et de l'exécution des projets de construction.

Construction 4.0 et cycle de vie du BIM : Cette dimension englobe le concept de Construction 4.0, un paradigme évolué intégrant le BIM et ses outils au sein des différents cycles de vie des projets de construction. Elle explore comment ces technologies interagissent pour améliorer la planification, la conception, la construction et la maintenance des structures, tout en garantissant une gestion globalement optimisée.

Convergence technologique via les jumeaux numériques : Cette sphère met en lumière la convergence technologique résultant de l'intégration des différents éléments à travers les jumeaux numériques. Elle examine comment les données en temps réel et la simulation virtuelle des projets au moyen des jumeaux numériques contribuent à une meilleure coordination et à une prise de décision informée.

Entreprises de construction et intégration : Cette dimension se concentre sur les entreprises de construction, notamment les Petites et Moyennes Entreprises (PME) et les Entreprises Générales de Construction (EGC), qui mettent en œuvre ces technologies pour optimiser leur intégration opérationnelle. Elle explore comment ces acteurs adaptent et adoptent les innovations technologiques pour améliorer leur efficacité, leur agilité et leur compétitivité.

L'ensemble de ces efforts converge vers l'objectif ultime de la construction durable. Cette finalité établit un lien crucial entre les avancées technologiques et les impératifs environnementaux, tout en intégrant le concept de construction intelligente. Par cette dernière, nous entendons une approche qui intègre les innovations technologiques pour créer des systèmes et des processus de construction plus astucieux, rentables et respectueux de l'environnement.

1.5 OBJECTIFS ET QUESTIONS DE RECHERCHE

Tableau 2 Présentation des objectifs et questions de recherche

Objectifs	Questions de recherche
Identifier et définir les facteurs / concepts / notions	
BIM (X1)	
Jumeau numérique (X2)	
Efficacité opérationnel et énergétique (Y1)	
Optimisation (Y2)	
Construction (Z)	
Analyser et comprendre les relations entre les facteurs / concepts / notions	

Objectifs	Questions de recherche
O1.1 BIM > Efficacité (opérationnel et énergétique) (X1 > Y1)	QR1.1 Comment le BIM, peut être intégrées de manière optimale dans les projets de construction durable pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental ?
O1.2 J.N> Efficacité (opérationnel et énergétique). (X2 > Y1)	QR1.2 Comment les jumeaux numériques peuvent-ils être appliqués de manière efficace pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental ?
O2.1 BIM > Optimisation (X1 > Y2)	QR2.1 Comment mettre en œuvre efficacement l'utilisation du BIM afin d'assurer une optimisation significative ?
O2.2 J.N > Optimisation (X2 > Y2)	QR2.2 Comment peut-on exploiter efficacement les jumeaux numériques afin de parvenir à une optimisation substantielle ?
O3.1 Construction>BIM> Efficacité (Z1 > (X1 > Y1)	QR3.1 En quoi et Comment les projets de construction et les entreprises de construction utilisent-elles effectivement les modèles d'information sur les bâtiments (BIM) pour améliorer l'efficacité dans leurs projets de construction ?

Objectifs	Questions de recherche
O3.2 Construction>J.N> Efficacité (Z1 > (X2 > Y1))	QR3.2 Comment l'intégration des jumeaux numériques dans la gestion de projet de construction impacte-t-elle l'efficacité opérationnelle (les coûts et la qualité des projets) ainsi que l'efficacité énergétique dans les projets de construction et les entreprises de construction ?
O4.1 Construction> BIM>Optimisation (Z1 > (X1 > Y2))	QR4.1 Comment l'intégration du BIM dans la gestion de projet de construction impacte-t-elle l'optimisation dans les projets de construction et les entreprises de construction ?
O4.2 Construction>J.N> Optimisation (Z1 > (X2 > Y2))	QR 4.2 Comment l'intégration des jumeaux numériques dans la gestion de projet de construction impacte-t-elle l'optimisation dans les projets de construction et les entreprises de construction ?

1.6 PERIMETRE DE LA RECHERCHE

La problématique qui fait l'objet de cette recherche concerne l'amélioration de l'intégration conjointe du Building Information Modeling (BIM) et du jumeau numérique dans le domaine de la construction. Cette amélioration s'inscrit dans une dynamique d'évolution vers des systèmes plus intelligents, dans le but de satisfaire aux besoins spécifiques inhérents à l'industrie de la construction durable.

Par ailleurs, l'objectif sous-jacent est d'optimiser l'exploitation de ces technologies émergentes au sein des entreprises de construction, qu'elles soient de grande envergure (EGC) ou de plus petite taille (PME), couvrant ainsi divers types d'entreprises. Dans cette perspective, une étape décisive de cette recherche implique la réalisation d'un sondage, visant à identifier les catégories de technologies intelligentes préconisées pour une intégration au contexte spécifique des entreprises de construction. Ce sondage a pour but d'apporter des éclairages précieux quant à la voie à suivre pour parvenir à une optimisation avancée de la gestion des projets au sein des EGC ET PME.

En somme, cette recherche s'inscrit dans une perspective multidimensionnelle qui allie l'analyse conceptuelle, la revue de la littérature et une approche empirique, avec pour aspiration ultime la proposition d'un modèle d'intégration optimale du BIM, du jumeau numérique et de l'intelligence artificielle. Le cadre conceptuel qui sous-tend cette recherche englobe à la fois la dimension théorique et celle de la pratique, avec l'objectif prépondérant de parvenir à une compréhension approfondie des mécanismes de synergies technologiques et de leurs retombées dans l'AEC durable et la gestion opérationnelle efficace des projets au sein des entreprises de construction.

CHAPITRE 2 - REVUE DE LITTÉRATURE

Dans la section suivante, nous entreprendrons une exploration conceptuelle détaillée en définissant les concepts clés et en examinant la littérature actuelle pertinente. Cette étape sera essentielle pour déterminer la position précise de notre domaine de recherche, tout en identifiant les tendances émergentes qui façonnent son développement actuel. Nous nous attacherons à dégager des réponses aux questions de recherche préalablement formulées, ce qui contribuera à la mise en place d'un cadre conceptuel approprié.

2.1 LE BUILDING INFORMATION MODELING (X1)

À l'ère de l'économie du savoir et de la mondialisation, l'évolution technologique se manifeste comme une nécessité incontournable pour stimuler la croissance et l'avancement des organisations (Chen et al., 2022). Cette dynamique se reflète également dans le domaine de la construction et de la gestion des installations (Facility Management, FM), où l'adoption continue du Building Information Modeling (BIM) a été mise en avant. Cependant, une focalisation accrue s'oriente désormais vers l'établissement de normes pour la facilitation de l'échange de données et l'atteinte de l'interopérabilité entre les domaines du BIM et de la gestion des installations, représentant ainsi les nouvelles orientations de recherche émergentes dans ce domaine (Wen, et al. 2021).

Dans ce contexte, Chen et al. (2022) ont fait référence aux travaux d'Aranda-Mena et al. (2009), soulignant que les obstacles entravant le développement de l'industrie de la construction ne résident pas tant dans la révolution innovante des technologies ou des outils (Aranda et al., 2009). Au contraire, les principaux défis résident dans la définition de la valeur des modèles de processus métier pour les projets de construction, l'intégration efficace des technologies de l'information dans les pratiques industrielles et

la création d'un environnement propice au partage d'informations numériques précises, tout en s'appuyant sur des modèles de processus métier (Chen et al., 2022).

En effet, conformément à l'institut national des sciences du bâtiment (NIBS), le BIM est explicitement défini comme " la représentation numérique des aspects physiques et fonctionnels d'une installation. En conséquence, il agit comme une source de connaissances partagées qui rassemble les informations concernant une installation, fournissant ainsi une base solide pour la prise de décisions à chaque étape de son cycle de vie, dès son origine" (AlJaber, et al 2023, p.5).

2.1.1 Évolution et application du Building Information Modeling

Le Building Information Modeling (BIM) constitue un modèle virtuel qui intègre l'ensemble des disciplines et systèmes d'une installation dans un modèle cohérent, améliorant ainsi la précision et l'efficacité de la collaboration entre les membres de l'équipe de conception (Azhar, 2011). Le cadre virtuel du BIM englobe des données spatiales, des caractéristiques de construction, des évaluations budgétaires, des données géométriques et géographiques, ainsi que la gestion des ressources et des calendriers (Kocakaya et al., 2019; Olawumi et To, 2019).

L'utilisation continue du BIM à toutes les étapes du projet augmente son efficacité, induisant une transformation significative dans la manière dont les actifs sont planifiés, conçus, gérés et finalement démantelés. De plus, le modèle BIM permet l'enregistrement initial des caractéristiques des composants, ce qui facilite le suivi depuis leur approvisionnement jusqu'à leur installation (Charef et al., 2022).

Le champ d'application du BIM s'étend aux domaines de la rénovation et de la maintenance des bâtiments, l'intégration avancée et les modules complémentaires d'un

système BIM favorisent l'interopérabilité (Sandberg et al., 2019). Le processus BIM intègre également des méthodes de gestion des risques et facilite la communication entre toutes les parties prenantes. Grâce à la simulation virtuelle, les professionnels tels que les architectes, ingénieurs et constructeurs peuvent anticiper les défis liés à la conception, la construction et l'exploitation (Azhar et al., 2016).

Les avantages offerts par la modélisation des informations du bâtiment dépassent son utilisation dans les projets de construction classiques. En effet, le BIM peut être appliqué dans divers secteurs de l'industrie de la construction, notamment les domaines des infrastructures routières, ferroviaires, de transport en commun, ainsi que des services publics et énergétiques (Vignal et al., 2021).

Le Building Information Modeling (BIM) s'est développé au-delà de ses applications classiques pour répondre aux besoins spécifiques de diverses industries. Des versions spécialisées telles que la modélisation des informations civiles/construction (CIM), la modélisation des informations sur les ponts (BrIM), la modélisation des informations routières (RIM) et la modélisation des informations sur les tunnels (TIM) ont émergé pour répondre à ces exigences (Sharafat et al., 2021). Une avancée significative est l'I-BIM (Infrastructure Building Information Modeling), une plateforme globale qui gère efficacement différents aspects du développement des infrastructures, y compris les projets géotechniques souterrains et les infrastructures de transport (Fabozzi, 2021; Vignal et al., 2021).

L'intégration du BIM avec un Système d'Information Géographique (SIG) a été examinée pour améliorer la gestion des services publics souterrains (Sharafat et al., 2021). Dans le contexte des projets pétroliers, gaziers et pétrochimiques, le BIM est considéré comme une stratégie conceptuelle robuste applicable tout au long du cycle de vie (Fakhimi et al., 2018).

L'évolution du BIM va au-delà de la modélisation en 3D, englobant les dimensions 4D (planification), 5D (estimation des coûts), 6D (durabilité) et 7D (gestion des installations) (Ghaffarian et al., 2017; Almasri et al., 2022). Pour une approche encore plus complète, Charef a suggéré l'introduction d'une dimension 8D pour englober la gestion durable de la fin de vie des projets (Charef, 2022).

L'approche en 7D du BIM, comme proposée par Kanters, se révèle particulièrement bénéfique dans la phase de conception de la déconstruction, grâce à son contenu détaillé incluant les caractéristiques des matériaux, la localisation des éléments intégrés et les plannings de maintenance (Kanters, 2018). En outre, l'évolution continue du BIM et son application élargie trouvent leur pertinence dans divers secteurs, comme en témoigne l'étude de AlJaber et al. (2023).

Les projets de construction, de plus en plus complexes et exigeants en termes de coût, de délai, de qualité et d'impact environnemental (Zavadskas et al. 2010), nécessitent une approche novatrice pour optimiser les flux de travail et créer une valeur ajoutée accrue. Une avenue prometteuse se dessine dans la synergie entre le Lean Construction et le Building Information Modeling (BIM), permettant une efficacité optimisée tout au long du processus (Sbiti et al. 2021).

L'approche Lean Construction se concentre sur la minimisation des gaspillages, la création de valeur et l'optimisation continue, en utilisant le minimum de ressources nécessaire pour générer des produits à forte valeur (Changali et al. 2023). Dans la phase de conception, l'intégration de cette approche permet une amélioration simultanée de la création de valeur, la réduction des gaspillages, et l'assurance d'un flux d'informations précises et opportunes (Eberhardt et al. 2022).

La collaboration entre le Lean et le BIM est cruciale à chaque étape du projet, en particulier durant la conception, où des décisions prises ont un impact significatif sur les

étapes suivantes (Elmounla et al., 2023). Les avantages de cette convergence sont bien établis, montrant que la combinaison du BIM et des principes Lean peut conduire à une approche plus efficace pour minimiser le gaspillage (Eldeep et al., 2022).

Diverses méthodes Lean, telles que le système Last Planner, la salle collaborative, la conception basée sur des ensembles et la conception axée sur la valeur cible, ont été intégrées au BIM en phase de conception (Sherman et al., 2019). Cette synergie facilite la communication, optimise les évaluations de performances et les estimations de coûts, et assure que la conception est en adéquation avec les objectifs définis (Dehlin et al., 2008).

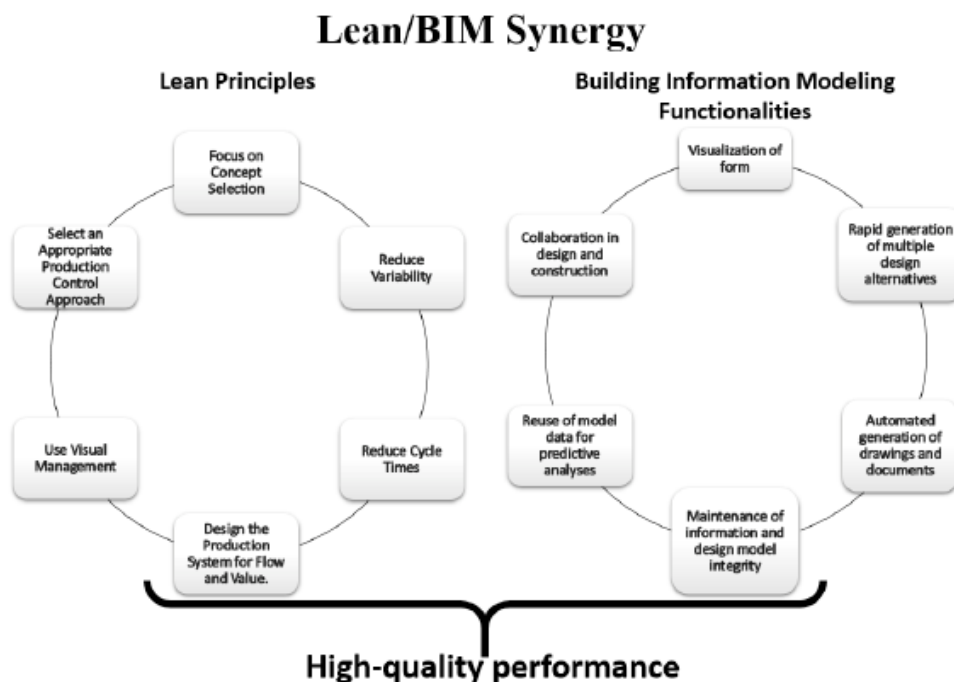
Le partage de modèles avec l'équipe du projet accélère les évaluations de performances et permet d'explorer plusieurs options de conception. Les visualiseurs de modèles dans un environnement collaboratif favorisent la coordination multidisciplinaire en temps réel. Les collisions sont détectées et résolues, améliorant la qualité de la conception et réduisant les retouches ultérieures (Zhang et al., 2018).

La phase de conception dans les projets de construction est souvent entravée par des problèmes tels que des transferts de responsabilités flous, des délais restreints et une communication déficiente entre les parties prenantes, entraînant des retards potentiels (Elmounla et al., 2023). Les techniques Lean, notamment le système du Dernier Planificateur (LPS), peuvent remédier à ces problèmes en réduisant la variabilité du flux de travail, en optimisant la planification des tâches et en utilisant le système pull pour optimiser les processus. L'intégration de LPS et du BIM pendant la phase de conception améliore la planification grâce aux capacités techniques du BIM. Cette combinaison renforce la fiabilité de la planification, optimise le flux de travail et permet d'avancer dans le calendrier (Elmounla et al., 2023).

La prise de décision dans la conception de projets de construction revêt une importance capitale pour maintenir un flux de travail efficace et minimiser le gaspillage (Knotten et al., 2017). L'approche Lean CBA (Analyse coûts-avantages Lean) améliore la prise de décision en comparant les avantages des alternatives et en attribuant des niveaux d'importance à chaque caractéristique, la conception basée sur des ensembles (SBD) retient la prise de décision jusqu'à une phase ultérieure, évitant les décisions hâtives et conduisant à des résultats convaincants en termes de réduction des coûts et d'amélioration de la faisabilité (Dave et al., 2004 ; Dave et al., 2013). L'association du SBD et du BIM offre des solutions optimales grâce à une évaluation efficace et un choix éclairé parmi diverses options (Lee et al., 2012).

Par ailleurs, Elmounla et al. (2023) mettent en évidence l'importance cruciale de la gestion d'équipe cohésive et de la collaboration entre toutes les parties dans la phase de conception. Ils soulignent l'efficacité des méthodes telles que la conception à valeur cible (TVDC), la mise en place de la salle de travail commune et la livraison de projet intégrée (IPD) pour optimiser la prise de décision, la planification et la coopération entre les parties prenantes. L'IPD, lorsqu'il est combiné avec le BIM, offre des avantages significatifs en améliorant l'efficacité et en réduisant le gaspillage grâce à une collaboration approfondie. Cette synergie permet une utilisation transparente et efficace des fonctionnalités BIM, ce qui entraîne une amélioration de la planification et de la prise de décision.

Figure 7 Synergie entre les fonctionnalités BIM et les principes LEAN⁶



En somme, la synergie entre le Lean et le BIM en phase de conception offre une approche holistique pour optimiser la communication, la qualité, les coûts et les performances des projets de construction. Cette convergence prometteuse renforce l'efficacité du processus et ouvre la voie à des méthodologies plus pragmatiques et intégrées.

En outre, l'approche évolutive, mise en avant par Elmounla et al. (2023), se déplace d'une logique de conception préalable au test vers une logique de test préalable à la conception, englobant divers éléments tels que la gestion des modifications, la fonctionnalité, les méthodes de construction, la chaîne d'approvisionnement et les termes.

⁶ El mounla, K. Beladjine, D. Beddiar, K. Mazari, B. (2023). P.6.

commerciaux. Malgré des résultats prometteurs, certaines limitations subsistent, entravant encore l'adoption complète de Lean et du BIM par les concepteurs.

2.1.2 La synergie Building information modeling | Durabilité | Économie circulaire

Les impératifs de durabilité dans le domaine de la construction requièrent l'adoption de méthodologies respectueuses de l'environnement, notamment l'incorporation de matériaux à faible empreinte carbone et la mise en œuvre des principes de l'économie circulaire. L'économie circulaire, axée sur la régénération et la restauration, se distingue particulièrement par son attention portée aux cycles de matériaux (Akerman et al., 2020).

Dans cette optique, l'économie circulaire s'efforce de minimiser les déchets et les émissions en encourageant des méthodes de conception, de réutilisation, de rénovation et de recyclage des matériaux respectueuses de l'environnement. Les constructions circulaires adhèrent à une approche de boucle fermée pour les matériaux et les composants, favorisant l'utilisation d'éléments à faible empreinte carbone et énergétique (Ahmed, T. 2023).

La conception alignée sur les principes de l'économie circulaire met en avant la phase de fin de vie des matériaux (Askar et al., 2022). L'approche de la conception pour le démontage (DfD) encourage la réutilisation et le recyclage en permettant un démontage simple des composants. Pour faciliter le DfD, la modularité et la préfabrication jouent un rôle essentiel (Akinade, et al.,2023).

Par ailleurs, la conception en vue de l'adaptabilité (DfA) et de la flexibilité s'accorde également avec les principes circulaires (Eberhardt et al., 2022). Un bâtiment

adaptable peut être modifié pour prolonger sa durée de vie, tandis qu'un bâtiment flexible peut être réaménagé en fonction des besoins changeants.

En fusionnant les concepts de DfD et de DfA, la conception pour l'adaptabilité et le démontage (DfAD) encourage le démontage des composants, répond aux besoins de modification et prolonge la durée de vie du bâtiment (Munaro et al., 2022).

L'intégration des principes de l'économie circulaire dans la conception des bâtiments présente des opportunités significatives pour réduire le gaspillage, prolonger la durée de vie utile et promouvoir une utilisation responsable des ressources (AlJaber et al., 2023). Néanmoins, l'application de l'économie circulaire dans le secteur de la construction se heurte à des défis techniques, notamment la complexité des structures et la gestion insuffisante des données. Malgré ces obstacles, des travaux tels qu'Akanbi et al. (2019) soulignent que la conception orientée vers la déconstruction peut contribuer à réduire l'impact environnemental.

Outils Building information modeling pour la circularité : Le Building Information Modeling (BIM) joue un rôle central dans la promotion de pratiques durables et l'amélioration des coûts du cycle de vie dans la construction circulaire. Plusieurs outils et études ont démontré l'impact positif du BIM sur la gestion des déchets, les performances des éléments structurels et les analyses du coût du cycle de vie (CCV) des bâtiments.

Certains chercheurs, dont Akinade et al., ont élaboré des instruments exploitant le BIM pour promouvoir la circularité dans la construction. L'indice d'évaluation de la déconstruction basé sur le BIM (BIM-DAS) a été développé pour évaluer la facilité de démontage dès la phase de conception. Parallèlement, l'outil BWPE a été conçu pour évaluer les performances des éléments structurels tout au long de leur cycle de vie, en interagissant avec les passeports de matériaux. De plus, un outil intégrant le BIM avec

l'inférence floue adaptative (ANFIS) a été développé pour anticiper et signaler les déchets de construction (Akinade et al., 2019).

Amélioration des coûts du cycle de vie : Le BIM contribue à l'amélioration des analyses du CCV et de la gestion des coûts de construction. Zoghi et Kim ont montré que l'utilisation d'un modèle dynamique de système (SD) a entraîné une réduction significative des coûts de construction et d'élimination (Zoghi, M et Kim, S 2020). L'expérience d'Azhar confirme que le BIM améliore la collaboration, augmentant la rentabilité et la gestion du temps.

Promotion de la durabilité : L'adoption de systèmes de service de produit (PSS) dans des extensions de durée de vie de produits passifs révèle une réduction des impacts environnementaux et des coûts du cycle de vie (Kaddoura et al, 2019). Ces résultats soulignent que les pratiques circulaires, favorisées par le BIM, contribuent non seulement à la durabilité mais aussi à l'économie.

Figure 8 L'incorporation du BIM dans la construction circulaire et l'évaluation du CCV⁷



En somme, le BIM, en intégrant la circularité dans tous les aspects de la construction, offre un potentiel significatif pour optimiser les coûts du cycle de vie. En facilitant la gestion des déchets, en améliorant les performances des éléments structurels et en rationalisant les processus décisionnels, le BIM renforce la mise en œuvre de pratiques circulaires dans l'industrie de la construction. (AlJaber et al., 2023).

2.1.3 Convergence des blockchains et du building information modeling

La blockchain offre un avantage primordial en abordant efficacement la problématique de la confiance grâce à un réseau permanent (Kuperberg et Geipel, 2021), immuable (Elbashbishy et al., 2022) et fiable (Das et al., 2021). Cette technologie permet de se passer d'intermédiaires (Heiskanen, 2017) et d'automatiser les processus en

⁷ Aljaber, A. Almasri, I. Martinez, P. Baniotopoulos, Ch. (2023). P14.

exploitant sa décentralisation significative (Kang et al., 2022), sa responsabilité (Cheng et al., 2021) et sa cohérence (Xu et al., 2021).

La liaison entre le processus de travail du BIM et la blockchain permet également de suivre les modifications et d'assurer la propriété des données. De plus, la littérature démontre que la blockchain peut exécuter et valider les transactions lorsque les conditions sont satisfaites, tout en favorisant un environnement collaboratif décentralisé dans le domaine de la construction (Perera et al., 2020 ; Celik et al., 2023).

Intégrer BIM et ACV pour une construction durable : L'analyse du cycle de vie (ACV) représente une approche essentielle pour évaluer les répercussions environnementales d'un produit ou d'un système sur l'ensemble de son cycle de vie. Cependant, cette méthodologie complexe comporte différentes approches, de l'analyse du berceau à la porte de l'usine à l'approche plus globale du berceau au berceau. La norme en 1978 définie par l'Europe pour les bâtiments guide l'application de l'ACV adaptée à cette industrie, fournissant un cadre pour évaluer les impacts environnementaux.

L'intégration du Building Information Modeling (BIM) avec l'ACV offre des perspectives prometteuses pour l'industrie de la construction. Cependant, cette union ne se fait pas sans défis. La complexité des outils d'ACV, la gestion de données entre logiciels différents et l'intégration de l'ACV dans le BIM représentent des obstacles à surmonter. L'extraction des données du BIM est aisée, mais l'analyse d'ACV exige souvent des experts pour interpréter les résultats, entravant la comparaison entre les conceptions similaires.

Diverses approches d'intégration BIM-ACV : Plusieurs approches d'intégration BIM-ACV sont disponibles, chacune avec ses avantages et ses limites. Le choix de la méthodologie dépend de facteurs tels que l'accessibilité à des logiciels spécifiques, la disponibilité de plugins BIM, et la convivialité de la programmation

visuelle pour cette intégration. L'utilisation de la programmation visuelle, telle que Dynamo ou Grasshopper, permet de personnaliser l'insertion d'informations environnementales dans les modèles BIM, améliorant la communication entre les outils ACV et les modèles BIM. Cette communication en temps réel facilite l'évaluation des impacts environnementaux lors des modifications de conception (Celik et al. 2023).

Atteindre l'équilibre de l'intégration BIM-ACV : Cette fusion entre BIM et ACV ouvre la voie à une évaluation environnementale dès la phase de conception, atténuant les contraintes du processus d'ACV traditionnel. De plus, elle permet une analyse à l'échelle du bâtiment, depuis l'extraction des matériaux jusqu'à la fin de vie. Les défis sont nombreux, mais les approches dynamiques intégrées utilisant la programmation visuelle montrent un potentiel considérable pour améliorer l'efficacité et la fiabilité de l'évaluation environnementale dans le secteur de la construction.

L'enjeux de la décarbonisation du secteur de la construction : D'ici 2060, les émissions de CO₂ liées aux matériaux de construction pourraient doubler, atteignant 9 % de la consommation mondiale d'énergie, selon le Conseil mondial des entreprises pour le développement durable (2022). Face à la crise planétaire du changement climatique et de la pollution, le secteur du bâtiment doit agir pour éviter une aggravation d'ici 2050. La décarbonisation du secteur, une priorité pour une transition vers un avenir durable, est au cœur des préoccupations (Azam et al., 2022; Cheng et al., 2022; Shafique et al., 2021, 2021; Shafique et Luo, 2022).

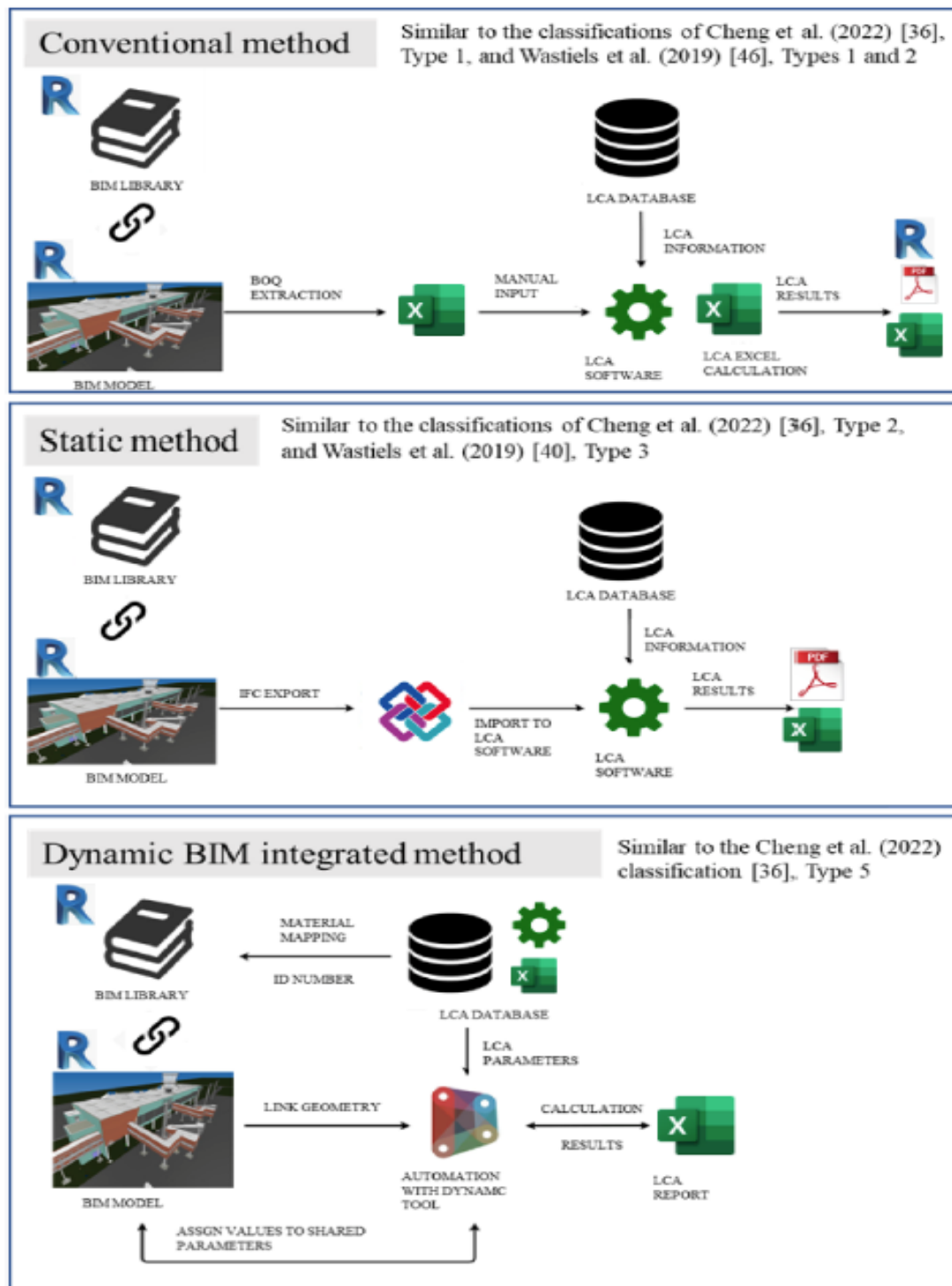
L'adoption globale de la modélisation des informations du bâtiment (BIM) est cruciale pour favoriser la réutilisation des matériaux de construction, depuis leur fabrication jusqu'à leur élimination en fin de vie. En exploitant les données essentielles, telles que les caractéristiques des matériaux et la planification de la démolition, l'utilisation de BIM peut transformer le processus de recyclage en un système dynamique (Zhang et al ; 2020). Les bénéfices environnementaux et économiques résultant de cette

approche pourraient offrir des résultats positifs dans une industrie en proie à des défis écologiques et financiers (Najjar et al., 2022). La conscience que le recyclage des matériaux n'est pas seulement économiquement viable, mais aussi essentiel pour la préservation de l'environnement, guide les professionnels du secteur (Teng et al., 2022).

L'Approche décisionnelle BIM-Écologie : L'approche du Building Information Modeling (BIM) pour les bâtiments écologiques vise à optimiser les performances des bâtiments et à atteindre des objectifs de durabilité. En accélérant le processus de conception de bâtiments respectueux de l'environnement via BIM, les caractéristiques spécifiques à chaque région et type de bâtiment sont prises en compte pour maximiser l'efficacité énergétique et le confort intérieur (Liu et Wang, 2022).

L'association de l'analyse du cycle de vie (ACV) à la modélisation des informations du bâtiment (BIM) simplifient la collecte de données et réduit la complexité des processus manuels (Cheng et al., 2022). L'ACV, qui étudie les impacts environnementaux d'un bâtiment de la production à la fin de vie, peut être optimisée via BIM pour éviter les conflits et défis environnementaux locaux (ISO 14040, 2009). Les études de cas, comme celle menée sur un bâtiment institutionnel en Égypte démontrent l'efficacité de l'approche BIM pour guider des décisions durables. des cadres basés sur le cycle de vie, soutenus par BIM, ont permis de combler les lacunes en matière de performances énergétiques et de répondre aux objectifs durables (Alothman et al., 2021). L'intégration réussie de BIM et de l'analyse de performance du bâtiment (BPA) a même ouvert la voie à la conception de bâtiments à consommation énergétique nette nulle (NZ) (Guignoneun, G et al., 2023).

Figure 9 Type d'intégration de BIM et ACV ⁸



En résumé, l'avenir durable de l'industrie de la construction repose sur la convergence de deux approches novatrices, à savoir le Building Information Modeling (BIM) et l'analyse du cycle de vie (ACV). Ces synergies promettent une réduction significative des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) et une amélioration globale des performances environnementales, allant de la phase de conception à la gestion en fin de vie des bâtiments (Celik et al., 2023).

2.1.4 Le Building information modeling au service de l'analyse énergétique

Face à l'urgence environnementale et à la nécessité de réduire la consommation d'énergie, l'analyse énergétique des bâtiments gagne en importance. Les méthodes actuelles de simulation énergétique sont complexes et chronophages, exigeant une intégration précoce du cycle de vie pour optimiser l'efficacité et réduire les coûts (Stadel et al, 2011).

L'intégration du Building Information Modeling (BIM) à l'analyse énergétique offre des solutions contemporaines. Autodesk Insight, basé sur le BIM, permet une évaluation précoce des options de conception, donnant aux ingénieurs une vue d'ensemble pour planifier, construire et gérer efficacement les bâtiments (Zang et al, 2020). En utilisant les outils conceptuels énergétiques du BIM, tels qu'Autodesk Green Building Studio, les professionnels peuvent explorer des économies d'énergie, évaluer les alternatives et analyser les impacts environnementaux (Wang, J et Lu, W.A, 2021 ; Ullah et al, 2019).

⁸ Broholi, O (2020), P18.

Modélisation énergétique des bâtiments avec Autodesk Revit et Insight 360 :

Autodesk Revit joue un rôle clé en convertissant un modèle 3D en modèle énergétique du bâtiment (BEM), prêt à être soumis à une analyse approfondie via Autodesk Insight 360. La modélisation dynamique du bâtiment, réalisée dès les premières étapes, permet une simulation énergétique complète. Les données climatiques du site sont recueillies par une station météo locale, et les paramètres d'énergie, incluant la chaleur générée par les composants du bâtiment, sont intégrés pour une analyse précise, Autodesk Insight 360 optimise les résultats et offre des options de conception et des aperçus des performances potentielles (Junaid. A et Ahmed. U, 2020).

Les technologies BIM et les outils d'analyse énergétique permettent des évaluations détaillées. Une méthodologie de cercle à 360 degrés, avec un intervalle de 45 degrés, a été employée pour réaliser un audit énergétique virtuel, évaluant la consommation de référence du bâtiment en fonction de son orientation (Junaid, A et Ahmed U, 2020).

En somme l'intégration du BIM à l'analyse énergétique révolutionne la conception de bâtiments économes en énergie. Grâce à des outils comme Autodesk Insight, les professionnels peuvent optimiser les performances énergétiques, réaliser des économies de temps et d'argent, et contribuer à la construction d'un avenir plus durable (Zhang et al., 2022).

2.2 LE JUMEAU NUMÉRIQUE (X2)

La gestion de projet de construction (CPM) est intrinsèquement complexe, avec Des taux élevés de problèmes signalés, selon Ballard et Howell (1994), 50 % à 80 % des problèmes sur les chantiers de construction résultent de retards de réception ou du manque d'informations disponibles, ce qui a conduit à remettre en question l'efficacité du CPM

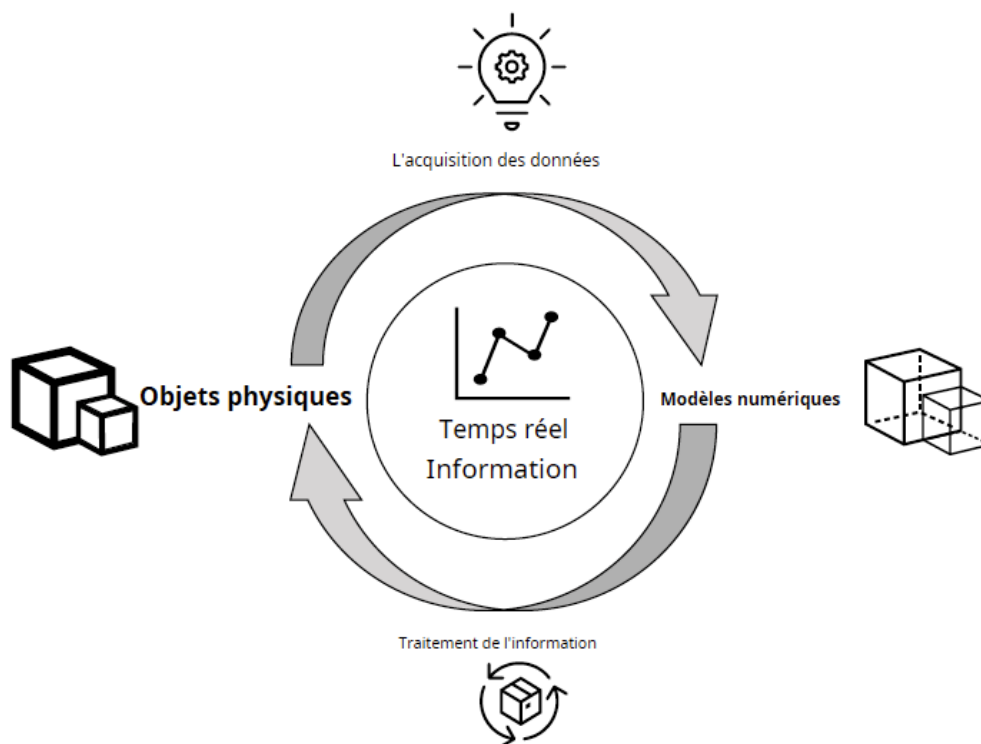
dans le secteur de la construction, en comparaison avec d'autres industries (Daboun et al., 2022).

L'industrie de la construction subit une transformation sans précédent grâce à l'évolution rapide des technologies de l'information. Parmi ces technologies, le jumeau numérique (DT) a attiré une attention considérable récemment. Sa mise en œuvre repose sur la création d'une représentation numérique d'une entité physique et l'utilisation de données pour simuler ses interactions dans le monde réel (Hosamo et al., 2022).

Dans l'industrie de la construction, le jumeau numérique est au cœur de l'innovation. Il implique la création d'une version numérique d'une entité physique et l'utilisation de données pour simuler son comportement dans l'environnement réel (Xie et al., 2023).

L'industrie de la construction est en train de se transformer, en grande partie grâce au jumeau numérique. Cette technologie permet de créer des modèles numériques d'entités physiques et de simuler leur fonctionnement dans le monde réel à l'aide de données (Xie et al., 2023).

Figure 10 Un modèle conceptuel de technologie de jumeau numérique⁹



L'intégration du jumeau numérique dans l'industrie de la construction entraîne des transformations majeures. Elle permet de créer des répliques numériques de haute précision des actifs physiques, ouvrant la porte à une simulation précise, à une analyse détaillée et à des prévisions sans précédent. Le jumeau numérique, intégré à une gamme variée d'appareils tels que les dispositifs IoT, les enregistreurs de données, les scanners 3D, les caméras thermiques et les capteurs environnementaux, a la capacité de collecter des données expérientielles de première main concernant les actifs physiques (Hossein et al., 2023).

⁹ Omrany, H. Al obaidiz, K. Husain, A. Ghaffarianhoseini, A. (2023). P2.

Le jumeau numérique est en train de révolutionner l'industrie de la construction grâce à son intégration avec divers appareils tels que les IoT, les enregistreurs de données, les scanners 3D, les caméras thermiques et les capteurs environnementaux. Cette technologie permet de collecter des données expérientielles essentielles relatives aux actifs physiques.

L'utilisation du jumeau numérique est en pleine expansion dans l'industrie de la construction, offrant un potentiel considérable pour optimiser les processus de conception et améliorer la performance des bâtiments. Plusieurs études ont exploré son application dans les infrastructures civiles et l'optimisation de la conception des bâtiments (Hosamo et al., 2022).

2.2.1 Évolution et applications des jumeaux numériques

Les applications des jumeaux numériques ont trouvé leur place dans divers domaines et ont joué un rôle significatif dans des secteurs variés tels que la fabrication, l'aviation, la santé et les transports. Dans le secteur manufacturier, Rosen et son équipe (Boschert, S., & Rosen, R. 2016). ont examiné quatre aspects cruciaux pour l'avenir de la fabrication : la modularité, la connectivité, l'autonomie et les jumeaux numériques. Schleich et ses collègues (B. Schleich, et al., 2017) ont discuté de la manière dont les jumeaux numériques influencent la conception et l'ingénierie de production, soulignant leur capacité à améliorer la reconception, l'évolutivité, l'interopérabilité et l'expansibilité des produits. Uhlemann et al. (2017) ont mis en avant le rôle des jumeaux numériques dans le contrôle de la production en temps réel dans l'industrie. De plus, Grieves et Vickers (Grieve, MW et JH, Vickers, 2017) ont examiné comment les jumeaux numériques peuvent atténuer les comportements imprévisibles dans un système complexe.

En fin de compte, le JN a été appliquée à tous les stades du cycle de vie des produits, apportant efficacité, intelligence et gestion durable. Cela signifie que le JN peut être utilisée pour la gestion complète du cycle de vie, couvrant les phases de conception, de construction, d'exploitation et de maintenance d'un actif (Qi, Q., & Tao, F. 2018).

Dans le secteur de la construction, les jumeaux numériques trouvent leur place dans divers domaines d'application, tels que la gestion du cycle de vie, l'analyse des big data, la surveillance en temps réel, la prise de décision et la prédiction des performances (Opoku, et al., 2021). Les chercheurs ont examiné six domaines d'application spécifiques au cycle de vie d'un projet, notamment le Building Information Modeling (BIM), l'intégrité du système structurel, la gestion des installations, la surveillance, les processus logistiques et la simulation énergétique. Les JN ont démontré leur capacité à réduire les coûts de construction et d'exploitation, à augmenter la productivité et la collaboration, à améliorer la sécurité et à optimiser les performances et la durabilité des actifs (Opoku, et al., 2021). Il est à noter que la plupart des applications des jumeaux numériques dans le secteur de la construction se sont historiquement concentrées sur une seule phase du cycle de vie, mettant davantage l'accent sur l'ingénierie de conception, l'exploitation et la maintenance (Hosseini, et al., 2023).

2.2.2 La synergie Jumeau Numérique | Efficacité énergétique | Confort thermique

Les études discutées dans ce contexte mettent en évidence les avantages du jumeau numérique dans l'industrie de la construction, montrant comment il peut améliorer l'efficacité de la conception, la gestion des coûts d'exploitation des bâtiments écologiques et le confort des occupants (Victor, et al., 2023).

L'adoption généralisée du jumeau numérique dans le secteur de la construction joue un rôle crucial dans l'amélioration de l'efficacité énergétique et la promotion de la durabilité. Cette technologie permet une surveillance en temps réel des modèles de consommation d'énergie, identifiant les inefficacités et les possibilités d'optimisation (Xi, et al., 2020).

Les jumeaux numériques jouent un rôle essentiel dans la conception et l'amélioration des bâtiments à consommation énergétique net zéro (NZEB). Ils permettent de simuler des scénarios, d'évaluer les choix de conception et d'optimiser la performance énergétique, contribuant ainsi à la réalisation d'objectifs énergétiques ambitieux (Victoret, al., 2023).

L'adaptation et la considération du confort thermique dans la conception des bâtiments sont sujettes à des variations liées aux conditions climatiques régionales et aux préférences culturelles des populations locales. Ces facteurs jouent un rôle essentiel dans la détermination du niveau de confort thermique, et ils doivent être pris en compte tout au long du processus de conception et d'entretien des espaces intérieurs. Cette approche diversifiée de la conception des bâtiments vise à créer des environnements accueillants et confortables pour tous les occupants, quels que soient leur âge, leur origine ou leur sexe, tout en optimisant l'efficacité énergétique (Zhao et al., 2021).

L'objectif central de la conception orientée vers le confort thermique est de créer des espaces où les occupants se sentent à l'aise, prenant en compte des éléments tels que la sensation de chaleur ou de froid, la transpiration, la perception de la température de l'air, la vitesse de l'air, l'humidité et d'autres paramètres physiologiques. Ces facteurs combinés définissent le niveau de confort thermique d'un individu. Divers instruments tels que les thermomètres, les hygromètres et les anémomètres étaient utilisés pour évaluer le confort thermique. Cependant, avec l'avènement des technologies numériques et de l'internet des

Objets (IoT), de nouvelles méthodes de surveillance sont apparues (Jung et al., 2011 ; Corgnati et al., 2007 ; Serghides et al., 2015).

Les récentes avancées technologiques ont également permis la prédiction du confort thermique à l'aide de réseaux de neurones artificiels et de l'intégration du BIM et de l'IoT (Escandon et al., 2019 ; Abdarahman et al., 2022). Cependant, la plupart de ces approches se concentrent sur quelques paramètres, tels que la température et l'humidité, négligeant d'autres facteurs tels que la vitesse de l'air et la température radiante (Victoret al., 2023).

De plus, des initiatives innovantes utilisant des montres intelligentes, des bureaux de vote, des espaces de travail interactifs et des codes QR ont été adoptées pour collecter des données subjectives sur le confort thermique des occupants (Abdarahman et al., 2022). Néanmoins, ces approches soulèvent des questions concernant la validité et la fiabilité des données collectées.

L'intégration des jumeaux numériques dans l'évaluation du confort thermique représente une avancée prometteuse, bien que des défis subsistent quant à la prise en compte de l'ensemble des paramètres du confort thermique et à la fiabilité des données collectées.

D'ici 2040, la répartition de la consommation énergétique entre les bâtiments résidentiels et non résidentiels/commerciaux est prévue à 58 % et 42 % respectivement (Ohan, et al.,2022).

L'exemple de l'étude de Schweigkofler (2022), en Italie qui a exploité l'intégration du BIM et de l'IoT pour la gestion de l'énergie dans les bâtiments scolaires. Cette étude a mis en place une solution flexible basée sur le cloud pour la surveillance en

temps réel de l'environnement intérieur, en mettant particulièrement l'accent sur la gestion de l'énergie. Néanmoins, elle présente certaines limites, notamment un nombre restreint de capteurs utilisés et l'absence d'un système de rétroaction et de contrôle automatique au sein des bâtiments. D'autres travaux de recherche ont intégré la simulation énergétique des bâtiments ou la surveillance des installations pour évaluer la consommation énergétique. Il est important de noter que cette étude s'est uniquement focalisée sur la surveillance intérieure et n'a pas évalué la consommation énergétique des équipements du bâtiment. Ces différentes études ont utilisé diverses technologies, telles que des capteurs, des bases de données cloud (telles que les bases de données Influx et MySQL), le BIM, des dispositifs IoT, et Arduino (pour l'envoi des données des capteurs vers le BIM). De plus, elles ont structuré leur cadre conceptuel se structure en 3 à 5 couches distinctes. L'ensemble de ces recherches témoigne des avancées dans l'utilisation de l'IoT et du BIM.

Hosamo, dans son travail (Hosamo, et al., 2022), a tiré parti d'un réseau de neurones artificiels et d'un algorithme génétique multi-objectifs pour optimiser à la fois le confort thermique et la consommation d'énergie. Cette approche a permis d'économiser entre 10,8 % et 13,2 % d'énergie pendant la période estivale. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer les économies d'énergie potentielles au cours des autres saisons de l'année (Peng, et al., 2020).

D'autre part, une tentative a été faite en Chine pour réduire la consommation d'énergie d'un hôpital de 1 % en utilisant un centre de contrôle basé sur des jumeaux numériques. Cependant, les résultats de cette étude ne se sont pas avérés pratiques ni confirmés (Z, Ni et al., 2021).

Le jumeau numérique se profile comme une technologie révolutionnaire qui a le potentiel de remodeler l'industrie de la construction en optimisant les processus, en réduisant les coûts et en améliorant la performance des bâtiments, tout en favorisant l'efficacité énergétique et la durabilité.

Un jumeau numérique se compose de trois éléments essentiels : l'espace physique, l'espace numérique ou virtuel, et les données qui circulent entre eux (assurant un échange bidirectionnel). Le concept du jumeau numérique appliqué à la Gestion du Cycle de Vie des Produits (PLM) implique une liaison permanente entre ces deux systèmes (numérique et physique) tout au long de la durée de vie du produit ou du système.

Le jumeau numérique représente de manière exhaustive les entités physiques dans le domaine numérique. Ces jumeaux numériques peuvent être classés en trois catégories distinctes : le Prototype de jumeau numérique (JNP), qui est construit en tant que modèle numérique d'un objet qui n'a pas encore été créé dans le monde physique ; l'Instance de jumeau numérique (JNI), qui est un jumeau numérique à part entière en lui-même ; et l'Agrégat de jumeau numérique (JNA), qui est la combinaison de plusieurs jumeaux numériques virtuels.

Les jumeaux numériques offrent des opportunités considérables pour améliorer l'efficacité énergétique et le confort thermique des bâtiments, mais des efforts supplémentaires sont nécessaires pour relever les défis actuels et explorer de nouvelles avenues de recherche.

L'examen des applications des jumeaux numériques met en évidence certains défis. Les facteurs tels que la vitesse de l'air et la température radiante méritent une attention accrue. L'intégration de la perception subjective des occupants dans la surveillance du confort thermique est un domaine en croissance. De plus, de nombreuses technologies et outils visent à optimiser l'efficacité énergétique des bâtiments existants, mais des recherches plus approfondies sont nécessaires pour comparer leur précision (Victor, et al., 2023).

En somme, les jumeaux numériques sont largement étudiés pour leur rôle dans le confort thermique et l'efficacité énergétique. Cependant, il est crucial d'accorder une

attention accrue aux préférences thermiques des occupants et à la combustion thermique. Les études antérieures révèlent des disparités régionales dans la recherche, soulignant la nécessité d'une collaboration internationale (Victor, et al., 2023).

2.2.3 La convergence de jumeau numérique et la Block chaine

La blockchain : une technologie de registre distribué émergente, offre des avantages tels que la sécurité, la transparence et l'efficacité (Scott et Boyd, 2021). Les différentes générations de blockchain (Blockchain 1.0, 2.0, 3.0, et 4.0) démontrent son évolution, allant de la finance à l'intelligence artificielle et à l'industrie 4.0 (Figueiredo et al., 2021).

La blockchain repose sur trois éléments clés : les registres distribués, les mécanismes de consensus et la cryptographie, assurant la sécurité et la fiabilité des données (Elli et al., 2018 ; AI Sanka et RC Cheung, 2021).

Dans l'ère Blockchain 3.0, les DApps (applications décentralisées) intègrent le stockage et la communication décentralisés, tandis que Blockchain 4.0 devrait impliquer la prise de décision automatique de l'IA (Maesa, 2020).

Comparativement, la gestion de projet de construction traditionnel souffre de lacunes en matière d'intégration et de sécurité de l'information (Das et al., 2022). Basé sur le cloud a été développé mais reste insatisfaisant pour le traitement des données dans les projets de construction temporaires et fragmentés (Stanitsas, 2021). Cependant la blockchain émerge donc comme une solution prometteuse pour le moderniser en surmontant ces défis (Stanitsas, 2021).

L'intégration de la blockchain dans la gestion de projet de construction : La block chaine en tant que technologie innovante, suscite un intérêt croissant dans les milieux universitaires et industriels. Malgré cela, son application concrète dans la gestion de projet de construction (CPM) en est encore à ses débuts. Par exemple, Xue et Lu (2020) ont proposé une approche de transaction différentielle sémantique (SDT) pour réduire la redondance des informations dans le développement BIM (Li, 2021) a développé un modèle basé sur la blockchain pour superviser les opérations spatio-temporelles dans la construction. Les contrats intelligents ont également montré leur utilité dans l'automatisation des processus de construction, tels que les mises à jour des variations et les paiements automatiques (Wu, W et al., 2021) ainsi que l'approbation de la documentation (Das, M et al., 2022).

Un exemple concret de l'application de la blockchain dans la construction est le projet "ChainPM" qui a été mis en œuvre à Hong Kong pour superviser un projet de construction modulaire. Ce projet visait la construction d'une résidence étudiante pour l'Université de Hong Kong, impliquant des processus de fabrication en Chine, de pré-assemblage à Hong Kong, et enfin de livraison et d'installation sur le chantier. ChainPM a permis la gestion efficace de ces opérations complexes en fournissant des fonctionnalités essentielles pour les fabricants, les entrepreneurs et les autorités de réglementation (Zhao, et al., 2022).

Le système ChainPM a été développé en utilisant des technologies logicielles avancées, notamment Node.js pour les contrats intelligents, SQLite pour l'indexation des données, et Hyperledger Fabric pour la blockchain. Les résultats expérimentaux ont révélé des avantages significatifs en termes de temps de réponse et d'efficacité par rapport aux systèmes conventionnels (Blockchain 2.0), notamment dans des scénarios hors ligne. Cette approche innovante présente un grand potentiel pour l'amélioration de la numérisation et de l'intégrité des données dans la gestion de projet de construction (Zhao, et al., 2022).

La littérature existante a présenté des modèles clés tels que la blockchain des objets BIM circulaires et la théorie de la tasse d'eau, qui positionnent la BCT comme un conteneur de confiance pour la sécurité des données dans le BIM et l'IoT. Ce concept peut également s'étendre au Cyber-Physical Systems (CPS) et aux Jumeau numérique (DT), où la BCT peut jouer un rôle central en matière de sécurité et de confiance (Kuzlu, et al., 2019).

En conclusion, ChainPM présente une solution prometteuse pour surmonter les défis de la gestion de projet de construction traditionnel grâce à l'utilisation de la technologie blockchain. Des résultats expérimentaux ont démontré une amélioration significative des performances temporelles par rapport aux systèmes conventionnels (Liu, et al., 2019).

Les défis environnementaux de l'adoption de la blockchain : l'un des défis majeurs de l'adoption de la BCT dans l'industrie BECOM 4.0 réside dans les facteurs environnementaux. La durabilité environnementale, la consommation d'énergie et la gestion des déchets matériels sont autant de considérations essentielles. La consommation d'énergie élevée de certains réseaux blockchain publics basés sur la preuve de travail (PoW) constitue un défi environnemental. Pour que la BCT bénéficie réellement à la gestion des déchets et à la durabilité, il est impératif d'améliorer l'efficacité énergétique des protocoles blockchain. En somme, l'intégration de la BCT dans l'industrie BECOM 4.0 apporte des promesses passionnantes, mais elle nécessite une attention particulière aux défis environnementaux, à l'efficacité énergétique des protocoles blockchain et à la sécurité des réseaux IoT pour assurer une transition réussie vers un avenir plus sûr et plus durable. L'adoption de la technologie de la blockchain (BCT) au sein de l'industrie BECOM 4.0 s'annonce prometteuse, avec la perspective d'améliorer la confiance, la collaboration, l'efficacité, le partage de données et la sécurité de l'information. Cependant, avant de tirer pleinement parti de ses avantages, il est crucial de relever plusieurs défis importants.

2.2.4 Une feuille de route pour les technologies perturbatrices

Sepasgozar et al. (2023) décrivent une feuille de route en raison de la croissance rapide de la numérisation des technologies perturbatrices de l'industrie AEC. Ces technologies transformeront chaque phase du cycle de vie d'un projet, de la conception à la démolition, en rationalisant les processus, en automatisant les tâches et en améliorant la durabilité. Il s'agit ici de technologies disruptives qui révolutionneront l'industrie AEC au cours des prochaines années.

Impression 4D : Une évolution de l'impression 3D, l'impression 4D permet aux objets imprimés en 3D de changer de forme en réponse à des stimuli externes tels que la lumière, la chaleur, etc. Elle promet de réduire le temps de construction et d'améliorer la durabilité grâce à l'utilisation de matériaux intelligents (Haleem et al., 2022).

Réalité augmentée, virtuelle et mixte : Ces technologies immersives transformeront la manière dont les informations sont partagées et traitées dans l'industrie AEC. Elles permettront une interaction améliorée, la formation et l'apprentissage en utilisant la réalité virtuelle, avec des avantages tels que le stockage dans le cloud et l'automatisation du traitement des données (Zhang et al., 2020 ; Alaloul et al., 2021).

Nuage XR : Cette technologie, regroupant réalité virtuelle, réalité augmentée et réalité mixte, permettra une surveillance collaborative en temps réel et l'intégration du BIM pour une meilleure gestion de projet (Alizadehsalhi et al., 2020 ; Pan et al., 2021).

Métaverse pour AEC et VDC Professional (M-AEC) : Le métaverse, un monde numérique connecté dans le temps, deviendra un hub central pour les professionnels de

l'AEC, offrant des avantages tels que la collaboration à distance, la coordination BIM et VDC, et la présentation immersive des projets. Cependant, des défis juridiques et sociaux devront être relevés (Wang et al., 2022 ; Tsai et al., 2022).

AIoT (IoT intégré à l'IA) : L'AIoT représente l'intégration de l'Internet des Objets (IoT) avec l'Intelligence Artificielle (IA) pour fournir une analyse de données améliorée, des informations dynamiques et des opérations optimisées dans l'industrie de la construction. Il permet une meilleure prise de décision, des prévisions précises et des opérations améliorées en combinant des dispositifs IoT alimentés par l'IA (Ghosh et al., 2021 ; Mannino et al., 2021).

Jumeau Numérique autonomes : Les Jumeaux Numériques sont des représentations virtuelles d'actifs construits qui permettent la simulation de modèles et des prédictions pour la prise de décision améliorée. Les JN autonomes intègrent des données physiques, virtuelles et en temps réel pour optimiser la performance et la surveillance des activités de construction (Sepasgozar et al., 2021 ; Akanmu et al., 2021).

Véhicules à guidage automatique (AGV) : Les AGV sont des véhicules autonomes utilisés pour le transport horizontal de biens dans l'industrie de la construction. Ils offrent des avantages économiques, sociaux et techniques en automatisant les opérations logistiques, en améliorant la sécurité des travailleurs et en réduisant l'empreinte carbone (Yang et al., 2021; Tan et al., 2018).

Exosquelettes : Les exosquelettes sont des dispositifs portables conçus pour augmenter les capacités physiques des travailleurs de la construction. Ils offrent une assistance dans les tâches physiquement exigeantes telles que le levage et la manipulation d'objets lourds (Pradhananga et al., 2021; Nnadi et al., 2020).

Télématique de construction et dispositifs à commande neuronale : La télématique de construction concerne la gestion des données d'actifs et permet de suivre l'emplacement des actifs, de gérer les chantiers, d'optimiser l'utilisation des actifs et de prédire le cycle de vie de l'équipement. Les dispositifs à commande neuronale sont des interfaces cerveau-ordinateur qui permettront de contrôler les dispositifs de construction à distance grâce à une collaboration homme-machine (Trimble et al., 2022; Baduge et al., 2022).

Pendant un certain temps, la littérature s'est principalement concentrée sur l'identification d'applications individuelles pour des technologies telles que la Réalité Virtuelle (VR) ou la Réalité Augmentée (AR), les considérant comme des technologies autonomes. Cependant, les applications de la VR et de l'AR sont restées limitées à certaines pratiques et n'ont pas toujours été prises au sérieux par les professionnels du secteur. Néanmoins, elles peuvent devenir des éléments clés d'un Jumeau Numérique ou d'un metaverse, ce qui rend la technologie de réalité mixte plus pertinente et puissante (Sepasgozar, 2023).

L'avenir de l'industrie de la construction réside dans l'adoption d'un ensemble de technologies, notamment les Jumeaux Numériques, le Building Information Modeling (BIM), l'Intelligence Artificielle (IA), la Construction basée sur les données (BCT) et la Réalité Virtuelle (VR). Cette approche repose sur ce que l'on appelle la technologie convergente, qui encourage les chercheurs et les innovateurs à explorer de nouvelles combinaisons de technologies pour résoudre les défis actuels ou améliorer les méthodes et les processus.

De plus, il convient de noter que cette convergence technologique a également démontré son influence significative sur l'efficacité énergétique. Cette dernière revêt une importance capitale dans l'évolution technologique actuelle de l'industrie de la

construction, en tant que composante fondamentale contribuant à la durabilité globale et à la réduction de l'impact environnemental.

2.3 L'EFFICACITE ENERGETIQUE ET OPERATIONNEL (Y1)

Face aux enjeux du changement climatique et de la crise énergétique, la plupart des nations à travers le monde font la promotion de politiques visant à réduire les émissions de dioxyde de carbone. Les États-Unis, par exemple, se sont engagés à réduire leurs émissions de carbone de 50 % d'ici 2030 par rapport à celles de 2005. De son côté, l'Union européenne s'est fixée comme objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 55 % d'ici 2030 par rapport aux niveaux de 1990. Les deux entités visent à atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 (Tagliapietra, GB, 2021).

En parallèle, le Programme d'incitation à la décarbonisation du Canada, également connu sous le nom de PIDC, est une initiative gouvernementale axée sur l'efficacité énergétique. Il vise à encourager la réduction des émissions de gaz à effet de serre en soutenant financièrement des projets et des technologies favorisant une utilisation plus efficace de l'énergie. Ce programme encourage la transition vers une économie plus verte en promouvant l'efficacité énergétique dans divers secteurs, contribuant ainsi à réduire la dépendance aux combustibles fossiles (Gouvernement du Canada, 2023).

En physique, l'efficacité énergétique d'un système est quantifiée par le rapport entre l'énergie utile produite et l'énergie consommée pour son fonctionnement. Plus précisément, c'est la mesure de la capacité d'un système à fournir une quantité maximale d'énergie utile tout en minimisant la quantité d'énergie nécessaire à son fonctionnement. L'efficacité énergétique d'un bâtiment englobe un ensemble de solutions techniques et logistiques visant à réduire la consommation d'énergie d'un système, chauffage, la climatisation, l'éclairage et à d'autres besoins tout en maintenant ou en améliorant le

confort et la qualité de vie des occupants, cela englobe également les méthodes d'évaluation de ces améliorations de l'efficacité énergétique (Dengun et al, 2023).

2.3.1 La modélisation de l'efficacité énergétique :

Dans leur étude récente, Zhang Dengun et al. (2023) ont présenté AutoBPS, un nouvel outil de modélisation énergétique dédié aux bâtiments urbains. Cet outil a été développé en utilisant le langage de programmation Ruby et vise à calculer la consommation énergétique des bâtiments urbains, à analyser les scénarios de rénovation énergétique et à évaluer le potentiel photovoltaïque des toits. AutoBPS repose sur des bases solides, notamment OpenStudio et EnergyPlus. EnergyPlus est un logiciel open source de simulation énergétique de bâtiments qui englobe divers aspects tels que le chauffage, la climatisation, la ventilation, l'éclairage, ainsi que la gestion de l'eau.

Le flux de travail d'AutoBPS comprend trois étapes principales. Tout d'abord, il commence par la saisie des données SIG, nécessitant diverses informations géométriques et non géométriques concernant les bâtiments urbains. Ces données incluent les empreintes au sol, le nombre d'étages, la hauteur, le type de bâtiment et l'année de construction. Les données SIG sont généralement collectées à partir de bases de données urbaines, souvent disponibles en formats courants tels que Shapefile, GeoJSON, et City Geography Markup Language (CityGML) (Wang et al,2022).

Ensuite, AutoBPS génère des modèles géométriques en convertissant les coordonnées géographiques en coordonnées métriques, prenant en compte la hauteur des bâtiments et le nombre d'étages. Le processus de zonage thermique est également effectué, avec l'adoption d'une approche d'une zone par étage pour équilibrer précision et efficacité (Chen et al, 2022).

Enfin, le module AutoBPS-OSS attribue des paramètres de simulation aux bâtiments en fonction des archétypes, définis en fonction du type de bâtiment, de l'année de construction, et de la zone climatique. Cette attribution est basée sur OpenStudio-Standards, une bibliothèque d'archétypes open source (Ministère logement, 2010 ; Openstudio-Standar, 2021).

AutoBPS a été appliqué avec succès à un quartier du centre-ville de Changsha, couvrant une variété de bâtiments. Les résultats de l'étude ont montré des réductions significatives de la consommation énergétique, jusqu'à 38,6 %, grâce à diverses mesures d'efficacité énergétique et à l'installation de panneaux photovoltaïques (Dengun et al, 2023).

L'expérience démontre l'utilité d'AutoBPS pour la modélisation énergétique des bâtiments urbains et son potentiel pour contribuer à des réductions substantielles des émissions de carbone. AutoBPS sera également adapté et appliqué à d'autres zones urbaines à l'avenir, contribuant ainsi aux efforts mondiaux visant à lutter contre le changement climatique et à promouvoir l'efficacité énergétique (Dengun et al, 2023).

2.3.2 Efficacité énergétique et opérationnel dans les bâtiments

écologiques

Une étude menée par Qiang Wang et ses collaborateurs, vise à explorer l'optimisation multi-objectifs de l'énergie dans les bâtiments écologiques en utilisant un système basé sur l'Internet des objets (IoT) et des algorithmes métaheuristiques binaires. L'objectif principal de cette recherche était de développer un système d'optimisation énergétique pour les bâtiments verts intelligents, qui fonctionne dans le cadre d'un réseau intelligent tout en prenant en considération les caractéristiques de l'environnement local et les comportements des utilisateurs.

Pour atteindre cet objectif, les chercheurs ont mis en place un cadre de système d'optimisation énergétique basé sur l'IoT (GBEOS) et ont élaboré deux procédures de contrôle complémentaires : les systèmes de contrôle SPO et DPO. En combinant ces méthodologies, ils ont créé six algorithmes binaires d'optimisation multi-objectifs visant à minimiser les coûts tout en maximisant le confort des occupants. La gestion de l'approvisionnement en énergie a été réalisée en prenant en compte les prix actuels et futurs de l'électricité ainsi que les préférences des utilisateurs.

Les résultats des simulations ont montré que l'utilisation de ce système d'optimisation permettait d'obtenir des économies de coûts significatives, notamment en ce qui concerne les systèmes photovoltaïques. De plus, un mécanisme de pondération a été mis en place pour trouver un équilibre entre les dépenses financières et le confort des occupants, offrant ainsi aux utilisateurs la possibilité de faire des choix éclairés. En utilisant des systèmes de tarification dynamique tels que RTP ou TUP, les utilisateurs peuvent réaliser des économies supplémentaires par rapport à un tarif fixe (FPP) (Wang et al, 2023).

Dans une étude récente menée par Ahmed T. en 2023, il est avancé que les projets de gestion de bâtiments Green Building (GB) se distinguent par leur intrication complexe de paramètres. Il est soutenu que leur succès ne saurait être expliqué de manière simpliste en considérant chaque facteur de réussite individuellement. Au contraire, la réussite des projets GB découle de l'interrelation complexe entre de multiples facteurs de succès, formant ainsi une propriété émergente qui est essentiellement liée au système global plutôt qu'aux éléments constitutifs considérés de manière isolée.

L'enquête exploratoire a identifié 73 facteurs de réussite de gestion de bâtiments Green Building (GB), dont certains sont nouveaux dans la littérature. Les opinions sur l'importance de ces facteurs varient parmi les professionnels britanniques de la conception et du développement durable, et ces différences sont également liées à la région de

résidence des participants, soulignant le caractère subjectif de l'évaluation du succès des projets. En utilisant une approche basée sur la théorie de la complexité, une analyse des attributs des facteurs de réussite dans le réseau a été effectuée pour évaluer leur importance au sein de ce réseau complexe. L'analyse de robustesse du réseau, réalisée en éliminant progressivement 11 facteurs de réussite, a révélé la complexité des interactions entre ces facteurs lorsqu'ils sont combinés. Ces facteurs sont énumérés comme suit :

Formation de l'équipe de projet : Assurer que tous les membres de l'équipe de projet comprennent le développement et la certification GB. Cela garantit une compréhension commune.

Compétence du client du projet : Le client doit être expérimenté dans les projets GB pour prendre des décisions éclairées et impliquer des professionnels du bâtiment dès le début.

Compétence de l'équipe de projet : L'équipe doit être expérimentée, posséder les compétences techniques nécessaires et comprendre le processus GB.

Collaboration avec l'équipe de projet : Encourager la collaboration dès le début du projet pour une conception intégrée.

Alignement des intérêts de l'équipe avec ceux du projet : Assurer que l'équipe partage les mêmes objectifs de durabilité et de conception rigoureuse.

Engagement précoce de l'équipe de projet : Impliquer les professionnels de l'équipe dès le début du projet pour une meilleure définition des exigences.

Motivation de l'équipe du projet pour obtenir des résultats durables : Maintenir la concentration sur la durabilité et l'obtention de résultats durables.

Motivation du client pour obtenir des résultats durables : S'assurer que le client est engagé dans le développement durable et les objectifs du projet GB.

Implication des utilisateurs finaux dans l'exploitation durable du bâtiment : Les utilisateurs finaux doivent exploiter le bâtiment de manière efficace et durable pour atteindre les performances souhaitées.

Introduction précoce des objectifs du projet : Introduire les objectifs dès le début du projet pour une intégration efficace dans le processus de développement (Ahmed, T. 2023).

Rigueur du développement de la conception du projet : Élaborer une conception rigoureuse pour de bons résultats en construction.

Il est à noter que l'impact des facteurs de réussite sur la performance du projet est significatif lorsqu'ils sont considérés comme un système complexe plutôt que de manière isolée (Ahmed, T. 2023).

2.4 OPTIMISATION (Y2)

L'optimisation peut être définie comme le processus de prise de décision visant à sélectionner les meilleures solutions parmi un ensemble de choix possibles, tout en respectant un ensemble de contraintes données. Cette notion d'optimisation a été initialement développée en tant que discipline mathématique, dans le but de trouver des

solutions optimales à des problèmes spécifiques, comme le soutiennent Boyd et Vandenberghe (Abioye, 2020).

Au fil du temps, l'optimisation a évolué pour devenir un outil de plus en plus accessible et efficace. Cela a suscité un intérêt croissant dans le domaine de la conception architecturale, en particulier aux premières étapes du processus de conception (Jussyk. T, 2017).

2.4.1 Optimisation et conception architectural algorithmique

En effet, l'optimisation offre la possibilité d'améliorer la conception en cherchant à minimiser les coûts de production par unité, à réduire la durée nécessaire pour achever le projet, ainsi qu'à diminuer les coûts de main-d'œuvre et de matériaux. Cependant, il convient de noter que différentes approches d'optimisation peuvent être mises en œuvre, chacune ayant ses propres méthodes et principes, telles que Kanban, Kaizen, Lean, parmi d'autres (Xia et al,2021).

Il est à noter que l'optimisation peut entraîner des changements significatifs dans les processus et les méthodes de travail. Par exemple, certaines entreprises peuvent opter pour la réduction des qualifications de leur main-d'œuvre au détriment de la qualité du produit final, tandis que d'autres peuvent choisir de réduire la quantité de matières premières utilisées, cette démarche d'optimisation s'inscrit dans le cadre d'une approche cyclique et structurée, telle que définie par le Project Management Institute (PMI, 2013), qui vise à faire évoluer les individus, les groupes ou les organisations d'un état actuel vers un futur état générant des avantages tangibles (Jussyk. T, 2017).

Traditionnellement, le processus de conception architecturale débute par une phase de recherche où des informations pertinentes pour le projet sont rassemblées, et des

esquisses préliminaires sous forme de dessins et maquettes sont élaborées. L'objectif de cette phase est de créer une base de discussion pour faciliter les échanges entre les parties prenantes du projet. Cependant, cette phase est souvent contrainte par des limites de temps. Une fois cette phase achevée, l'architecte se concentre sur la transcription numérique du travail réalisé, en utilisant des logiciels spécialisés pour chaque aspect du projet. L'informatique, dans ce contexte, est souvent perçue comme une contrainte, car elle ne contribue pas activement au développement du projet, se limitant essentiellement à une tâche de retranscription (Wortmann, et al 2017). Cela est en partie dû à l'introduction du CAD (Computer Assisted Design) en architecture depuis plusieurs années. Le CAD a été conçu principalement comme un outil de retranscription des dessins, plutôt que comme un outil de recherche ou de développement.

En conséquence, de nombreux architectes sont influencés par les limitations des logiciels qu'ils utilisent, ce qui peut conduire à une sorte de dépendance à un certain flux de travail et à une logique spécifique. En outre, bon nombre d'architectes ont peu ou aucune connaissance des algorithmes sous-jacents aux outils informatiques qu'ils utilisent, ce qui réduit leur interaction à une manipulation de formes prédéfinies via une interface graphique qui masque la complexité mathématique. De plus, la nécessité de transcrire manuellement les données vers différents formats adaptés à différentes professions (comme les ingénieurs en génie civil, les ingénieurs structurels ou les entrepreneurs) entraîne une perte d'efficacité et de précision, car une même idée doit souvent être réinterprétée plusieurs fois pour répondre à ces différentes exigences de format (Rocker, M, 2016).

Dans cette approche de travail linéaire traditionnelle, l'architecte crée d'abord les dessins, les transcrit numériquement, puis se penche sur les aspects liés aux performances du projet. Cette habitude conduit souvent à chercher des solutions simplistes pour rendre les éléments de construction plus efficaces, au lieu de s'appuyer sur des bases géométriques plus solides (Thomas. D, 2018).

C'est à ce stade que l'architecture algorithmique, parfois appelée architecture paramétrique, entre en jeu. Cette approche diffère du BIM traditionnel, tel que Revit, qui est paramétrique dans le sens où il permet de modifier les paramètres de conception sans affecter les relations géométriques prédéfinies. Dans l'architecture algorithmique, le concepteur définit directement l'ensemble des relations géométriques et des paramètres du projet, libérant ainsi l'architecte des contraintes imposées par les logiciels traditionnels. Cette approche encourage l'innovation, car elle permet à l'architecte de concevoir sans être limité par les fonctionnalités préprogrammées des logiciels (Thomas. D, 2018).

Cependant, il convient de noter que les informations générées dans le cadre de l'architecture algorithmique restent souvent captives des logiciels utilisés, ce qui peut entraîner des pertes d'information lors de l'exportation et de l'importation de fichiers, ainsi qu'une interaction basée sur le modèle généré plutôt que sur le code sous-jacent. Certains chercheurs, comme Leitao (2017) et Janssen et al (2017), promeuvent l'utilisation de Visual Control (VC) pour remédier à cette limitation. Cette approche est similaire à celle de la plateforme GitHub pour le développement logiciel collaboratif, mais elle s'applique au développement de projets architecturaux, exigeant ainsi une certaine expertise en informatique (Leito et al, 2017 ; Janssen et al, 2017)

L'architecture paramétrique offre la possibilité de lier plus facilement la forme, la simulation et l'optimisation à travers une série de logiciels indépendants les uns des autres, offrant ainsi plus de liberté et de flexibilité dans le processus de conception. Cette approche permet également de tirer parti de la puissance de calcul de l'ordinateur pour la simulation et l'optimisation, dès les premières étapes de la conception, favorisant ainsi une recherche plus approfondie et innovante (Thomas. D, 2018).

Ainsi, l'optimisation est un concept dynamique qui joue un rôle essentiel dans la prise de décision et l'amélioration des processus, en cherchant constamment à atteindre

les meilleurs résultats possibles tout en répondant aux contraintes spécifiques de chaque projet (Delgado et al, 2021).

Cependant l'architecture algorithmique, en intégrant des algorithmes d'intelligence artificielle, offre un cadre permettant d'optimiser la gestion de projets de construction en exploitant la puissance de l'IA pour générer des conceptions architecturales efficaces et innovantes, contribuant ainsi à l'efficacité et à la durabilité des projets de construction.

2.4.2 L'intelligence artificielle (IA)

La discipline de l'intelligence artificielle (IA) se situe au sein du domaine informatique et poursuit principalement l'objectif de concevoir des systèmes informatiques autonomes capables d'accomplir des missions qui, traditionnellement, exigeraient l'intervention humaine. Ces missions englobent des activités telles que la compréhension du langage naturel, l'auto-apprentissage, la reconnaissance de motifs, et surtout, la capacité à prendre des décisions. La définition de l'intelligence artificielle, selon Russell et Norvig (2010), se lit comme suit :l'intelligence artificielle est le secteur des technologies de l'information dédié à la création de machines capables d'accomplir des tâches qui sollicitent généralement l'intelligence humaine, comme la perception, la compréhension du langage, la prise de décision et l'apprentissage.

2.4.2.1 Application des sous-domaines de l'IA dans l'industrie de la construction

Des avantages similaires dans tous les sous-domaines comprennent des économies de temps et d'argent accrues, une sécurité améliorée, une meilleure précision et une productivité globale accrue. Certaines des limites des sous-domaines de l'IA dans la construction comprennent des données incomplètes, un coût initial de déploiement

élevé, des problèmes d'acquisition de données et de connaissances. Les Domaines d'application communs et opportunités futures de l'IA dans la construction (Abioye et al, 2021).

Optimisation des ressources et des déchets : Le secteur de la construction génère chaque année une quantité croissante de déchets de construction et de démolition (C&DW) en raison de son développement rapide. Cela a un impact négatif sur les ressources environnementales, naturelles et humaines à l'échelle mondiale. Une évolution importante dans la gestion des déchets est passée de l'approche réactive de la gestion des déchets à une approche proactive axée sur les données, appelée Analyse des Déchets (WA). L'utilisation croissante du Building Information Modeling (BIM) en tant qu'environnement virtuel a permis de concevoir des bâtiments avec une minimisation de la production de déchets. L'analyse de données avancée a le potentiel de produire des profils de production de déchets plus détaillés, contribuant ainsi à réduire considérablement le gaspillage (Shan et al, 2018).

L'analyse des déchets repose sur la collecte de diverses données provenant de sources telles que la conception des bâtiments, les caractéristiques des matériaux et les stratégies de construction. Pour transformer ces données en informations pertinentes pour la réduction des déchets, des techniques d'intelligence artificielle (IA) sont nécessaires. L'intégration de techniques d'IA avancées avec le BIM permet d'optimiser la conception pour la construction hors site, la sélection, la réutilisation, la récupération des matériaux, l'approvisionnement efficace en déchets, la déconstruction et la flexibilité (Hasa et al, 2018).

L'analyse des chantiers de construction évolue rapidement vers des environnements de travail intelligents grâce à l'utilisation croissante de capteurs IoT et d'autres technologies numériques. Elle implique la génération, la collecte, le stockage et l'analyse de données provenant des chantiers de construction pour améliorer les

performances du site dans divers domaines. Les données non structurées telles que les images, les vidéos et les rapports sont agrégées dans le BIM et analysées à l'aide de techniques d'IA avancées. Cela permet d'optimiser la planification, la conception, la sécurité, la qualité, le calendrier et les coûts du projet. Le développement d'outils d'analyse de site holistiques basés sur l'IA, alimentés par le cloud, permettra une analyse en temps réel des données générées sur le chantier, améliorant ainsi la productivité, le contrôle de la qualité et la réalisation des objectifs de performance fixés. Un chatbot IA de chantier de construction pourrait également fournir des mises à jour en temps réel sur les activités du chantier, bénéfiques pour les chefs de projet et les parties prenantes concernées (Abioye et al, 2021).

2.4.2.2 Optimisation de la gestion de projet de construction au travers l'IA

Avec l'avènement de l'intelligence artificielle (IA) dès les années 1950, une nouvelle catégorie d'algorithmes baptisée algorithmes évolutionnaires (EA) a vu le jour, regroupant divers membres tels que les stratégies évolutives (ES), la programmation évolutive (EP), les algorithmes génétiques (GA), l'évolution différentielle (DE), et l'optimisation des essaims de particules (PSO) (Kiranyaz et al., 2014). À ses débuts dans les années 1960, l'intelligence artificielle en était encore à ses prémices, et les publications consacrées à l'application de techniques d'optimisation dans ce domaine étaient rares. Toutefois, au fil du temps, l'optimisation a gagné en importance en tant que sujet central de recherche dans l'application des sous-domaines de l'IA à l'industrie de la construction, principalement en réponse aux défis de productivité persistants auxquels cette industrie était confrontée. Une tendance significative dans la recherche au fil des années a également été le passage à l'apprentissage automatique par rapport aux systèmes basés sur la connaissance, devenant ainsi un domaine d'intérêt prédominant dans l'industrie de la construction au cours de la dernière décennie, en grande partie en réponse à la nécessité croissante de résoudre les problèmes liés à la pénurie de main-d'œuvre qualifiée et de compétences. De manière parallèle, la robotique a pris une place grandissante dans les

applications de l'IA dans l'industrie de la construction, notamment grâce à des technologies telles que l'impression 3D, les exosquelettes, et les drones UAV utilisés dans les processus de construction (Toriz et al., 2017). Cependant, il est important de noter que le traitement du langage naturel demeure le sous-domaine le moins exploré dans l'industrie de la construction (Obiyo et al., 2021).

Au cours des dernières décennies, de nombreux chercheurs ont publié des articles portant sur l'application de l'IA et de ses sous-domaines pour relever des défis spécifiques dans le domaine de la construction. Par exemple, l'apprentissage automatique a trouvé des applications dans des domaines tels que la surveillance de la santé et de la sécurité, l'estimation des coûts, l'optimisation des processus de la chaîne d'approvisionnement et de la logistique, ainsi que la prévision des risques (Khobragade et al., 2018). La robotique a également été utilisée dans la surveillance et l'évaluation des performances sur les chantiers, l'assemblage hors site, ainsi que la gestion des matériaux de construction, des usines, et des équipements (Chu et al., 2010 ; Kumar et al., 2016 ; Sepasgozar et al., 2018). Parallèlement, des systèmes basés sur les connaissances ont été mis en place pour des tâches telles que l'évaluation des offres, la résolution de conflits, la gestion des risques et des déchets, ainsi que les évaluations de la durabilité, entre autres (Zhao et al., 2021).

L'intelligence Artificielle (IA) peut jouer un rôle prépondérant dans l'amélioration de l'efficacité de la gestion de projet en automatisant les tâches répétitives et en permettant aux équipes de projet de se concentrer sur des activités plus stratégiques. Par exemple, l'IA peut être employée pour gérer les tâches, optimiser les processus de travail, et planifier les projets de manière à réduire les délais et à accroître la productivité. Des recherches menées par PwC ont révélé que l'utilisation de l'IA dans la gestion des tâches permet de réduire les cycles de travail de 25 % et d'améliorer la productivité de 20 % (PwC, 2018). Certaines études ont même avancé un chiffre allant jusqu'à 90 % (Kazemi et al., 2020). Optimisation de la Planification de Projet L'IA contribue à rationaliser la planification des projets en analysant les données historiques et en temps réel afin

d'identifier les schémas et les tendances. À l'aide d'algorithmes d'apprentissage automatique, l'IA peut anticiper les risques et les problèmes potentiels, permettant ainsi aux équipes de projet de prendre des décisions plus éclairées et de mieux planifier l'utilisation des ressources. Par exemple, l'IA peut être mise en œuvre pour optimiser l'affectation des ressources, l'élaboration des budgets, et la détection des risques en vue de minimiser les coûts et d'améliorer l'efficacité de la gestion de projet. Une étude menée par McKinsey & Company a démontré que l'utilisation de l'IA pour optimiser les plans de projet peut entraîner une réduction des coûts de projet de l'ordre de 15 %, tout en augmentant la productivité de 10 % (McKinsey & Company, 2018). En outre, d'autres recherches ont révélé que l'adoption de l'IA dans la planification de projets peut générer des économies de coûts allant jusqu'à 20 % (Maltese, V., & Romenti, S. (2020); Chen et al., 2018).

2.4.2.3 L'optimisation du management de projet grâce à l'IA

L'intelligence artificielle (IA) est une technologie polyvalente qui trouve des applications variées pour améliorer la gestion de projet. Cette section se penche sur les principales applications de l'IA dans la gestion de projet et met en évidence les avantages de chacune de ces applications.

Gestion de projet : L'IA exerce un impact significatif sur la gestion de projet, améliorant l'efficacité et l'efficience grâce à l'automatisation de certaines tâches et à la fourniture d'informations précieuses aux décideurs. Comme le mentionnent Ravi et Ravi (2015), l'IA peut être mise à profit dans la gestion de projet pour optimiser la planification, la gestion des ressources, la prévision des risques et la maîtrise des coûts. Par exemple, les algorithmes d'apprentissage automatique peuvent contribuer à anticiper les coûts et les délais en se basant sur des données historiques. De plus, l'IA favorise la communication et la collaboration au sein des équipes de projet, notamment à travers l'utilisation d'outils de collaboration basés sur l'IA, tels que les chatbots, qui facilitent la communication et

réduisent les délais de réponse. Enfin, l'IA améliore la prise de décision en identifiant les risques potentiels du projet et en proposant des recommandations pour les atténuer (Boushaba, S., & Chakor, A. 2023).

Planification de projet : L'IA offre un potentiel considérable pour améliorer la planification de projet en fournissant des prévisions précises et en identifiant les risques potentiels. Les algorithmes d'apprentissage automatique permettent également d'analyser les données historiques du projet, repérant ainsi les tendances et les modèles pour aider les chefs de projet à prendre des décisions de planification plus éclairées. Selon Pan et Pohl (2019), l'IA permet aux responsables de projet d'identifier les risques potentiels en analysant les données relatives aux risques et en formulant des recommandations pour les minimiser (Boushaba, S., & Chakor, A. 2023).

Exécution de projet : L'IA peut être mise à profit pour améliorer l'exécution de projet en surveillant les performances en temps réel et en fournissant des recommandations pour optimiser l'utilisation des ressources. Les systèmes d'IA sont capables de surveiller en temps réel l'état d'avancement du projet et d'identifier les problèmes potentiels avant qu'ils ne prennent de l'ampleur, comme le soulignent Zeng et al. (2019). Ils peuvent également orienter l'allocation des ressources en fonction des besoins du projet (Boushaba, S., & Chakor, A. 2023).

Suivi et évaluation de projet : L'IA joue également un rôle crucial dans le suivi et l'évaluation des projets en surveillant en temps réel leur progression et en détectant les problèmes potentiels à mesure qu'ils surgissent. Les systèmes d'IA permettent d'améliorer l'utilisation des ressources et proposent des recommandations pour l'allocation des ressources en fonction des besoins du projet, comme l'indiquent Zeng et al. (2019).

Gestion des risques de projet : La gestion des risques de projet est une étape essentielle dans le processus de gestion de projet, consistant à identifier, évaluer et traiter

les risques potentiels pouvant impacter l'exécution du projet. Avec l'évolution de la technologie, l'IA peut renforcer cette gestion des risques en offrant une analyse plus précise et en identifiant les risques dès le début du processus de gestion de projet, comme le mentionnent Chien et al. (2019). L'IA peut détecter des tendances et des modèles dans les données historiques, indiquant ainsi les risques potentiels. Elle propose également des recommandations pour minimiser ces risques en utilisant des modèles prédictifs. En surveillant l'avancement du projet en temps réel, l'IA permet d'identifier rapidement les problèmes potentiels et d'alerter les responsables de projet pour qu'ils prennent des mesures correctives (Chien et al, 2019).

Il convient toutefois de noter, conformément aux remarques de Bénédicte Huot de Luze, que l'IA pose des défis liés à la qualité des données entrées et aux algorithmes utilisés. Cela nécessite une gouvernance et un contrôle adéquats, avec des compétences en gestion des risques et en audit qui doivent évoluer pour vérifier et challenger les algorithmes employés. Certains professionnels se spécialisent désormais dans ces audits critiques pour garantir des résultats fiables et précis (Boushaba, S., & Chakor, A. 2023).

Tableau 3 Les principaux éléments d'impact de l'AI sur le management de projet¹⁰

Étude menée par PMI (Project Management Institute) en 2020	88% des professionnels de la gestion de projet estiment que l'IA va transformer leur rôle dans les 3 prochaines années.
Enquête de KPMG en 2019	40% des organisations ont mis en place des projets pilotes utilisant l'IA pour la gestion de projet.
Étude réalisée par PwC en 2018	La mise en place de l'IA dans la gestion de projet peut réduire les coûts de projet jusqu'à 35% et augmenter la productivité de l'équipe de projet de 20%.
Enquête menée par Oracle en 2020	82% des professionnels de la gestion de projet pensent que l'IA peut améliorer la précision des prévisions de projet.
Enquête menée par Gartner en 2021	50% des organisations utiliseront l'IA pour la planification de projet d'ici 2025.

En somme L'intelligence artificielle (IA) représente une avenue prometteuse pour améliorer considérablement la gestion de projet, offrant un potentiel considérable en termes d'augmentation de la précision, de l'efficacité et de l'optimisation. Grâce à des capacités telles que l'analyse de données avancées, la modélisation prédictive et l'automatisation des tâches répétitives, l'IA permet de prendre des décisions plus éclairées, d'anticiper les problèmes potentiels, d'optimiser les ressources disponibles et de réduire les risques.

2.5 L'INDUSTRIE DE CONSTRUCTION (Z)

L'industrie de la construction fait face à divers défis qui ont entravé sa croissance et l'ont laissée à la traîne en termes de productivité, notamment par rapport à des secteurs tels que la fabrication. Aujourd'hui, elle demeure l'une des industries les moins numérisées au niveau mondial, en grande partie en raison d'une culture séculaire de résistance au

¹⁰ Boushaba, I. (2023). P12.

changement. Cette réticence à la digitalisation et la prépondérance du travail manuel complexifient considérablement la gestion des projets. De plus, l'absence d'une expertise numérique adéquate et la lente adoption des technologies au sein de l'industrie de la construction ont été associées à des inefficacités financières, des retards de projets, des performances de médiocre qualité, des prises de décision insuffisamment informées, et une productivité, une sécurité et une santé en deçà des standards souhaités. Les entreprises, y compris les PME, opérant dans le domaine de la construction sont confrontées à l'impératif de s'adapter à ce nouvel environnement numérique pour rester compétitives et efficaces (Abiyoe, et al., 2023).

2.5.1 La transformation numérique des entreprises et PME

Les progrès technologiques ont toujours eu un impact significatif sur le fonctionnement des entreprises. À l'heure actuelle, les entreprises cherchent des moyens pratiques de mettre en œuvre des projets de transformation numérique afin de rester compétitives et de satisfaire les attentes de leurs clients (Sores et al., 2018).

Il est essentiel de noter que, bien que les grandes entreprises aient la capacité d'explorer divers projets d'innovation, les petites entreprises nécessitent une approche pragmatique axée sur des objectifs concrets et réalisables. Pour les PME, il est crucial d'adopter une approche qui intègre la complexité sous-jacente des projets de transformation numérique en actions gérables et facilement compréhensibles, plutôt que de recourir à des cadres abstraits. Cette démarche capitalise sur les avantages inhérents aux PME, tels que leur flexibilité, leur agilité et leur moindre contrainte (Kestin et al., 2015). Cependant, il existe actuellement peu de recherches présentant des procédures spécifiquement adaptées aux PME, et il est important de noter que le soutien des unités financées par des fonds publics n'est généralement pas explicitement pris en compte dans ces procédures (Benjamin et al., 2019).

La transformation numérique peut être considérée comme un processus organisationnel itératif, englobant des changements progressifs et perturbateurs rendus possibles par les avancées technologiques numériques. Elle implique la capacité à ajuster un modèle économique en fonction des nouvelles technologies et des innovations dans l'environnement sociotechnique, lesquelles ont un impact sur les opérations et l'expérience client (Gray et al., 2017; Henriette et al., 2015).

La transformation de l'entreprise peut se produire de manière progressive lorsqu'elle est planifiée à l'avance, ou de manière plus soudaine parfois appelée **big bang** (Goerzing et al., 2018). En plus d'exploiter le potentiel numérique et de créer un réseau de valeur et une expérience client numériques, des recherches antérieures menées auprès de 417 organisations en Suisse et en Allemagne ont montré que la plupart des entreprises affichent un niveau de maturité numérique moyen et sont en train de numériser leurs opérations (Goerzing et al., 2018).

En septembre 2018, la Table sur les industries numériques, une composante des Tables de stratégies économiques du Canada, composée d'une douzaine de dirigeants d'entreprises canadiennes, a émis un rapport intitulé "L'impératif de l'innovation et de la compétitivité : Saisir les opportunités de croissance". Dans ce rapport, un défi clair a été lancé au gouvernement du Canada : rendre numériques tous les services gouvernementaux destinés au public d'ici 2025, les rendant ainsi accessibles via Internet et les appareils mobiles, et les proposant à travers un système de connexion unifié (Gouvernement du Canada, 2023).

Alors que les grandes entreprises commencent à saisir les opportunités et les défis de la transformation numérique, les petites et moyennes entreprises (PME) rencontrent encore des difficultés et sont confrontées à des obstacles dans leur parcours vers la DT (Heberle et al., 2017 ; Kesting et al., 2015). Les PME, qui emploient moins de 250 salariés et ont un chiffre d'affaires annuel inférieur à 50 millions d'euros, ne sont souvent pas

considérées comme des innovatrices en matière de modèle économique (BM) en raison du manque de ressources telles que la main-d'œuvre qualifiée, les compétences et le financement (Goerzing et al., 2018). Ainsi, les PME dépendent du succès des projets de transformation numérique pour rester compétitives.

Cependant, pour réussir dans la transformation numérique, les entrepreneurs de PME doivent aller au-delà de la simple intégration des technologies actuelles (Heberle et al., 2017). Il est essentiel de noter que l'adoption technologique arbitraire ne garantit pas automatiquement le succès de l'entreprise, car la technologie en elle-même ne possède pas de valeur intrinsèque (Goerzing et al., 2018). De plus, les besoins en informations et en compétences des PME diffèrent de ceux des grandes entreprises, et elles ont des exigences spécifiques en matière d'outils de soutien, il est à noter que les outils dédiés, simples et adaptés aux besoins des PME sont souvent rares. En outre, les PME ne peuvent pas toujours gérer seules l'ensemble des activités d'innovation nécessaires à la réussite de la transformation (Goerzing et al., 2018).

Cependant, étant donné que les PME sont généralement moins formalisées, moins contraintes, plus agiles et plus flexibles, elles ont la capacité intrinsèque de mettre en œuvre des innovations radicales, surtout si elles peuvent bénéficier de l'accompagnement des unités de soutien financées par des fonds publics (Goerzing et al., 2018). Cela implique la numérisation du modèle opérationnel et l'optimisation des processus (Dirzus et al., 2017), ce qui constitue un catalyseur essentiel, car les processus numériques et automatisés sont de plus en plus cruciaux (Benjamin et al., 2019).

La technologie numérique offre la capacité de représenter des entités physiques de manière numérique et d'établir une connexion bidirectionnelle entre ces entités pour des fonctions telles que l'échange d'informations, la visualisation, la surveillance et la gestion (Madani et al., 2019). La technologie numérique intègre plusieurs technologies, dont le Building Information Modeling (BIM) et l'internet des Objets (IoT), pour créer des

entités numériques et faciliter le transfert d'informations entre le monde physique et le modèle numérique. La technologie numérique présente une gamme variée de capacités en fonction des technologies intégrées et de son application spécifique (Madani et al., 2019).

2.5.2 La technologie digital au sein des entreprises de construction

Dans le domaine de la construction, la technologie numérique est devenue courante, en particulier dans la phase de conception, où elle agit comme un modèle numérique contenant des informations géométriques et contextuelles (Lu et al., 2020). Concernant les actifs immobiliers existants, ces dernières années, avec la rapide évolution de la technologie numérique, les entreprises ont pris conscience de son importance et ont activement investi dans l'innovation technologique numérique (Liu et al., 2021).

Par conséquent, l'innovation en matière de technologie numérique d'entreprise est désormais cruciale pour le développement des entreprises et un facteur clé de leur avantage concurrentiel, l'application de la technologie numérique améliore l'efficacité et la gestion des entreprises, renforçant ainsi leur compétitivité, pour rester compétitives dans un marché concurrentiel en constante évolution, les entreprises doivent activement explorer l'application de la technologie numérique et continuer à innover dans ce domaine. Cela a fait de l'utilisation efficace de l'innovation technologique numérique pour améliorer les performances de l'entreprise un sujet de recherche brûlant dans l'industrie (Sepasgozar, 2023).

Il est important de noter que l'innovation technologique numérique en entreprise ne se limite pas à la technologie elle-même, mais comprend également des changements organisationnels (Liu et al., 2021). Les entreprises doivent adapter leur structure organisationnelle pour répondre aux exigences de l'ère numérique. Cette forme d'innovation requiert également une coopération et une communication avec d'autres

entreprises et organisations pour faciliter le partage des connaissances et des ressources, ce qui améliore les performances des entreprises. Il est donc essentiel d'étudier comment l'intégration des réseaux dans l'innovation numérique des entreprises affecte leur performance en matière d'innovation, tout en tenant compte de l'effet médiateur de l'acquisition de connaissances et de l'effet modérateur de la transformation numérique.

Bien que de nombreux chercheurs aient examiné la relation entre l'intégration des réseaux et l'innovation en entreprise (Liu et al., 2020), ces études n'ont généralement pas pris en compte les éléments contextuels numériques. D'un côté, l'intégration des réseaux d'innovation dans les technologies numériques peut aider les entreprises à accéder à des ressources externes et à des connaissances pour améliorer leurs performances en matière d'innovation (Liu et al., 2020). D'un autre côté, une intégration excessive de ces réseaux peut entraîner des problèmes tels que la réutilisation des connaissances et l'inertie de l'innovation, ce qui peut réduire les performances d'innovation des entreprises (Cheng et al., 2021).

Il reste encore beaucoup à explorer concernant la relation entre l'intégration des réseaux d'innovation technologique numérique et les différents niveaux de performance en matière d'innovation. En outre, l'acquisition de connaissances joue un rôle essentiel en permettant aux entreprises d'acquérir des connaissances, de l'expérience, de la technologie et d'autres ressources externes dans le contexte de l'intégration des réseaux d'innovation technologique numérique (Sepasgozar, 2023). Grâce à cette acquisition de connaissances, les entreprises peuvent accéder à davantage de ressources pour stimuler leur innovation et améliorer leurs capacités technologiques (Huang et al., 2020). Par conséquent, il est essentiel d'étudier si l'acquisition de connaissances joue un rôle de médiateur dans l'impact de l'intégration des réseaux d'innovation technologique numérique sur les performances en matière d'innovation, afin de mieux comprendre le mécanisme sous-jacent.

La transformation numérique est l'une des voies essentielles pour permettre aux entreprises d'innover et de prospérer, car elle renforce leur capacité d'innovation et leur compétitivité (Zhang et al., 2021 ; Wen et al., 2022). Elle aide les entreprises à exploiter plus efficacement les technologies numériques pour améliorer leur productivité, la qualité de leurs produits, leurs niveaux de service, ainsi que leur part de marché et leur rentabilité. Par conséquent, il est essentiel d'examiner si la transformation numérique peut modérer l'effet de l'intégration des réseaux d'innovation technologique numérique sur la performance de l'innovation (Ge et al., 2023).

Une étude a analysé l'impact de l'intégration des réseaux d'innovation numérique sur la performance d'innovation des entreprises chinoises cotées en bourse engagées dans l'innovation technologique numérique de 2010 à 2021. Les résultats indiquent que l'encastrement relationnel et structurel dans ces réseaux ont un effet positif sur la performance d'innovation des entreprises, soulignant ainsi l'importance des relations solides et de la centralité au sein de ces réseaux. De plus, l'acquisition de connaissances joue un rôle clé en tant que médiateur de cette relation, améliorant la qualité et la profondeur des connaissances techniques (Ge et al., 2023). Enfin, la transformation numérique renforce la relation entre l'intégration des réseaux d'innovation technologique et la performance d'innovation, mettant en lumière son rôle crucial à l'ère numérique (Ge et al., 2023).

Il convient de noter que de nombreux professionnels et petites entreprises du secteur de la construction peuvent éprouver des difficultés à adopter et à maîtriser efficacement une multitude de technologies individuelles. C'est pourquoi une approche de convergence technologique, où différentes technologies telles que le BIM, l'AR et le BCT sont intégrées dans un jumeau numérique (DT) connecté, se révèle plus efficace. Cette notion de convergence technologique ouvre de nouvelles perspectives en matière de recherche et d'innovation dans le domaine de la construction (Sepasgozar, 2023).

2.5.3 La synergie entre la digitalisation et la durabilité dans les entreprises de construction

Une revue de la littérature pertinente a révélé qu'il existe des exemples où les jumeaux numériques sont mis en œuvre dans la pratique et où ils facilitent la durabilité et les activités liées à l'économie circulaire. Cependant, la plupart de ces exemples proviennent de grandes entreprises Zheng et al. (2023). L'étude de Schöggl, et al. (2022) a montré que les grandes entreprises sont nettement plus enclines à adopter les jumeaux numériques que les petites entreprises en général, y compris dans le contexte de la gestion de la durabilité. Ces conclusions confirment et étendent les résultats au niveau de l'Union européenne tirés de l'Indice du Numérique 2022 (Commission européenne, 2022a), ainsi que les conclusions d'autres auteurs tels que Zheng et al. (2022), qui ont constaté que la taille de l'entreprise (mesurée par le chiffre d'affaires) influe sur le degré d'adoption des technologies au sein de l'entreprise. Zheng et al. (2023).

En outre, Zheng et al. (2020) ont également révélé que la connaissance de la technologie de l'industrie 4.0 augmente considérablement avec la taille de l'entreprise, et que, en règle générale, les grandes entreprises disposent de ressources plus importantes pour mettre en œuvre les jumeaux numériques que les petites. Une perspective d'analyse différente a été adoptée par Clausen, A et al. (2021).

2.5.4 De l'industrie 4.0 à l'évolutionniste de l'industrie 5.0

Bien que la vision de l'Industrie 4.0 soit encore en développement, il est à noter que l'Industrie 5.0 a déjà pris forme dans le secteur manufacturier et suscite un intérêt croissant dans la littérature. L'Industrie 5.0 est un concept relativement nouveau, ce qui explique le manque de consensus quant à sa définition (Akundi et al., 2022). Cependant, il est généralement compris comme une réponse à l'accent excessif de l'Industrie 4.0 sur

la numérisation et les technologies basées sur l'IA, au détriment des principes fondamentaux tels que l'équité sociale et la durabilité (Xu et al., 2021), dans le contexte de l'Industrie 5.0. Une différence fondamentale entre l'Industrie 4.0 et l'Industrie 5.0 réside dans l'utilisation des robots. Dans l'Industrie 5.0, les robots sont destinés à devenir des "cobots," c'est-à-dire des collaborateurs des travailleurs humains (Weiss et al., 2021).

L'industrie 5.0 représente une évolution de l'Industrie 4.0, avec un accent particulier sur les aspects humains, la collaboration homme-machine, la durabilité et la résilience. Cette transition s'inspire des avancées technologiques antérieures, comme mentionné par Aghimien et al. (2020). L'objectif principal de l'Industrie 5.0 est de numériser davantage l'industrie tout en atteignant des objectifs sociaux et en stimulant la productivité, le développement économique et l'emploi.

Cette nouvelle approche est basée sur trois valeurs fondamentales interdépendantes :

L'humano centrisme : L'Industrie 5.0 place les besoins humains et sociaux au cœur des processus de conception et de fabrication. Elle vise à créer des procédures durables et circulaires pour réduire l'impact environnemental et promouvoir une économie circulaire. Elle vise également à renforcer la résilience des infrastructures critiques pour faire face aux crises.

Centré sur l'Humain : Contrairement à l'idée de remplacer les humains par des machines, l'Industrie 5.0 reconnaît l'importance de l'humain dans l'automatisation et la numérisation. Elle vise à améliorer la gestion des pannes du système tout en favorisant la flexibilité, l'agilité et la sécurité des travailleurs grâce à une collaboration efficace avec les robots.

Durabilité : La durabilité est au cœur de l'Industrie 5.0, en intégrant des pratiques durables depuis les révolutions industrielles précédentes. Elle est essentielle pour répondre aux objectifs de développement durable des Nations Unies, en reliant les ressources de fabrication et les produits architecturaux tout en fournissant des informations transparentes sur la durabilité.

Résilience : L'Industrie 5.0 met l'accent sur la résilience des systèmes industriels, en les préparant à affronter des incertitudes externes et des perturbations continues, même face à des risques non identifiés.

2.5.5 Optimisation de la construction via la transition vers la Construction 5.0

Il est à noter qu'il existe actuellement un manque de recherche substantielle sur le concept de l'Industrie 5.0 dans le domaine de la construction. Par exemple, parmi 132 publications recensées, seul un article pertinent a été identifié (Wang et al., 2022), bien qu'il se concentre principalement sur l'Industrie 4.0 en abordant des sujets tels que le BIM et les jumeaux numériques, malgré l'utilisation du terme **Industrie 5.0** dans son titre. Le terme **Construction 5.0** en tant que mot-clé n'apparaît que dans deux autres publications indexées par Scopus.

L'intégration de la robotique dans le secteur de la construction présente plusieurs avantages potentiels, notamment une amélioration de la compétitivité, la création de nouvelles opportunités d'emploi qualifiées et une contribution à la croissance économique. Cependant, il est important de noter que, malgré cet intérêt croissant pour les technologies robotiques dans la construction (Kim et al., 2022), les robots restent l'un des domaines les moins explorés et les moins utilisés dans la transformation technologique de l'industrie de la construction (Wang et al., 2020 ; Poele et al., 2019).

Dans la perspective de l'Industrie 5.0, où la collaboration homme-robot (HRC) est au cœur du concept, le secteur de la construction devra intégrer opérationnellement l'utilisation des robots, en particulier la HRC. Bien que la HRC soit un concept déjà présent dans la littérature de la construction, sa définition peut varier. Par exemple, Kim et al. (Kim et al., 2022) définissent toute opération de construction réalisée en partenariat homme-robot comme une HRC, indépendamment des intentions ou des actions conjointes, tandis que Liang et al. (Liang et al., 2021) simplifient la catégorisation des activités de construction collaboratives en réduisant les niveaux d'interaction collaborative à quatre et en se concentrant sur l'interaction cognitive.

Ces quatre niveaux comprennent brièvement les éléments suivants : la préprogrammation, où les robots effectuent des tâches répétitives selon des modèles prédéfinis ; la manipulation adaptative, où les robots peuvent être téléopérés ou utilisent des capteurs pour s'adapter à l'environnement ; l'apprentissage par imitation, où les robots apprennent des tâches en observant des experts humains ; et le contrôle improvisé, où les robots planifient et exécutent des tâches sous la supervision humaine, permettant aux travailleurs humains de prendre le relais au besoin.

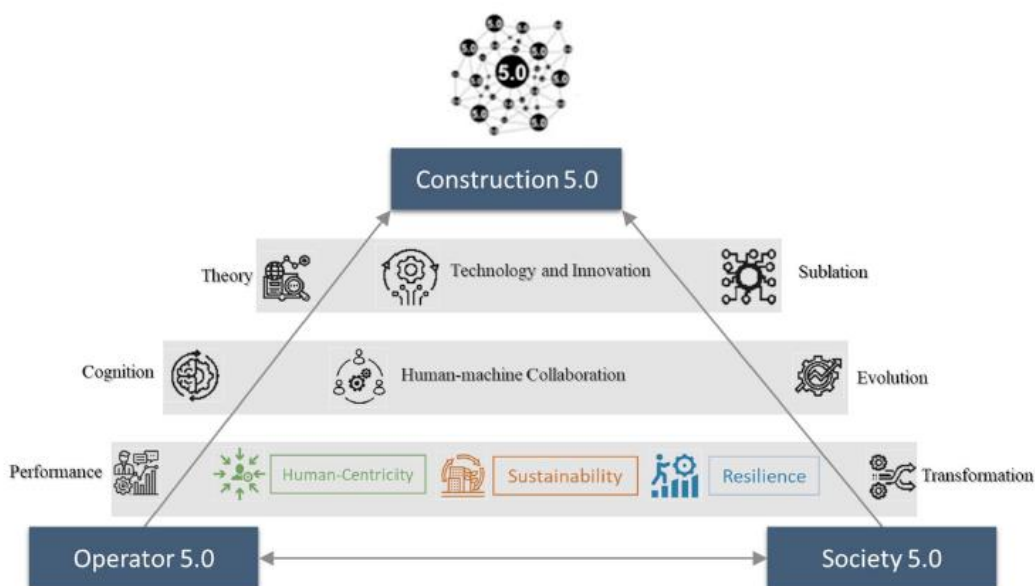
Il est à noter que la recherche dans ce domaine est en constante évolution, et de nouvelles tendances émergentes, notamment l'apprentissage par imitation, montrent un grand potentiel pour l'avenir de la HRC dans le secteur de la construction (Liang et al., 2021).

En somme, l'Industrie 5.0 étend la vision de l'Industrie 4.0 en mettant l'accent sur l'humano centrisme, la collaboration homme-machine, la durabilité et la résilience pour façonner un avenir industriel plus intelligent, durable et socialement responsable.

L'étude mentionnée examine également l'évolution du paradigme Construction 5.0 en identifiant ses caractéristiques et sa diversité. Elle présente l'architecture, le modèle

et le système de Construction 5.0, en mettant en lumière ses principaux moteurs : les Opérateurs 5.0, la Société 5.0, la focalisation sur l'humain, la durabilité et la résilience. À l'aide de la méthode SEM (Structural Équation Modeling), l'étude analyse les relations causales entre ces principaux moteurs du paradigme Construction 5.0. Neuf hypothèses essentielles ont été formulées et minutieusement évaluées, en mesurant les variables clés pour garantir la fiabilité et la validité des concept (Marinelli et al, 2023).

Figure 11 Cadre construction 5.0¹¹



Les résultats ont montré que le modèle construction 5.0 accorde une grande importance à la collaboration entre les êtres humains et les machines, à l'intégration du cyberspace et de l'espace physique, et à l'équilibre entre la durabilité, la technologie et l'innovation.

¹¹ Yetmen, I. Almusaed, A. Alizadehsalehi, S. (2023). P10.

Il est possible de résumer en affirmant que l'avenir de l'industrie de la construction repose sur l'adoption et l'intégration de technologies avancées telles que les jumeaux numériques (DT), le Building Information Modeling (BIM), ainsi que les technologies émergentes telles que l'Intelligence Artificielle (IA), la Construction basée sur les données (BCT) et la Réalité Virtuelle (VR). Néanmoins, des recherches récentes mettent en lumière un intérêt croissant pour l'optimisation de ces technologies grâce à leur synergie à chaque étape du cycle de vie des projets de construction. Cette tendance encourage les chercheurs et les innovateurs à explorer de nouvelles combinaisons de technologies en vue de relever les défis actuels, d'améliorer les méthodes et les processus existants, et de répondre aux besoins de l'industrie.

Une approche émergente, désignée sous le nom de "technologie convergente," suscite un intérêt particulier. Cette approche implique l'intégration harmonieuse de différentes technologies afin de créer des solutions innovantes et efficaces. Elle se révèle prometteuse non seulement pour résoudre des problèmes spécifiques, mais également pour contribuer à la réalisation d'objectifs mondiaux tels que la décarbonisation, la durabilité et le développement économique. Dans cette perspective, la Construction 5.0, qui met l'accent sur la collaboration entre les êtres humains et les machines, l'intégration du cyberspace et de l'espace physique, ainsi que l'équilibre entre les compétences humaines et les technologies, s'avère d'un intérêt particulier pour façonner l'avenir de l'industrie de la construction. Cette approche innovante favorise la durabilité globale, l'efficacité opérationnelle et l'optimisation des ressources, contribuant ainsi à la transformation positive de l'industrie de la construction à l'échelle mondiale.

2.6 MISE EN EVIDENCE DES RELATIONS ENTRE LES FACTEURS

Avant d'explorer en détail les propositions mettant en évidence les relations entre les facteurs clés, il est essentiel de souligner ces relations interconnectées. Cela permettra

d'établir le contexte nécessaire pour comprendre l'impact et les synergies entre ces éléments dans le domaine de la gestion de projets de construction.

2.6.1 Synthèse des propositions

La synthèse des éléments précédemment exposés révèle que l'application des outils, des méthodologies et des technologies émergentes de la Modélisation des Informations du Bâtiment (BIM), comme décrit par la revue, a entraîné une amélioration de l'efficacité énergétique des projets de construction, établissant ainsi la relation ($X1 > Y1$). De manière similaire, l'application des outils associés aux Jumeaux Numériques a démontré une amélioration de l'efficacité énergétique et opérationnelle des projets, établissant ainsi la relation ($X2 > Y1$).

Par ailleurs, l'application des outils BIM a également démontré les avantages de l'optimisation, établissant la relation ($X1 > Y2$), tandis que l'application des Jumeaux Numériques a également confirmé l'optimisation des projets, établissant la relation ($X2 > Y2$).

En outre, l'industrie de la construction a corroboré que l'utilisation du BIM renforce l'efficacité des projets, établissant la relation ($Z > X1 > Y1$), tout comme les projets de construction ont amélioré leur efficacité en utilisant les Jumeaux Numériques, établissant la relation ($Z > X2 > Y1$).

De plus, l'industrie de la construction a également prouvé que l'utilisation du BIM soutient l'optimisation des projets, établissant la relation ($Z > X1 > Y2$), de même que les projets de construction ont augmenté leur niveau d'optimisation en utilisant les Jumeaux Numériques, établissant la relation ($Z > X2 > Y2$), Ce qui nous conduit aux propositions suivantes :

Proposition 1.1: l'intégration des concepts, méthodes, outils BIM (X1) avec d'autres approches technologiques peut améliorer l'efficacité (Y1) opérationnelle et réduire l'impact environnemental.

Proposition 1.2 : L'utilisation des concepts, méthodes, techniques et outils du Jumeaux Numériques (X2) peut améliorer l'efficacité (Y1) opérationnelle et réduire l'impact environnemental.

Proposition 2.1 : L'intégration du BIM (X1) avec d'autres technologies émergentes peut garantir une optimisation (Y2) technique significative.

Proposition 2.2 : L'intégration des jumeaux numériques (X2) avec d'autres technologies émergentes peut conduire à une optimisation (Y2) technique de grande envergure.

Proposition 3.1: L'implication du BIM (X1) au sein des projets de construction (Z) tout au long du cycle de vie d'un projet améliore son efficacité (Y1).

Proposition 3.2: L'implication du Jumeau Numérique (X2) au sein des projets de construction (Z) améliore l'efficacité opérationnel et énergétique (Y1).

Et puis le rôle de médiation de l'industrie de la construction dans la relation entre le BIM (X1) et l'optimisation (Y2), ainsi que dans la relation entre les Jumeaux Numériques (X2) et l'optimisation (Y2) donne lieu aux propositions 4.1 et 4.2.

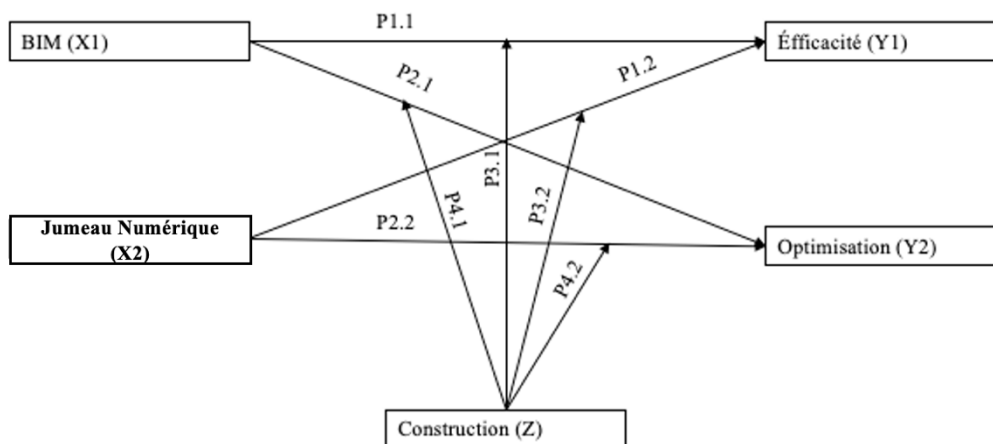
Proposition 4.1 : L'implémentation BIM (X1) et l'adoption de technologie convergente tout en intégrant des pratiques de construction 5.0 contribuent à une

optimisation (Y2) dans la gestion des projets de tout au long du cycle de vie d'un projet de construction (Z).

Proposition 4.2 : L'implémentation Jumeau Numérique (X2) et l'adoption de technologie convergente tout en intégrant des pratiques de construction 5.0, contribuent à une optimisation (Y2) au sein des projet et des entreprises de construction (Z).

2.6.2 Cadre conceptuel de la recherche

Figure 12 Cadre conceptuel de l'étude



2.6.2 Résumé des objectifs, questions de recherche et propositions

Tableau 4 Résumé des objectifs, questions de recherche et propositions

Objectifs		Questions de recherche		Propositions	
O.1.1	(X1>Y1) BIM > Efficacité opérationnel et énergétique	Q.1.1	QR1.1 Comment le BIM, peut être intégrées de manière optimale dans les projets de construction durable pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental ?	P.1.1	L'intégration des concepts, méthodes, outils BIM avec d'autre approches technologiques peut améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental
O.1.2	(X2>Y1) J.N > Efficacité (opérationnel et énergétique) Construction>BIM> Efficacité	Q.1.2	QR1.2 Comment les Jumeaux Numériques peuvent-ils être appliqués de manière efficace pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental ?	P.1.2	L'utilisation des concepts, méthodes, techniques et outils du Jumeau Numérique peut améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental.
O.2.1	(X1>Y2) BIM > Optimisation	Q.2.1	QR2.1 Comment mettre en œuvre efficacement l'utilisation du BIM afin d'assurer une optimisation significative	P.2.1	L'intégration du BIM avec l'I.A et d'autres technologies émergentes peut garantir une optimisation technique significative.

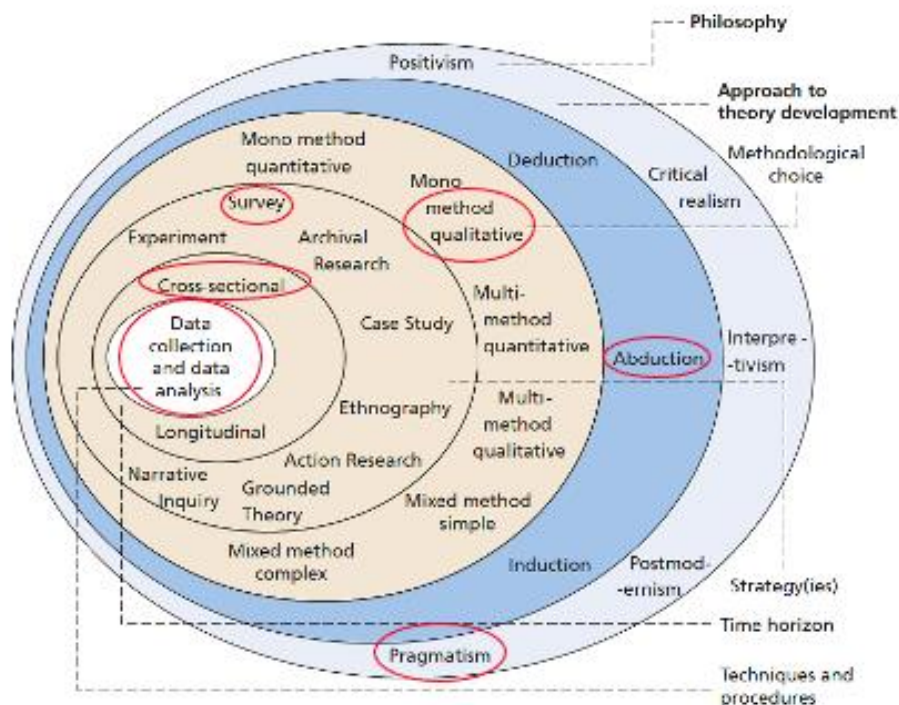
Objectifs		Questions de recherche		Propositions	
O.2.2	(X2>Y2) J.N > Optimisation Construction>BIM> Optimisation	Q.2.2	QR2.2 Comment peut-on exploiter efficacement les jumeaux numériques afin de parvenir à une optimisation substantielle ?	P.2.2	L'intégration des jumeaux numériques avec l'I.A et d'autres technologies émergentes peut conduire à une optimisation technique de grande envergure.
O.3.1	(Z>(X1>Y1)) Construction>BIM> Efficacité	Q.3.1	QR3.1 En quoi et Comment les projets de construction et les entreprises de construction utilisent-elles effectivement les modèles d'information sur les bâtiments (BIM) pour améliorer l'efficacité dans leurs projets de construction ?	P.3.1	L'implication du BIM au sein des processus de gestion de projets de construction tout au long du cycle de vie d'un projet de construction améliore son l'efficacité.
O.3.2	(Z>(X2>Y1)) Construction>J.N> Efficacité	Q.3.2	QR3.2 Comment l'intégration des jumeaux numériques dans la gestion de projet de construction impacte-t-elle l'efficacité opérationnelle, les coûts et la qualité des projets ainsi que l'efficacité énergétique dans les projets de construction et les entreprises de construction.	P.3.2	L'implication du J.N au sein des projets de construction rationalise la planification, la conception, la gestion de projet et améliore l'efficacité opérationnel et énergétique.
O.4.1	(Z>(X1>Y2)) Construction>BIM> Optimisation	Q.4.1	QR4.1 Comment opérer l'optimisation du Building Information Modeling (BIM), au sein des processus de gestion de projets de construction tout au long du cycle de vie d'un projet de construction, de la conception à la démolition ?	P.4.1	L'implémentation BIM et l'adoption de technologie convergente tout en intégrant des pratiques de construction 5.0 contribuent à une optimisation dans la gestion des projets de tout au long du cycle de vie d'un projet de construction.
O.4.2	(Z>(X2>Y2)) Construction>J.N> Optimisation	Q.4.2	QR 4.2 Quelles sont les meilleures pratiques d'intégration des Jumeaux Numériques dans l'industrie de construction pour qu'ils puissent s'adapter aux besoins changeants des projets de construction ?	P.4.2	L'implémentation J.N et l'adoption de technologie convergente tout en intégrant des pratiques de construction 5.0, contribuent à une gestion optimale au sein des projet et des entreprises de construction

CHAPITRE 3 - MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Dans ce chapitre dédié à la méthodologie de recherche, notre objectif est de préciser la perspective de recherche et la manière dont nous avons l'intention de mettre à l'épreuve les propositions établies dans le chapitre précédent. Pour ce faire, nous allons présenter et clarifier les différents aspects étudiés dans le cadre de notre recherche, résumés dans la figure 13 qui fait partie intégrante du modèle conceptuel de l'oignon de Sandres, le modèle utilisé pour structurer cette recherche.

Le diagramme d'oignon de la recherche de Saunders (2009) est un outil visuel pour représenter graphiquement la structure d'une recherche, en particulier en méthodologie qualitative. Son objectif principal est de fournir une vue d'ensemble claire et organisée de la conception et de la réalisation de la recherche. Il organise les éléments clés en couches concentriques, aide à visualiser la structure de la recherche, identifie les niveaux d'abstraction, facilite la communication, soutient la prise de décision, et encourage la réflexion critique sur la méthodologie.

Figure 13 Oignon de recherche selon Sander



3.1 POSITIONNEMENT DE LA RECHERCHE

Cette étude vise à offrir une perspective globale sur les différentes technologies numériques, en particulier le Building Information Modeling (BIM) et les Digital Twins, auxquelles une entreprise de construction peut être confrontée lors de la gestion de projets. Elle adopte une méthodologie de recherche **exploratoire, pragmatique** pour examiner diverses variables de notre étude, notamment le BIM (X1), les Jumeaux Numériques (X2), l'efficacité (Y1), et l'optimisation (Y2), dans le contexte de l'industrie de la construction (Z). Cette approche repose sur un pragmatisme méthodologique visant à identifier des solutions et à apporter des réponses pratiques aux défis rencontrés.

3.2 THEORIES MOBILISEES

Cette étude s'aligne avec le pragmatisme, une perspective philosophique qui, selon le modèle de Saunders (2009), se concentre à la fois sur la théorie et la pratique.

Cette étude examine d'une **méthodologie abductive** les technologies de construction 4.0, en mettant particulièrement l'accent sur le BIM et les les Jumeaux Numériques, ainsi que leur convergence avec d'autres technologies. Cette approche permet de synthétiser les preuves scientifiques pour répondre à des questions de recherche spécifiques. Ceci nous a menée à utiliser la méthode abductive comme suit :

Observation et Revue de la littérature : on a commencé par la base d'une revue de littérature portant sur les technologies numériques dans les projets de construction, en mettant l'accent sur le Building Information Modeling (BIM) et les les Jumeaux Numériques. Ces observations sont les points de départ de notre recherche. On a collecté des informations et des données à partir de cette revue de littérature, ce qui constitue la base de notre connaissances sur le sujet.

Hypothèses abductives : À partir de cette revue de littérature, nous avons générer des hypothèses abductives qui expliquent ou prédisent les relations possibles entre les différentes technologies, y compris l'Intelligence Artificielle (IA) et leurs impacts sur les projets de construction.

Inférence : On a utilisé la compréhension initiale basée sur la revue de littérature pour évaluer les hypothèses qu'on a générées. Toute en cherchant des preuves indirectes et des liens logiques entre les différentes technologies, en s'appuyant sur la déduction pour expliquer les mécanismes sous-jacents qui pourraient être en jeu.

Méthode inductive : On en a envisagé d'utiliser une méthode inductive d'un questionnaire pour confirmer ou infirmer certaines hypothèses émises au cours de notre recherche. D'où cette étape s'inscrit dans une démarche abductive plus large, car elle consiste à recueillir des données empiriques pour tester nos hypothèses. Ou on a posé des questions aux acteurs de l'industrie de la construction pour recueillir leurs avis sur l'impact de l'IA, du BIM et des les Jumeaux Numériques sur leurs projets.

Vérification et itération : Une fois que nous collectant les données du sondage, nous allons vérifiez si elles confirment ou infirment les hypothèses que nous avons générées à l'étape abductive.

3.3 NIVEAU D'ANALYSE ET UNITES D'ANALYSE

Le cadre analytique de la recherche est défini à un niveau macro, englobant l'intégralité des entreprises opérant dans le secteur de la construction. La spécificité de l'unité d'analyse se situe au niveau méso, se concentrant de manière particulière sur les projets de construction individuels. Dans ce contexte, les pratiques examinées au sein de la recherche sont appréhendées comme des éléments ou des composants intégrés dans ces projets, ce qui relève du niveau micro. La focalisation de la recherche se dirige principalement vers la gestion de projet de construction, mettant en exergue l'influence des technologies numériques telles que le Building Information Modeling (BIM) et les jumeaux numériques. L'objectif sous-jacent de cette étude est d'explorer de quelle manière ces avancées technologiques impactent la gestion de projet, avec une attention particulière portée au contexte de la construction durable.

L'unité d'analyse est constituée de plusieurs éléments, notamment :

Projets de construction individuels « Macro » : Nous allons étudier comment le BIM et les Jumeaux Numériques sont appliqués dans des projets de construction spécifiques pour améliorer leur durabilité et leur efficacité.

Entreprises de construction «Mésos » : Nous allons également examiner comment différentes entreprises de construction intègrent ces technologies dans leur gestion de projet.

Pratiques de gestion de projet « Micro » : On va analyser les pratiques de gestion de projet liées à l'utilisation du BIM et des Jumeaux Numériques et comment elles évoluent pour répondre aux besoins de la construction durable.

3.4 APPROCHE DE RECHERCHE

Les méthodes de recherche préconisées pour cette étude, conformément à la méthodologie définie par Saunders (2009), s'orientent vers **l'approche abductive**. Toute en incluant l'approche inductive ainsi que l'approche déductive

L'approche abductive : À partir de cette revue de littérature nous avons formulé des hypothèses abductives qui expliquent ou prédisent les relations possibles entre les différentes technologies, y compris l'Intelligence Artificielle (IA) et leurs impacts sur les projets de construction. Cette approche abductive se distingue de l'analyse inductive de la liste finale d'articles qui a utilisé la méthode d'analyse thématique. La méthode d'analyse thématique, fondée sur une approche inductive, a permis l'identification, l'analyse et le compte rendu des motifs ou des thèmes au sein de l'ensemble de données (Hindiye et al, 2022 ; Farouk et al, 2021). Ainsi, l'analyse thématique a été employée dans le but de définir et évaluer les motifs ou les thèmes au sein de la liste finale d'articles sans préalable détermination des catégories ou des noms de thèmes, demeurant inconnus jusqu'à la

conclusion de l'analyse des données. Cette démarche abductive se juxtapose à l'approche déductive, caractérisée par une méthodologie exploratoire sur le terrain, offrant ainsi la possibilité d'extrapoler des procédures et des méthodes susceptibles d'avoir un impact positif sur la réalisation des objectifs de recherche.

3.5 DESIGN DE RECHERCHE ENVISAGE

Les méthodes de collecte de données mises en place pour alimenter cette recherche sont diversifiées, débutant par l'exploitation des informations issues de la revue de littérature. Dans cette première phase, nous avons entrepris de combler les lacunes en identifiant les convergences possibles entre les technologies numériques précédemment étudiées dans la revue de littérature, notamment le BIM, et les Jumeaux Numériques. Notre objectif était d'identifier et de mettre en lumière les liens de connexion à une échelle plus globale entre ces technologies, qui n'avaient pas encore été abordées conjointement dans la littérature scientifique. Nous avons cherché à établir des liens solides et une intégration significative entre ces domaines qui étaient jusqu'à présent explorés de manière séparée.

Par la suite, nous avons élaboré un questionnaire à l'aide de l'outil "Google Forms". Ce questionnaire a été conçu pour explorer la réalité de l'intégration de ces technologies dans les entreprises de construction contemporaines. Il nous a également permis de tester les propositions formulées dans le cadre de notre étude. L'objectif de cette démarche était de recueillir des données de première main auprès des entreprises du secteur, afin de comprendre comment ces technologies numériques sont actuellement mises en œuvre dans leurs opérations et d'évaluer les implications pratiques de leur adoption.

En combinant ces deux approches, à savoir l'analyse de la littérature existante et la collecte de données primaires via un questionnaire, notre recherche vise à fournir une

perspective globale et approfondie sur l'impact et l'intégration des technologies numériques, en mettant en lumière des connexions jusqu'ici peu explorées, et en évaluant leur application réelle dans le contexte des entreprises de construction contemporaines.

3.6 METHODOLOGIES MOBILISÉES

Cette recherche adopte **une méthode qualitative** qui combine des composantes inductives et déductives. Elle repose sur une revue de littérature toute en utilisant un questionnaire pour la collecte et l'analyse de données. Cette approche nous offre l'opportunité d'explorer en profondeur les conséquences des technologies numériques sur la gestion de projet dans le domaine de la construction durable.

3.7 HORIZON DE TEMPS

Ce mémoire de recherche explore un sujet très actuel dans le domaine de la gestion de projet de construction. Afin de rester à la pointe de ce domaine en constante évolution, nous avons pris soin de nous maintenir à jour en consultant les publications et les conférences les plus récentes de l'année 2023, ainsi que celles de 2024. Cette démarche nous a permis de mieux appréhender les défis de ce domaine et d'aborder notre sujet sous un angle novateur.

Par ailleurs, nous avons reconnu l'importance de prendre en compte les développements rapides de l'intelligence artificielle en 2023. Pour ne rien laisser au hasard, nous avons même axés sur l'intelligence artificielle, afin de ne manquer aucun détail pertinent pour notre recherche.

Il est essentiel de noter que la collecte de données que nous avons entreprise est limitée dans le temps d'où les informations sont prises d'une façon **Cross séquentiel**, En

effet, ce mémoire de recherche constitue une étape partielle dans le cadre de l'obtention de notre diplôme de maîtrise en gestion de projet. Par conséquent, il pourrait être enrichi et approfondi dans le cadre de travaux ultérieurs. Cette contrainte temporelle explique la durée relativement courte de notre étude.

L'objectif fondamental de ce travail de recherche est de proposer des solutions aux problématiques liées à l'implication des technologies numérique notamment BIM et J.N dans le domaine de la gestion de projet de construction. Pour ce faire, nous avons employé des méthodes rapides et efficaces, notamment la création et la distribution d'un questionnaire en ligne. Cette approche nous permettra de générer des réponses variées aux problèmes qui se posent dans ce contexte spécifique.

3.8 TECHNIQUES, PLANS ET PROCEDURES DE COLLECTES DE DONNEES ET DE TRAITEMENTS

Cette section détaille les méthodes employées dans notre recherche, qui ont débuté par une collecte des données en se référant à plusieurs revues sur les technologies numériques en gestion de projet de construction. Notre point de départ était l'identification du concept de "Construction 4.0" et des technologies numériques en général. Par la suite, nous avons spécifiquement sélectionné le Building Information Modeling (BIM) et les J.N comme deux technologies émergentes, ce qui a conduit à l'émergence de notre problématique de recherche.

Au fur et à mesure de l'approfondissement de notre revue de littérature, nous avons identifié et adapté les variables pertinentes à notre cadre de travail, à savoir : le BIM, les Jumeaux Numériques, l'efficacité, l'optimisation et la construction. Ces variables ont été initialement développées à partir du concept de **construction 4.0** et nous ont finalement conduits à explorer la tendance actuelle de la **construction 5.0**. À partir de ces

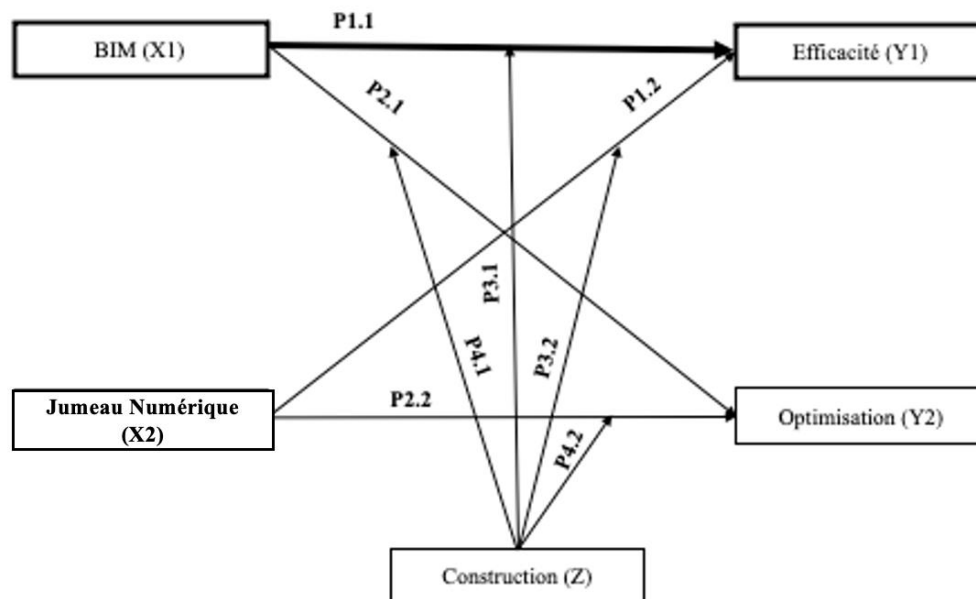
éléments, nous avons élaboré notre questionnaire en utilisant l'outil Google Forms, qui a été distribué auprès de professionnels de la gestion de projet de construction.

Le questionnaire utilisé a été conçu dans le but de mettre à l'épreuve les propositions formulées au cours de cette étude dont les 8 propositions ont été présentées sous 8 différentes sections.

3.8.1 La première section du questionnaire est liée au test de proposition

1.1

Figure 14 Mise en évidence de la proposition 1.1 au travers du cadre conceptuel de l'étude



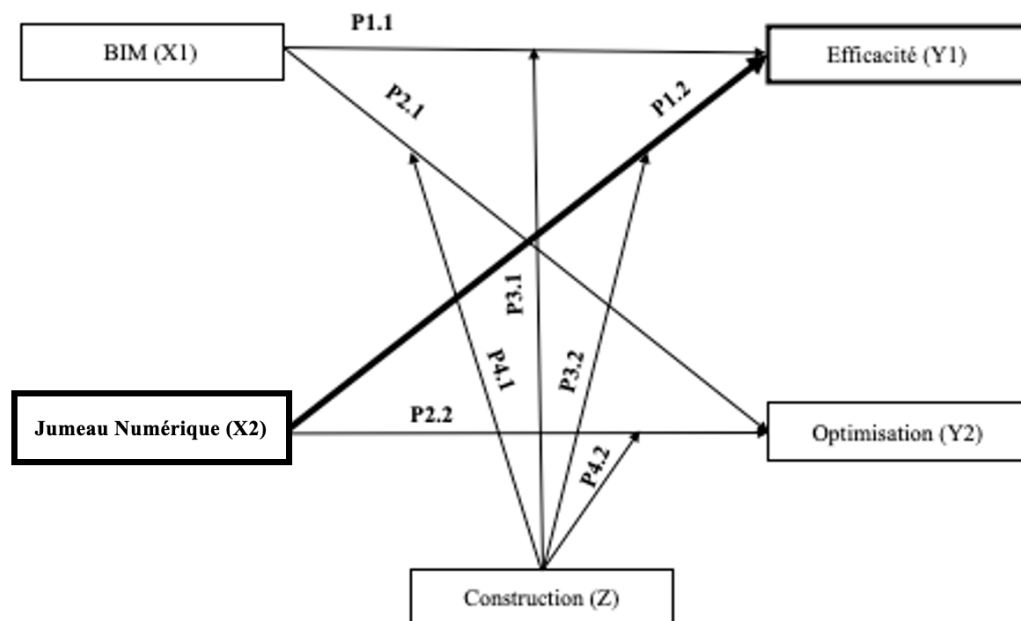
Selon vous, l'intégration des concepts, méthodes, outils BIM avec d'autres approches technologiques peut améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental. De la manière suivante : Très faible-Faible-Neutre-Fort-Très fort ?

Tableau 5 Catégorie d'avis pour la proposition 1.1

P1.1	Efficacité énergétique et opérationnelle (Y1)				
Outils et approche BIM (X1)	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort
Modelisation3D					
Modelisation4D (Gestion temporelle)					
Modelisation5D (Gestion de cout)					
Modelisation6D (Dimension de Durabilité)					
Modelisation7D (Gestion des installations post-construction)					
Modelisation8D (Gestion de sécurité)					
Convergence Lean/BIM					
Convergence DAS (Évaluation de facilité de démontage)/BIM					
BWPE (Outil d'évaluation des éléments structurelle)					
ANFIS (Outil de signalisation des déchets de la construction)					
Intelligence artificiel					

3.8.2 La deuxième section du questionnaire est liée au test de la proposition 1.2

Figure 15 Mise en évidence de la proposition 1.2 au travers du cadre conceptuel de l'étude



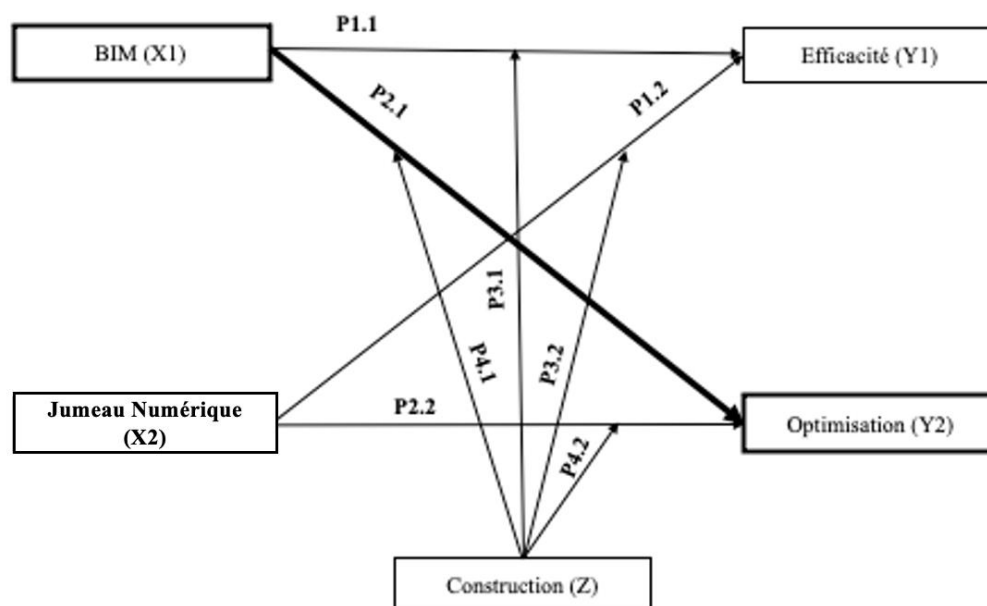
Selon vous. L'utilisation des concepts, méthodes, techniques et outils du Jumeau Numérique peut améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental. De la manière suivante : Très faible-Faible-Neutre-Fort-Très fort ?

Tableau 6 Catégories d'avis pour la proposition 1.2

P1.2	Efficacité énergétique et opérationnelle (Y1)				
Outils et Approches Jumeau Numérique (X2)	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort
HVAC (Chauffage, climatisation, ventilation)					
Capteur et dispositif IOT					
Apprentissage Automatique					
Intelligence artificiel					
Entretien prédictif					
Scanner 3D					
Neurone artificiel et code QR					
Chat bot					
Drone UAV					
La robotique					
Exosquelette					
Analyse des données avancée					
Automatisation des tâches répétitives					

3.8.3 La troisième section du questionnaire est liée au test de la proposition 2.1

Figure 16 Mise en évidence de la proposition 2.1 au travers du cadre conceptuel de l'étude



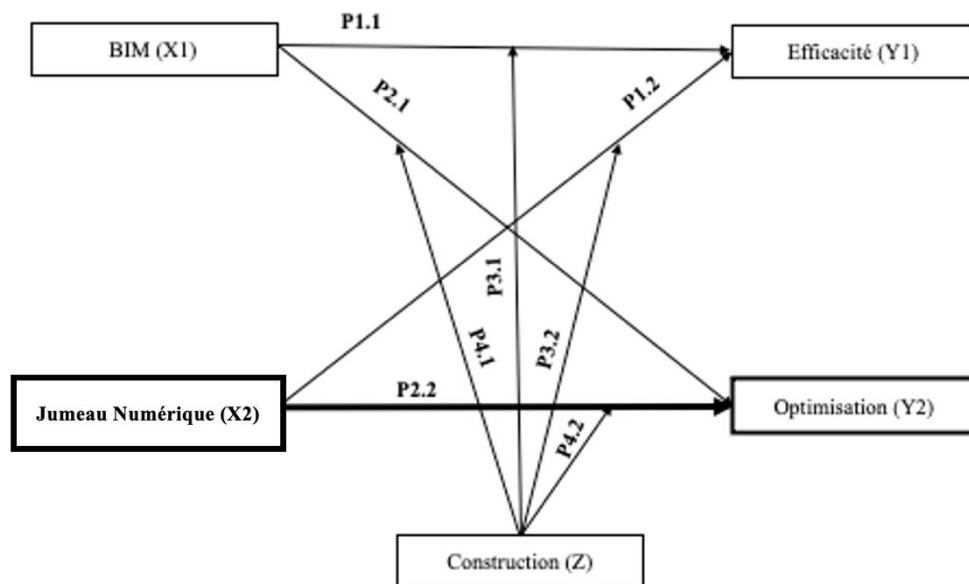
Selon vous. L'intégration du BIM avec l'I.A et d'autres technologies émergentes peut garantir une optimisation technique significative. De la manière suivante : Très faible-Faible-Neutre-Fort-Très fort ?

Tableau 7 Catégories d'avis pour la proposition 2.1

P2.1	Optimisation (Y2)				
Outils et Approches BIM (X1)	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort
PSS (Outil de réduction de l'impact environnemental)					
Autodesk revit					
Autodesk insight 360° "Green building"					
Approche décisionnel BIM écologie					
Block chaine					
Intelligence artificielle					

3.8.4 La quatrième section du questionnaire est liée au test de la proposition 2.2

Figure 17 Mise en évidence de la proposition 2.2 au travers du cadre conceptuel de l'étude



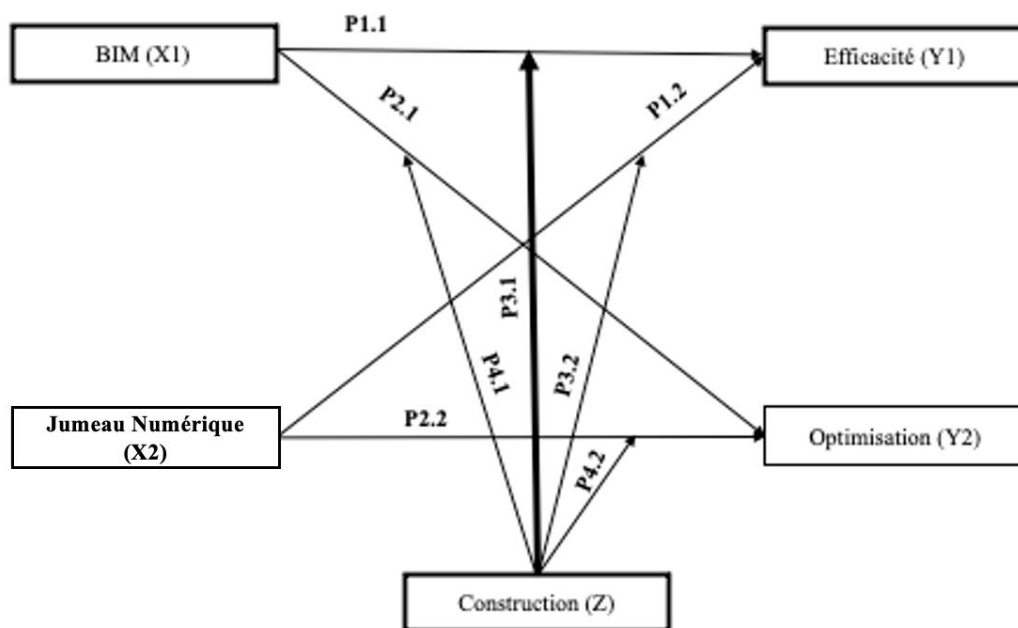
Selon vous. L'intégration des jumeaux numériques avec l'I.A et d'autres technologies émergentes peut conduire à une optimisation technique de grande envergure. De la manière suivante : Très faible-Faible-Neutre-Fort-Très fort ?

Tableau 8 Catégories d'avis pour la proposition 2.2

P2.2	Optimisation (Y2)				
Outils et Approches Jumeau Numérique (X2)	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort
Interface utilisateur					
Caméra thermique et capteurs environnementaux					
Algorithme d'apprentissage automatique					
Intelligence artificielle					
Espace de travail interactif					
Modélisation prédictif					
Block chaine					

3.8.5 La cinquième section du questionnaire est liée au test de la proposition 3.1

Figure 18 Mise en évidence de la proposition 3.1 au travers du cadre conceptuel de l'étude

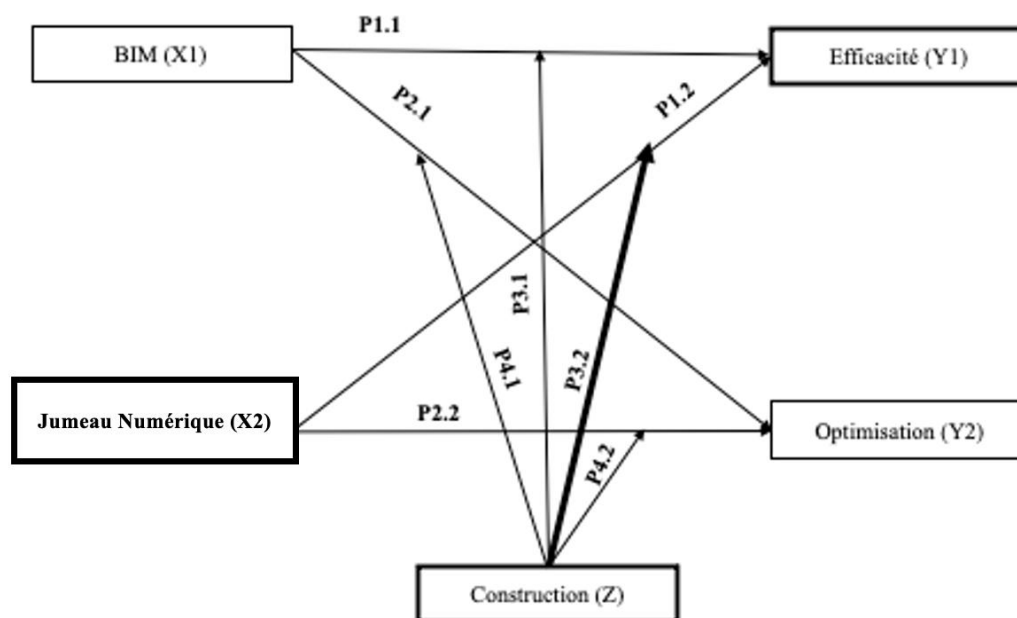


Selon vous. L'implication du BIM au sein des processus de gestion de projets de construction tout au long du cycle de vie d'un projet de construction améliore son l'efficacité. De la manière suivante : Très faible-Faible-Neutre-Fort-Très fort ?

3.8.6 La sixième section du questionnaire est liée au test de la proposition

3.2

Figure 19 Mise en évidence de la proposition 3.2 au travers du cadre conceptuel de l'étude

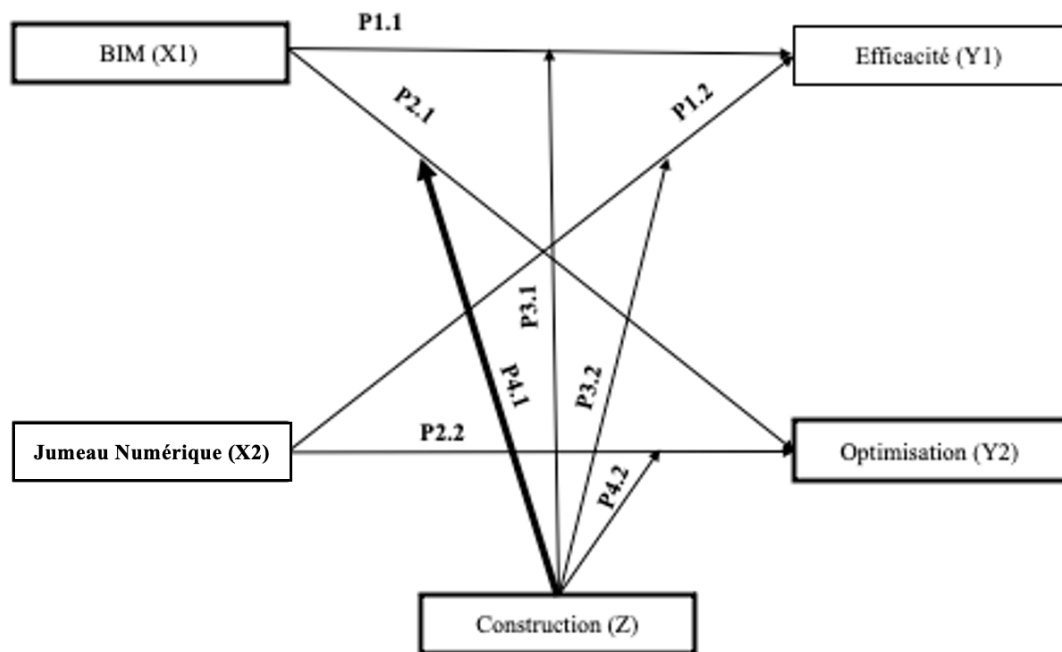


Selon vous. L'implication du J.N au sein des projets de construction rationalise la planification, la conception, la gestion de projet et améliore l'efficacité opérationnel et énergétique. De la manière suivante : Très faible-Faible-Neutre-Fort-Très fort ?

P3.2	Efficacité énergétique opérationnelle (Y1)																								
Jumeau Numérique (X2) Construction (Z)	Conception					Planification					Exécution					Surveillance et contrôle					Clôture				
	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort
Scanner 3D																									
Neurone artificiel et code QR																									
Chatbot																									
Drone UAV																									
ANFIS																									
Intelligence artificiel																									

3.8.7 La septième section du questionnaire est liée au test de la proposition 4.1

Figure 20 Mise en évidence de la proposition 4.1 au travers du cadre conceptuel de l'étude



Selon vous. L'implémentation BIM et l'adoption de technologie convergente tout en intégrant des pratiques de construction 5.0 contribuent à une optimisation dans la gestion des projets de tout au long du cycle de vie d'un projet de construction. De la manière suivante : Très faible-Faible-Neutre-Fort-Très fort ?

Tableau 11 Catégories d'avis pour la proposition 4.1

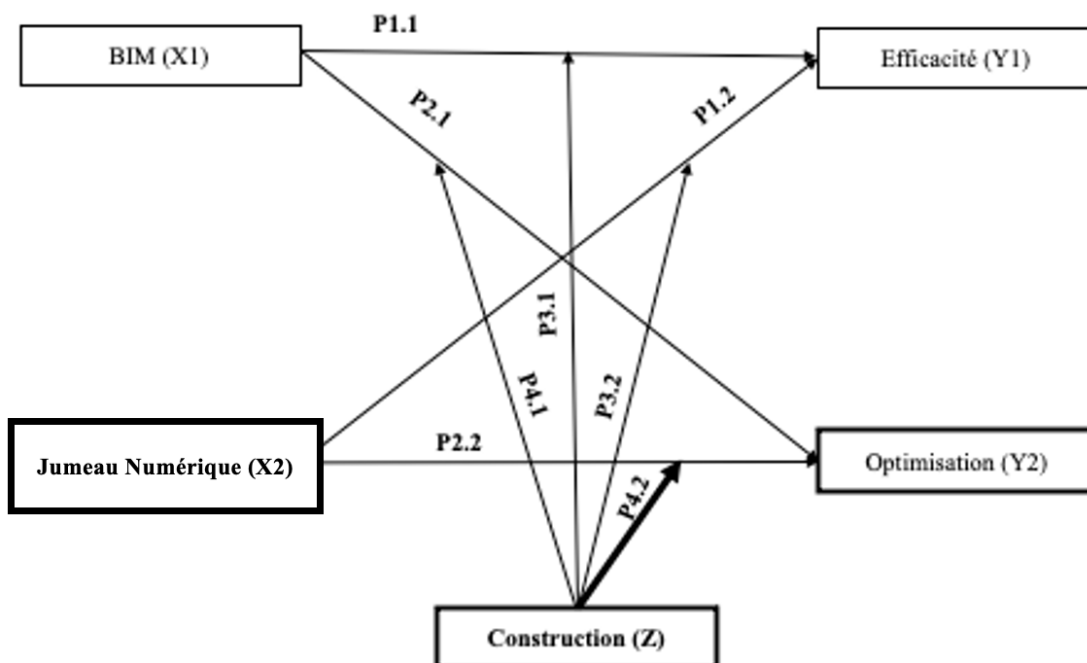
P4.1	Optimisation (Y2)																								
BIM (X1) Construction (Z)	Conception					Planification					Exécution					Surveillance et contrôle					Clôture				
	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort
Modélisation 3D																									
Modélisation 4D (Gestion temporelle)																									
Modélisation 5D (Gestion de cout)																									
Modélisation 6D (Dimension de Durabilité)																									
Modélisation 7D (Gestion des installations)																									

P4.1	Optimisation (Y2)																								
BIM (X1) Construction (Z)	Conception					Planification					Exécution					Surveillance et contrôle					Clôture				
	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort
ANFIS (Outil de signalisation des déchets de la construction)																									
Intelligence artificiel																									

3.8.8 La huitième section du questionnaire est liée au test de la proposition

4.1

Figure 21 Mise en évidence de la proposition 4.2 au travers du cadre conceptuel de l'étude



Selon vous. L'implémentation J.N et l'adoption de technologie convergente tout en intégrant des pratiques de construction 5.0, contribuent à une gestion optimale au sein des projet et des entreprises de construction. De la manière suivante : Très faible-Faible-Neutre-Fort-Très fort ?

Tableau 12 Catégorie d'avis pour la proposition 4.2

P4.2	Optimisation (Y2)																								
Jumeau Numérique (X2) Construction (Z)	Conception					Planification					Exécution					Surveillance et contrôle					Clôture				
	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort
HVAC																									
Capteur et dispositif IOT																									
Apprentissage. A																									
Intelligence artificiel																									
Entretien prédictif																									

Après avoir élaboré le questionnaire en deux versions (français et anglais) via Google Forms, nous avons procédé à sa distribution auprès de trois entreprises de construction situées à Ottawa, Toronto et Montréal. Les répondants comprenaient deux vice-présidents, une dizaine de directeurs de projet, une vingtaine de gestionnaires de projet issus de différents départements tels que l'estimation, la proposition, la coordination, ainsi que des ingénieurs techniques spécialisés dans la qualité du site. La majorité des répondants étaient également ciblés au sein du département de coordination BIM, comprenant même le directeur de coordination BIM. Nous avons également réussi à recueillir des réponses d'ingénieurs en technologies de l'information dans le domaine de la construction en distribuant le questionnaire sur le réseau LinkedIn. Cette approche a élargi notre champ d'étude théorique en intégrant des réponses pratiques provenant de professionnels sur le terrain, L'échantillon de nos répondeur est illustré dans le tableau ci-dessous.

Tableau 13 Échantillon des répondants au questionnaire.

Entreprise 1	Projet 1.1	Répondant 1.1.1	Vice-Président
Entreprise 1	Projet 1.2	Répondant 1.2.1	Directeur Proposition
Entreprise 2	Projet 2.1	Répondant 2.1.1	Coordinateur BIM
Entreprise 2	Projet 2.2	Répondant 2.2.1	Directeur estimation
Entreprise 3	Projet 3.1	Répondant 3.1.1	Manager de projet PHD
Entreprise 3	Projet 3.2	Répondant 3.2.1	Ingénieure de qualité

CHAPITRE 4 - RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Dans ce chapitre, nous allons examiner les résultats issus des questionnaires distribués dans deux entreprises de construction et un laboratoire de recherche en construction. Les questionnaires ont été créés sous forme de formulaires Google et traduits en anglais. Nous avons reçu un total de 20 réponses provenant de divers professionnels du secteur de la construction, y compris des gestionnaires, des directeurs et des chercheurs. Les données collectées sont de nature qualitative, et les répondants ont eu la possibilité de choisir parmi une échelle de notation comprenant les catégories "très faible", "faible", "neutre", "fort" et "très fort" pour évaluer les critères en question.

Les réponses fournies dans les tableaux suivants pour chaque proposition varient de nombre de répondants, en fonction de la question posée. Cette variation est due au fait que certains répondants ont omis de répondre à certaines questions, ce qui a résulté en un nombre total de réponses différent. L'analyse finale de chaque proposition s'est appuyée sur un histogramme détaillant les réponses à toutes les questions de chaque proposition. Cela a été fait afin d'éviter toute confusion et d'assurer des conclusions précises.

4.1 ÉVALUATION DE LA PROPOSITION 1.1

La proposition P1.1 est relative à l'influence du BIM dans l'amélioration de la gestion de l'efficacité énergétique et opérationnel et de la réduction de l'impact environnemental, Voici comment les répondants à l'étude ont réparti leurs réponses :

Tableau 14 Détail des réponses obtenues pour la proposition P1.1

P1.1	Efficacité énergétique et opérationnelle (Y1)				
Outils et approche BIM (X1)	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort
Modélisation3D	0	3	3	5	8
Modélisation4D (Gestion temporelle)	0	0	4	9	4
Modélisation5D (Gestion de cout)	0	0	4	10	3
Modélisation6D (Dimension de Durabilité)	0	0	3	8	6
Modélisation7D (Gestion des installations post-construction)	0	0	3	9	5
Modélisation8D (Gestion de sécurité)	0	0	5	8	4
Convergence Lean/BIM	0	0	3	7	7
Convergence DAS (Évaluation de facilité de démontage)/BIM	0	0	5	6	3
BWPE (Outil d'évaluation des éléments structurelle)	0	0	5	6	3
ANFIS (Outil de signalisation des déchets de la construction)	0	0	5	7	3
Intelligence artificiel	0	0	3	8	6

4.1.1 Opinion sur l'intégration de la modélisation 3D en vue d'améliorer l'efficacité

Les résultats du sondage, sur l'intégration de la modélisation 3D BIM avec d'autres approches technologiques en vue d'améliorer l'efficacité énergétique et opérationnelle.

indiquent que la majorité des participants (54.5%) ont une opinion positive en faveur de l'intégration de la modélisation 3D BIM avec d'autres approches technologiques pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental, les qualifiant de "forts". Un autre groupe significatif de participants (27.3%) les considère "très forts". Cela suggère un fort soutien pour cette approche.

Il est intéressant de noter que 9.1% des répondants estiment que l'intégration est "neutre", ce qui peut indiquer un certain degré d'incertitude ou de manque d'information sur le sujet. Cependant, un pourcentage similaire (9.1%) pense que l'intégration est "faible", ce qui montre qu'il existe une petite minorité qui reste sceptique quant à l'efficacité de cette approche.

Dans l'ensemble, les résultats indiquent un fort soutien majoritaire en faveur de l'intégration de la modélisation 3D BIM avec d'autres technologies en vue d'améliorer les aspects opérationnels et environnementaux.

4.1.2 Opinion sur l'intégration de la modélisation 4D en vue d'améliorer l'efficacité

Les résultats de notre sondage sur l'intégration de la modélisation 4D BIM qui intègre la dimension temporelle, avec d'autres approches technologiques en vue d'améliorer l'efficacité énergétique et opérationnelle offre des avantages considérables en permettant une visualisation en temps réel de l'évolution du projet montrent qu'une majorité impressionnante de 63,6% des répondants ont exprimé un avis "fort" en faveur de cette intégration, tandis que 18,2% ont exprimé un avis "très fort". Ces chiffres reflètent un consensus marqué en faveur de l'idée que l'intégration de la modélisation 4D BIM peut apporter des améliorations significatives à la fois sur le plan de l'efficacité opérationnelle et de la réduction de l'impact environnemental.

En résumé, notre sondage indique un solide soutien en faveur de l'intégration de la modélisation 4D BIM pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental. Ces résultats soulignent l'importance de poursuivre le développement et l'adoption de cette approche technologique pour répondre aux défis du secteur de la construction au 21^e siècle.

4.1.3 Opinion sur l'intégration de la modélisation 5D en vue d'améliorer l'efficacité

Les résultats de notre enquête sur l'intégration de la modélisation 5D BIM (gestion des coûts) avec d'autres approches technologiques en vue d'améliorer l'efficacité énergétique et opérationnelle sont extrêmement positifs. Un impressionnant 72,7% des répondants ont exprimé un avis "fort" en faveur de cette intégration, tandis que 18,2% ont exprimé un avis "très fort". Ces chiffres témoignent d'un large consensus en faveur de

l'idée que l'intégration de la modélisation 5D BIM peut apporter des améliorations notables à la fois en termes d'efficacité opérationnelle et de réduction de l'impact environnemental.

L'efficacité opérationnelle est un aspect essentiel dans le secteur de la construction, et l'intégration de la modélisation 5D BIM, qui inclut la gestion des coûts, s'avère être un atout majeur.

En résumé, notre sondage indique un fort soutien en faveur de l'intégration de la modélisation 5D BIM pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental dans le secteur de la construction. Ces résultats encouragent le développement et l'adoption continue de cette technologie, mettant en lumière son rôle essentiel pour relever les défis actuels de l'industrie de la construction.

4.1.4 Opinion sur l'intégration de la modélisation 6D en vue d'améliorer l'efficacité

Les résultats de notre enquête sur l'intégration de la modélisation 6D BIM (dimension de durabilité) avec d'autres approches technologiques en vue d'améliorer l'efficacité énergétique et opérationnelle montrent un solide pourcentage de 54,5% des répondants ont exprimé un avis "fort" en faveur de cette intégration, tandis que 36,4% ont exprimé un avis "très fort". Ces chiffres témoignent d'un soutien substantiel à l'idée que l'intégration de la modélisation 6D BIM peut avoir un impact positif à la fois sur l'efficacité opérationnelle et la réduction de l'impact environnemental.

L'efficacité opérationnelle est un élément crucial dans l'industrie de la construction, et l'intégration de la dimension de durabilité au sein de la modélisation 6D BIM peut apporter des avantages significatifs. Les résultats du sondage, avec 90,9% des

répondants favorables (combinant "fort" et "très fort"), soulignent l'importance d'intégrer la 6D de durabilité dans le processus de construction.

En résumé, notre sondage révèle un solide soutien en faveur de l'intégration de la modélisation 6D BIM pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental dans l'industrie de la construction. Ces résultats encouragent le développement continu de cette technologie et soulignent la nécessité de poursuivre les efforts visant à intégrer la durabilité dans la construction.

4.1.5 Opinion sur l'intégration de la modélisation 7D en vue d'améliorer l'efficacité

Les résultats de notre sondage sur l'intégration de la modélisation 7D BIM (gestion des installations post-opérationnelles) avec d'autres approches technologiques en vue d'améliorer l'efficacité énergétique et opérationnelle montrent un solide pourcentage de 63,6% des répondants ont exprimé un avis "fort" en faveur de cette intégration, tandis que 27,3% ont exprimé un avis "très fort". Ces chiffres témoignent d'un soutien significatif à l'idée que l'intégration de la modélisation 7D BIM peut apporter des améliorations notables à la fois en termes d'efficacité opérationnelle et de réduction de l'impact environnemental.

L'efficacité opérationnelle est un élément clé dans l'industrie de la construction, et l'intégration de la gestion des installations post-opérationnelles au sein de la modélisation 7D BIM représente une avancée majeure. Les résultats du sondage, avec 90,9% des répondants favorables (combinant "fort" et "très fort"), soulignent l'importance de prendre en compte la gestion des installations tout au long du cycle de vie du projet.

En résumé, notre sondage révèle un soutien significatif en faveur de l'intégration de la modélisation 7D BIM pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental dans l'industrie de la construction. Ces résultats encouragent le développement continu de cette technologie et soulignent l'importance de prendre en compte la gestion des installations à long terme dans la planification et la construction des projets.

4.1.6 Opinion sur l'intégration de la modélisation 8D en vue d'améliorer l'efficacité

Les résultats de notre enquête sur l'intégration de la modélisation 8D BIM (gestion de la sécurité) avec d'autres approches technologiques en vue d'améliorer l'efficacité énergétique et opérationnelle montrent un pourcentage de 54,5% des répondants ont exprimé un avis "fort" en faveur de cette intégration, tandis que 27,3% ont exprimé un avis "très fort". De plus, 18,2% ont exprimé un avis "neutre". Ces résultats indiquent un soutien significatif à l'idée que l'intégration de la modélisation 8D BIM peut avoir un impact positif à la fois sur l'efficacité opérationnelle et environnementale.

Les répondants favorables, combinant 81,8% (54,5% "fort" et 27,3% "très fort"), mettent en évidence l'importance de considérer la sécurité dans chaque phase du projet.

En résumé, notre enquête révèle un soutien significatif en faveur de l'intégration de la modélisation 8D BIM pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire les risques environnementaux dans l'industrie de la construction.

4.1.7 Opinion sur l'intégration de l'approche LEAN en vue d'améliorer l'efficacité

Les résultats de notre sondage sur l'intégration de la modélisation BIM avec l'approche LEAN en vue d'améliorer l'efficacité énergétique et opérationnelle démontrent qu'une majorité de 83,4% des répondants ont exprimé un avis positif, soit 41,7% d'entre eux avec un avis "fort" et 41,7% avec un avis "très fort". De plus, 8,3% ont exprimé un avis "neutre", tandis que 8,3% estiment qu'il n'y a pas d'impact sur l'environnement. Ces résultats reflètent un consensus solide en faveur de l'idée que l'intégration de la modélisation BIM avec l'approche LEAN peut apporter des améliorations notables en termes d'efficacité opérationnelle.

Les résultats du sondage, avec 83,4% de répondants favorables, montrent que cette approche est largement perçue comme bénéfique pour l'efficacité opérationnelle.

En ce qui concerne l'impact environnemental, le fait que 8,3% des répondants estiment qu'il n'y a pas d'impact sur l'environnement peut s'expliquer par le besoin de sensibiliser davantage aux avantages environnementaux de cette intégration. Nous avons estimé que ce pourcentage est attribuable à une méconnaissance de l'approche.

En résumé, notre sondage indique un fort soutien en faveur de l'intégration de la modélisation BIM avec l'approche LEAN pour améliorer l'efficacité opérationnelle dans le secteur de la construction.

4.1.8 Opinion sur l'intégration de l'approche DAS en vue d'améliorer l'efficacité

Les résultats de notre sondage reflètent un éventail de réponses et d'opinions variées concernant l'intégration de la modélisation BIM avec l'approche DAS (Évaluation de facilité de démontage) en termes d'efficacité opérationnelle et d'impact environnemental.

Un pourcentage de 33,3% des répondants ont exprimé un avis "fort" en faveur de cette intégration, indiquant un certain niveau de soutien. De plus, 8,3% ont exprimé un avis "très fort", ce qui suggère un engagement plus marqué envers cette approche.

Cependant, une part importante, soit 25%, a exprimé un avis "neutre" à l'égard de cette intégration. Cela peut indiquer une certaine incertitude ou un manque d'informations sur les avantages potentiels de l'approche DAS.

D'autre part, 8,3% des répondants ont estimé que cette intégration aurait un "faible impact", suggérant qu'ils perçoivent des limites dans les bénéfices attendus.

Enfin, il est également notable que 25% des répondants ont indiqué qu'ils ne connaissaient pas l'approche DAS. Cela souligne un besoin d'éducation et de sensibilisation concernant cette méthode et ses implications potentielles.

En résumé, les résultats de ce sondage mettent en évidence un éventail de perceptions et de niveaux de connaissance en ce qui concerne l'intégration de la modélisation BIM avec l'approche DAS, tout en prenant en compte les opinions et les incertitudes exprimées par les répondants pour développer des stratégies appropriées.

4.1.9 Opinion sur l'intégration de BWPE en vue d'améliorer l'efficacité

Les résultats de notre sondage mettent en lumière une diversité d'opinions et de niveaux de connaissance en ce qui concerne l'intégration de la modélisation BIM avec l'outil BWPE (Outil d'évaluation d'outils structurels) en ce qui concerne l'efficacité opérationnelle et l'impact environnemental.

Un pourcentage de 33,3% des répondants ont exprimé un avis "fort" en faveur de cette intégration, indiquant un certain niveau de soutien. De plus, 8,3% ont exprimé un avis "très fort", suggérant un engagement plus marqué envers cette approche.

Cependant, une proportion importante, soit 25%, a exprimé un avis "neutre" à l'égard de cette intégration. Cela peut refléter une certaine incertitude ou un manque de connaissance sur les avantages potentiels de l'outil BWPE.

D'autre part, 8,3% des répondants ont estimé que cette intégration aurait un "faible impact", ce qui laisse entendre qu'ils considèrent que les avantages attendus de l'outil BWPE sont limités. Il est également notable que 25% des répondants ont indiqué qu'ils ne connaissaient pas l'outil BWPE.

En résumé, les résultats de ce sondage mettent en évidence un éventail de perceptions et de niveaux de connaissance en ce qui concerne l'intégration de la modélisation BIM avec l'outil BWPE.

4.1.10 Opinion sur l'intégration de ANFIS en vue d'améliorer l'efficacité

Les résultats de notre sondage révèlent une variété d'opinions et de niveaux de connaissance concernant l'intégration de la modélisation BIM avec l'outil ANFIS (Outil de signalisation des déchets de la construction) en ce qui concerne l'efficacité opérationnelle et l'impact environnemental.

Un pourcentage de 41,7% des répondants ont exprimé un avis "fort" en faveur de cette intégration, indiquant un niveau significatif de soutien. De plus, 8,3% ont exprimé un avis "très fort", suggérant un engagement plus marqué envers cette approche. Cependant, une proportion notable, soit 25%, a exprimé un avis "neutre" à l'égard de cette intégration. Cela peut refléter une certaine incertitude ou un manque de connaissance quant aux avantages potentiels de l'outil ANFIS.

De manière intéressante, 8,3% des répondants ont estimé que le centre de triage des déchets n'était pas prêt pour le recyclage de tous les déchets de construction. Cela indique une reconnaissance de l'existence de défis dans l'infrastructure actuelle liée à la gestion des déchets de construction. Il est également remarquable que 16,6% des répondants ne connaissent pas l'approche ANFIS.

En résumé, les résultats de ce sondage mettent en évidence une gamme d'opinions et de niveaux de connaissance en ce qui concerne l'intégration de la modélisation BIM avec l'outil ANFIS.

4.1.11 Opinion sur l'intégration de la modélisation BIM avec l'IA en vue d'améliorer l'efficacité

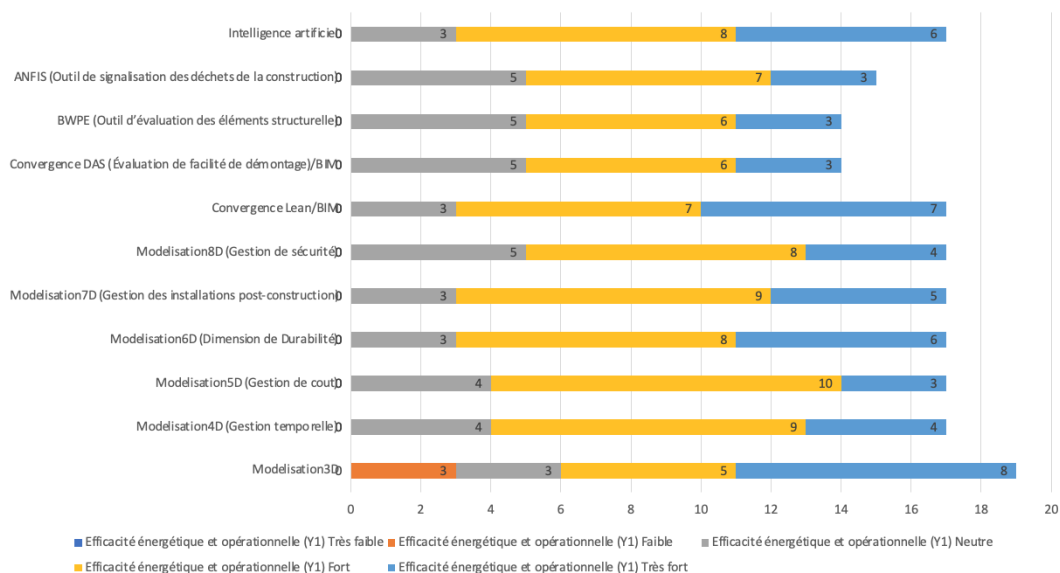
Les résultats de notre sondage révèlent un soutien solide en faveur de l'intégration de la modélisation BIM avec l'intelligence artificielle (IA) en ce qui concerne l'efficacité opérationnelle et la réduction de l'impact environnemental.

Un pourcentage de 50% des répondants ont exprimé un avis "fort" en faveur de cette intégration, indiquant un niveau significatif de soutien. De plus, 33,3% ont exprimé un avis "très fort", ce qui suggère un engagement plus marqué envers cette approche. Cependant, une proportion de 8,3% a exprimé un avis "neutre" à l'égard de cette intégration, ce qui peut refléter un certain degré d'incertitude ou un besoin d'informations supplémentaires sur les avantages de cette combinaison.

Il est également intéressant de noter que 8,3% des répondants ont indiqué ne pas avoir de connaissance sur cette intégration.

En résumé, les résultats de ce sondage indiquent un soutien significatif en faveur de l'intégration de la modélisation BIM avec l'intelligence artificielle pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental dans le secteur de la construction.

Figure 22 Histogramme d'évaluation de la proposition 1.1



L'histogramme récapitulatif révèle des informations positif à l'acceptation de l'intégration des concepts BIM avec d'autres approches technologiques dans le domaine de la construction. La majorité des répondants semblent favorables à cette idée, ce qui indique un intérêt croissant pour l'utilisation du BIM et des technologies connexes pour améliorer l'efficacité énergétique de construction et minimiser l'impact environnemental.

Les dimensions 6D, 7D, l'approche Lean et l'intelligence artificielle : Ces quatre dimensions reçoivent un fort soutien, avec 14 avis forts et très forts. Cela suggère que l'intégration de ces concepts avec le BIM est largement acceptée et perçue comme bénéfique pour l'efficacité opérationnelle et la réduction de l'impact environnemental.

Les dimensions 3D, 4D, 5D et 8D : reçoivent également un soutien important, avec 13 avis de confirmation pour 3D, 4D, et 5D, et 12 confirmations pour la 8D. Bien

que légèrement moins marquées que les dimensions précédentes, elles restent favorables, indiquant une tendance positive envers ces aspects du BIM.

ANFIS, BWPE et DAS : Ces outils sont moins connus et reçoivent moins de soutien en raison du manque de connaissance de la part des répondants. Cependant, le fait que leur évaluation reste favorable suggère un intérêt potentiel pour ces outils une fois que leur utilité sera mieux comprise.

En conclusion, l'histogramme et le tableau récapitulatif de l'analyse de notre Survey confirme que l'intégration des concepts, méthodes et outils BIM avec d'autres approches technologiques est fortement favorable dans le domaine de la construction, en particulier pour le BIM 6D, BIM 7D, l'approche Lean et l'intégration avec l'intelligence artificielle. Même les dimensions et outils moins connus bénéficient d'un certain niveau d'acceptation. Cela suggère que l'industrie de la construction est prête à adopter des approches technologiques avancées pour améliorer son efficacité opérationnelle et réduire son impact environnemental.

Il est à noter que cette évaluation est basée sur les réponses des enquêtés et peut évoluer avec le temps à mesure que la compréhension et l'adoption des technologies BIM progressent. Il serait également judicieux de continuer à recueillir des données et des retours d'expérience pour suivre l'évolution de ces perceptions dans le secteur de la construction.

4.2 ÉVALUATION DE LA PROPOSITION 1.2

La proposition P1.2 est relative à l'influence du Jumeau numérique dans l'amélioration de la gestion de l'efficacité énergétique et opérationnel et de la réduction

de l'impact environnemental, Voici comment les répondants à l'étude ont réparti leurs réponses :

Tableau 15 Détails des réponses obtenues pour la proposition 1.2

P1.2	Efficacité énergétique et opérationnelle (Y1)				
	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort
Outils et Approches Jumeau numérique (X2)					
HVAC (Chauffage, climatisation, ventilation)	0	0	5	10	4
Capteur et dispositif IOT	0	0	4	10	3
Apprentissage Automatique	0	0	7	8	2
Intelligence artificiel	0	0	3	10	5
Entretien prédictif	0	0	5	8	4
Scanner 3D	0	0	8	6	5
Neurone artificiel et code QR	0	0	16	5	3
Chat bot	0	0	16	5	3
Drone UAV	0	0	14	6	5
La robotique	0	0	12	7	3
Exosquelette	0	0	18	5	3
Analyse des données avancée	0	0	8	9	3

P1.2	Efficacité énergétique et opérationnelle (Y1)				
Outils et Approches Jumeau numérique (X2)	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort
Automatisation des tâches répétitives	0	0	14	5	3

4.2.1 Opinion sur l'intégration de la Jumeau numérique avec l'outil

HVAC en vue d'améliorer

La majorité des répondants (50%) ont exprimé un avis "très fort" quant à l'impact positif de l'utilisation de la modélisation HVAC avec le Jumeau numérique pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental. Cela indique un fort consensus parmi les participants quant aux avantages potentiels de cette approche.

Environ 16.7% des répondants ont exprimé un avis "neutre". Cela suggère que ces participants peuvent ne pas avoir une opinion formée sur la question, ou ils ont besoin de plus d'informations pour se forger une opinion. 8.3% des répondants ont indiqué qu'ils ne connaissaient pas le Jumeau numérique. Cela souligne un besoin potentiel d'éducation ou de sensibilisation quant à cette technologie, car elle pourrait jouer un rôle clé dans le contexte de l'efficacité opérationnelle dans le domaine HVAC. 25% des répondants ont à nouveau exprimé un avis "très fort", indiquant un fort soutien à l'idée que la modélisation HVAC avec le Jumeau numérique peut avoir un impact positif significatif.

Globalement, les résultats montrent un soutien significatif en faveur de l'utilisation de la modélisation HVAC avec le Jumeau numérique pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental. Cependant, il est important de prendre en compte les avis neutres et ceux qui ne connaissent pas la technologie, ce qui suggère un besoin de communication et d'éducation pour assurer une compréhension

complète de cette approche et de ses avantages potentiels. Il pourrait également être utile d'explorer davantage les raisons derrière ces avis pour affiner les stratégies de mise en œuvre.

4.2.2 Opinion sur l'intégration de Jumeau numérique avec le capteur et les dispositif IOT en vue d'améliorer l'efficacité

La majorité écrasante des répondants (66.7%) ont exprimé un avis "fort" quant à l'impact positif de l'utilisation des capteurs et dispositifs IoT avec le Jumeau numérique pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental. Cela indique un consensus important parmi les participants quant à l'efficacité de cette approche.

Environ 16.7% des répondants ont exprimé un avis "neutre". Cela suggère que ces participants peuvent ne pas avoir d'opinion formée sur la question ou qu'ils ont besoin de plus d'informations pour se forger une opinion. 8.3% des répondants ont indiqué qu'ils ne connaissent pas le Jumeau numérique. Cela souligne un besoin potentiel d'éducation ou de sensibilisation concernant cette technologie, car elle pourrait jouer un rôle essentiel dans le contexte de l'efficacité opérationnelle dans le domaine des capteurs et de l'IoT.

16.7% des répondants ont exprimé un avis "très fort", ce qui dénote un soutien significatif à l'idée que l'utilisation des capteurs et dispositifs IoT avec le Jumeau numérique peut avoir un impact positif considérable.

Dans l'ensemble, les résultats montrent un soutien substantiel en faveur de l'utilisation des capteurs et dispositifs IoT avec le Jumeau numérique pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental. Cependant, il est important de tenir compte des avis neutres et de ceux qui ne connaissent pas la technologie, ce qui

suggère un besoin de communication et d'éducation pour assurer une compréhension complète de cette approche et de ses avantages potentiels. Explorer davantage les raisons derrière les avis neutres pourrait aider à affiner les stratégies de mise en œuvre pour maximiser les avantages.

4.2.3 Opinion sur l'intégration de le Jumeau numérique avec l'apprentissage automatique algorithmique en vue d'améliorer l'efficacité

La majorité écrasante des répondants (66.7%) ont exprimé un avis "fort" quant à l'impact positif de l'utilisation des capteurs et dispositifs IoT avec le Jumeau numérique pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental. Cela indique un consensus important parmi les participants quant à l'efficacité de cette approche.

Environ 16.7% des répondants ont exprimé un avis "neutre". Cela suggère que ces participants peuvent ne pas avoir d'opinion formée sur la question ou qu'ils ont besoin de plus d'informations pour se forger une opinion.

8.3% des répondants ont indiqué qu'ils ne connaissent pas le Jumeau numérique. Cela souligne un besoin potentiel d'éducation ou de sensibilisation concernant cette technologie, car elle pourrait jouer un rôle essentiel dans le contexte de l'efficacité opérationnelle dans le domaine des capteurs et de l'IoT.

16.7% des répondants ont exprimé un avis "très fort", ce qui dénote un soutien significatif à l'idée que l'utilisation des capteurs et dispositifs IoT avec le Jumeau numérique peut avoir un impact positif considérable.

Dans l'ensemble, les résultats montrent un soutien substantiel en faveur de l'utilisation des capteurs et dispositifs IoT avec le Jumeau numérique pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental. Cependant, il est important de tenir compte des avis neutres et de ceux qui ne connaissent pas la technologie, ce qui suggère un besoin de communication et d'éducation pour assurer une compréhension complète de cette approche et de ses avantages potentiels. Explorer davantage les raisons derrière les avis neutres pourrait aider à affiner les stratégies de mise en œuvre pour maximiser les avantages.

4.2.4 Opinion sur l'intégration de la J.N avec l'IA en vue d'améliorer l'efficacité

La moitié des répondants (50%) ont exprimé un avis "fort" quant à l'impact positif de l'utilisation de l'intelligence artificiel avec la Digital Twins pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental. Cela indique qu'un nombre important de participants soutiennent cette approche.

Environ 25% des répondants ont exprimé un avis "neutre". Cela suggère que ces participants peuvent ne pas avoir d'opinion formée sur la question ou qu'ils ont besoin de plus d'informations pour se forger une opinion.

8.3% des répondants ont indiqué qu'ils ne connaissent pas le Jumeau numérique. Cela souligne un besoin potentiel d'éducation ou de sensibilisation concernant cette technologie, car elle pourrait jouer un rôle clé dans l'efficacité opérationnelle dans le contexte de l'intelligence artificielle.

16.7% des répondants ont exprimé un avis "très fort", ce qui indique un soutien significatif à l'idée que l'utilisation de l'apprentissage automatique algorithmique avec le Jumeau numérique peut avoir un impact positif considérable.

Dans l'ensemble, les résultats montrent un soutien important en faveur de l'utilisation de l'intelligence artificielle avec le Jumeau numérique pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental.

Cependant, il est important de tenir compte des avis neutres et de ceux qui ne connaissent pas la technologie, ce qui suggère un besoin de communication et d'éducation pour assurer une compréhension complète de cette approche et de ses avantages potentiels. Explorer davantage les raisons derrière les avis neutres peut aider à concevoir des stratégies d'information ciblées pour obtenir un soutien plus large.

4.2.5 Opinion sur l'utilisation de l'entretien prédictif avec la DT en vue d'améliorer l'efficacité

Les deux tiers des répondants (66.7%) ont exprimé un avis "fort" quant à l'impact positif de l'entretien prédictif avec le Jumeau numérique pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental. Il s'agit d'une majorité substantielle, ce qui suggère un fort consensus parmi les participants quant à l'efficacité de cette approche.

Environ 16.7% des répondants ont exprimé un avis "neutre". Cela indique que certains participants ne sont pas certains de l'efficacité de cette approche ou ont besoin de plus d'informations pour se forger une opinion.

8.3% des répondants ont indiqué qu'ils ne connaissent pas le Jumeau numérique. Cela souligne un besoin potentiel d'éducation ou de sensibilisation quant à cette technologie, car elle pourrait jouer un rôle essentiel dans le contexte de l'entretien prédictif

8.3% des répondants ont exprimé un avis "très fort", indiquant un soutien significatif à l'idée que l'entretien prédictif avec le Jumeau numérique peut avoir un impact positif considérable.

Globalement, les résultats montrent un soutien significatif en faveur de l'utilisation de l'entretien prédictif avec le Jumeau numérique pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental. Cependant, il est important de noter les avis neutres et de ceux qui ne connaissent pas la technologie, ce qui suggère un besoin de communication et d'éducation pour assurer une compréhension complète de cette approche et de ses avantages potentiels. Explorer davantage les raisons derrière les avis neutres pourrait aider à concevoir des programmes d'information ciblés.

4.2.6 Opinion sur l'utilisation du scanner 3D avec la D T en vue d'améliorer l'efficacité

Environ un tiers des répondants (33.3%) ont exprimé un avis "fort" quant à l'impact positif de l'utilisation de scanner 3D avec le Jumeau numérique pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental. Bien que ce pourcentage ne constitue pas une majorité, il indique tout de même un soutien significatif à cette approche parmi les participants.

Un quart des répondants (25%) ont exprimé un avis "neutre". Cela suggère que ces participants ne sont ni favorables ni opposés à l'idée et peuvent avoir besoin de plus d'informations pour se forger une opinion.

8.3% des répondants ont indiqué qu'ils ne connaissent pas le Jumeau numérique. Cela souligne un besoin potentiel d'éducation ou de sensibilisation concernant cette technologie, car elle pourrait jouer un rôle essentiel dans l'efficacité opérationnelle dans le contexte de l'apprentissage automatique algorithmique.

8.3% des répondants ont exprimé un avis "faible". Cela indique un manque de soutien à l'idée de l'utilisation de l'apprentissage automatique algorithmique avec Jumeau numérique.

Un quart des répondants (25%) ont exprimé un avis "très fort", ce qui indique un soutien significatif à l'idée que cette approche peut avoir un impact positif considérable.

Dans l'ensemble, les résultats montrent un soutien significatif en faveur de l'utilisation de l'apprentissage automatique algorithmique avec le Jumeau numérique pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental. Cependant, il est important de noter les avis neutres, les avis faibles et de ceux qui ne connaissent pas la technologie, ce qui suggère un besoin de communication et d'éducation pour assurer une compréhension complète de cette approche et de ses avantages potentiels. Explorer davantage les raisons derrière les avis neutres et faibles pourrait aider à concevoir des programmes d'information ciblés pour obtenir un soutien plus large.

4.2.7 Opinion sur l'utilisation des neurones artificielle et du code QR avec la J.N en vue d'améliorer l'efficacité

Un quart des répondants (25%) ont exprimé un avis "fort" quant à l'impact positif de l'utilisation de l'apprentissage automatique algorithmique avec le Jumeau numérique pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental. Cela

indique un soutien substantiel à cette approche parmi les participants, bien que ce ne soit pas la majorité.

La majorité des répondants (41.7%) ont exprimé un avis "neutre". Cela suggère que la plupart des participants ne sont ni favorables ni opposés à l'idée, ce qui peut indiquer un manque de consensus ou un besoin de plus d'informations pour se forger une opinion.

16.7% des répondants ont indiqué qu'ils ne connaissent pas le Jumeau numérique. Cela souligne un besoin potentiel d'éducation ou de sensibilisation concernant cette technologie, car elle pourrait jouer un rôle essentiel dans l'efficacité opérationnelle dans le contexte de **des neurones artificielle et du code QR**.

8.3% des répondants ont exprimé un avis "faible", indiquant un manque de soutien à l'idée de l'utilisation de des neurones artificielle et du code QR avec le Jumeau numérique.

8.3% des répondants ont exprimé un avis "très fort", ce qui indique un soutien significatif à l'idée que cette approche peut avoir un impact positif considérable.

Dans l'ensemble, les résultats montrent une certaine diversité d'opinions parmi les répondants. Il y a un groupe important avec un avis neutre, ce qui suggère que la communication et l'éducation sur cette approche pourraient être nécessaires pour obtenir un soutien plus large. Il est également important de noter que certains répondants ne connaissent pas le Jumeau numérique, soulignant un besoin d'information sur cette technologie. Pour maximiser le soutien, il peut être utile de répondre aux préoccupations et aux questions des répondants neutres et d'offrir des informations supplémentaires sur les avantages potentiels de cette approche.

4.2.8 Opinion sur l'utilisation du Chat bot avec le J.N en vue d'améliorer l'efficacité

Un quart des répondants (25%) ont exprimé un avis "fort" quant à l'impact positif de l'utilisation du chat bot avec le Jumeau numérique pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental. Cela indique un soutien substantiel à cette approche parmi les participants, bien que ce ne soit pas la majorité.

La majorité des répondants (41.7%) ont exprimé un avis "neutre". Cela suggère que la plupart des participants ne sont ni favorables ni opposés à l'idée, ce qui peut indiquer un manque de consensus ou un besoin de plus d'informations pour se forger une opinion.

16.7% des répondants ont indiqué qu'ils ne connaissent pas le Jumeau numérique. Cela souligne un besoin potentiel d'éducation ou de sensibilisation concernant cette technologie, car elle pourrait jouer un rôle essentiel dans l'efficacité opérationnelle dans le contexte de l'utilisation de Chat bot.

8.3% des répondants ont exprimé un avis "faible", indiquant un manque de soutien à l'idée de l'utilisation de Chat bot avec le Jumeau numérique.

8.3% des répondants ont exprimé un avis "très fort", ce qui indique un soutien significatif à l'idée que cette approche peut avoir un impact positif considérable.

Dans l'ensemble, les résultats montrent une diversité d'opinions parmi les répondants. Un grand nombre d'entre eux ont des avis neutres, suggérant un besoin de communication et d'éducation sur cette approche pour obtenir un soutien plus large. Il est également important de noter que certains répondants ne connaissent pas le Jumeau numérique, ce qui souligne un besoin d'information sur cette technologie. Pour maximiser

le soutien, il peut être utile de répondre aux préoccupations et aux questions des répondants neutres et de fournir des informations supplémentaires sur les avantages potentiels de cette approche.

4.2.9 Opinion sur l'utilisation des drones UAV avec la DT en vue d'améliorer l'efficacité

33.3% des répondants ont un avis fort sur l'utilisation des drones UAV avec le Jumeau numérique. Cela indique un fort intérêt ou une conviction en faveur de cette technologie.

25% des répondants ont un avis neutre, ce qui suggère qu'ils pourraient ne pas avoir suffisamment d'informations pour prendre position ou qu'ils sont indifférents à cette technologie.

8.3% des répondants ont un avis faible, ce qui pourrait signifier qu'ils ont des réserves ou des inquiétudes concernant cette approche.

16.7% des répondants ont un avis très fort en faveur de l'utilisation des drones UAV avec le Jumeau numérique, ce qui indique un soutien passionné à cette technologie.

4.2.10 Opinion sur l'utilisation de la robotique avec le JN en vue d'améliorer l'efficacité

41.7% des répondants ont un avis fort sur l'utilisation de la robotique avec le Jumeau numérique, montrant un fort intérêt ou un soutien pour cette approche.

33.3% des répondants ont un avis neutre, ce qui est significativement plus élevé que dans le précédent sondage. Cela pourrait signifier que les gens ont moins d'informations ou d'expérience sur l'utilisation de la robotique avec le Jumeau numérique par rapport aux drones. Il est important de creuser davantage pour comprendre les raisons de ce niveau de neutralité.

4.2.11 Opinion sur l'utilisation de l'analyse des données avec le Jumeau numérique en vue d'améliorer l'efficacité

58.3% des répondants ont un avis fort sur l'utilisation de l'analyse des données avec le Jumeau numérique. Cela indique un fort soutien pour cette combinaison de technologies, ce qui est le pourcentage le plus élevé parmi les trois sondages.

25% des répondants ont un avis neutre, montrant qu'une proportion notable de répondants à besoin de plus d'informations ou d'éclaircissements pour développer une opinion. 8.3% des répondants ont un avis très fort en faveur de cette technologie.

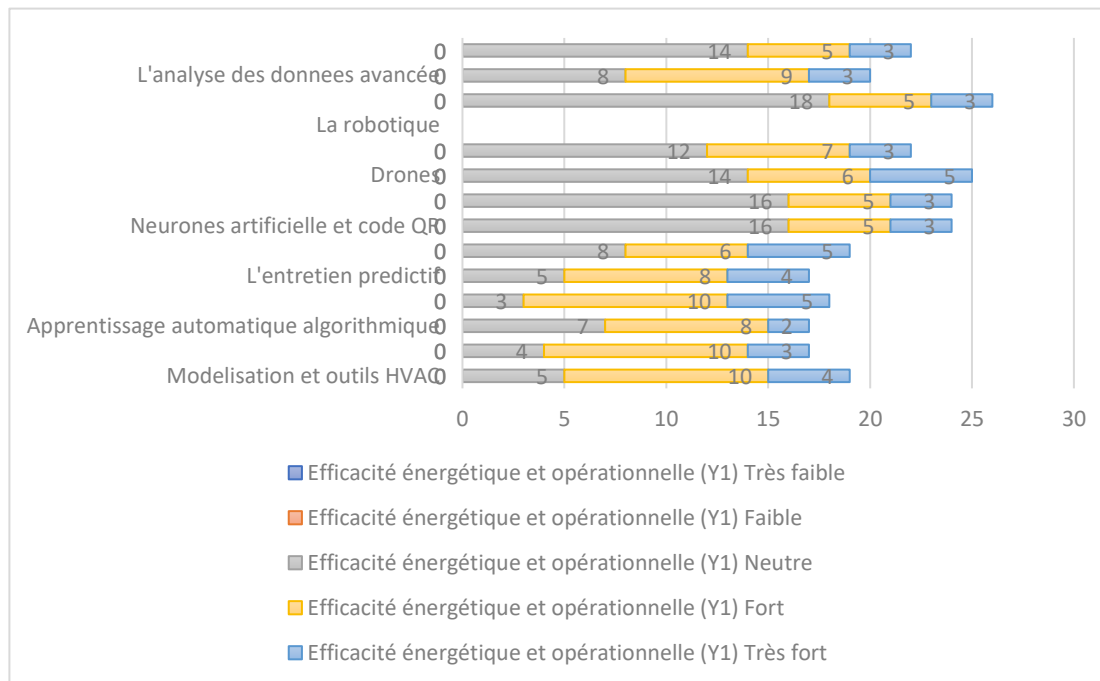
4.2.12 Opinion sur l'utilisation de l'automatisation des tâches avec le Jumeau numérique en vue d'améliorer l'efficacité

25% des répondants ont un avis fort en faveur de l'automatisation des tâches avec le Jumeau numérique. Ce pourcentage est le plus bas parmi les trois sondages que vous avez partagés, ce qui suggère un soutien moins marqué pour cette combinaison de technologies.

50% des répondants ont un avis neutre, ce qui est le pourcentage le plus élevé parmi les trois sondages. Cela indique un degré élevé d'indécision ou de manque

d'informations parmi les répondants. 8.3% des répondants ont un avis très fort en faveur de cette technologie, tandis que 8.3% ont un avis faible.

Figure 23 Histogramme de la proposition 1.2



L'historgramme résume les résultats du sondage de l'intégration des concepts, méthode et outils du Jumeau numérique (X2) avec d'autre approches technologiques pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental (Y1). Cette représentation visuelle des données met en évidence les opinions et les attitudes des participants envers différentes approches technologiques et leur impact potentiel.

L'historgramme montre clairement que les avis varient considérablement en fonction de l'approche technologique examinée. Voici quelques points clés d'analyse regroupés par catégorie :

La première approche qui a suscité le plus d'adhésion en réponse à notre proposition 1.2 est l'exosquelette, avec 21 avis favorables allant de forts à très forts, ainsi que 5 avis neutres. Ensuite, on observe un groupe de trois outils et approches, à savoir les drones, les chat bot, et l'intégration de neurones artificiels et code QR, qui ont reçu un total de 19 avis favorables, comprenant des avis forts et très forts, avec 5 ou 6 avis neutres pour chacun d'eux.

La robotique a également reçu un soutien significatif, avec 15 avis favorables et 7 avis neutres. En revanche, le scanner 3D a obtenu 13 avis favorables.

Il est à noter que la tendance des avis favorables diminue par la suite pour les autres technologies, y compris l'analyse des données avancée, l'entretien prédictif, l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique, l'Internet des objets, et l'outil Havé. Pour ces dernières, on observe des avis neutres allant de 8 à 11, ce qui ne reflète pas nécessairement une opinion négative, mais plutôt un manque de connaissance ou de familiarité avec ces outils.

Ceci révèle un large éventail d'opinions parmi les participants, mais plusieurs approches technologiques semblent recueillir un soutien significatif. Les résultats reflètent un intérêt croissant pour l'incorporation de ces technologies dans le contexte du Jumeau numérique afin d'améliorer l'efficacité opérationnelle et de réduire l'impact environnemental.

4.3 ÉVALUATION DE LA PROPOSITION 2.1

La proposition P2.1 est relative à l'influence du BIM dans l'amélioration de l'optimisation technique, Voici comment les répondants à l'étude ont réparti leurs réponses :

Tableau 16 Détails des réponses obtenues pour la proposition 2.1

P2.1	Optimisation (Y2)				
Outils et Approches BIM (X1)	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort
PSS (Outil de réduction de l'impact environnemental)	0	0	5	8	5
Autodesk revit	0	0	3	10	5
Autodesk insight 360° "Green building"	0	0	3	10	5
Approche décisionnel BIM écologie	0	0	6	8	6
Block chaine	0	0	11	8	3
Intelligence artificielle	0	0	7	8	5

4.3.1 Opinion sur l'intégration du BIM avec l'outil PSs en vue d'améliorer L'optimisation

Un niveau élevé d'adhésion à cette proposition, avec 75% des répondants exprimant des avis favorables (50% d'avis forts et 25% d'avis très forts). Cela suggère un intérêt marqué de la part des participants pour l'intégration du BIM avec les PSs pour atteindre une optimisation technique significative.

Le fait que la majorité des répondants ait émis des avis forts et très forts indique un consensus sur l'importance de cette intégration. Cela peut être interprété comme une

reconnaissance de la valeur potentielle de cette approche pour réduire l'impact environnemental tout en améliorant la qualité technique des projets de construction.

Bien que 25% des répondants aient exprimé des avis neutres, cela ne signifie pas nécessairement un désintérêt ou un manque de soutien. Les avis neutres peuvent refléter une certaine neutralité ou un besoin de plus d'informations pour former une opinion plus solide.

En résumé, notre sondage révèle un fort soutien en faveur de l'intégration du BIM avec les PSs pour garantir une optimisation technique significative. Ces résultats suggèrent un potentiel prometteur pour cette approche dans le secteur de la construction.

4.3.2 Opinion sur l'intégration du BIM avec Autodesk Revit en vue d'améliorer l'optimisation

De plus, 25% des répondants ont émis des avis très forts, ce qui suggère un enthousiasme substantiel pour cette approche. De plus, 25% des répondants ont émis des avis très forts, ce qui suggère un enthousiasme substantiel pour cette approche. Seulement 8,3% des répondants ont exprimé des avis neutres, ce qui suggère que la majorité des participants ont une opinion formée sur l'utilisation d'Autodesk Revit avec le BIM.

Les avis neutres peuvent refléter un besoin d'informations supplémentaires ou un manque de familiarité avec le sujet, mais ils sont en minorité. Notre sondage montre un fort soutien, y compris un soutien très fort, en faveur de l'utilisation d'Autodesk Revit avec le BIM pour atteindre une optimisation technique significative. Ces résultats suggèrent que cette approche est perçue comme une solution viable pour améliorer la qualité technique des projets de construction, ce qui pourrait être prometteur pour l'industrie de la construction et l'adoption du BIM.

4.3.3 Opinion sur l'intégration du BIM avec Autodesk insight 360° en vue d'améliorer une optimisation technique significative

25% des répondants ont émis des avis très forts, ce qui suggère un enthousiasme substantiel pour cette approche. Cela dénote une reconnaissance marquée de la valeur de cette intégration pour améliorer la qualité technique des projets.

Seulement 8,3% des répondants ont exprimé des avis neutres, ce qui suggère que la majorité des participants ont une opinion formée sur l'utilisation d'Autodesk Insight 360° avec le BIM. Les avis neutres peuvent refléter un besoin d'informations supplémentaires ou un manque de familiarité avec le sujet, mais ils sont en minorité. Notre sondage montre un fort soutien, y compris un soutien très fort, en faveur de l'utilisation d'Autodesk Insight 360° avec le BIM pour atteindre une optimisation technique significative.

4.3.4 Opinion sur l'intégration du BIM avec l'approche décisionnelle BIM écologie en vue d'améliorer une optimisation technique significative

On a obtenu un soutien modéré en faveur de l'utilisation de l'approche décisionnelle BIM écologie, avec 50% des répondants exprimant des avis forts. Cela indique qu'une proportion significative des participants est en faveur de cette approche pour l'optimisation technique, 8,3% des répondants ont émis des avis très forts en faveur de l'approche décisionnelle BIM écologie. Bien que ce pourcentage soit plus faible que pour les avis forts, il indique néanmoins un soutien solide parmi un segment de participants.

33,3% des répondants ont émis des avis neutres à l'égard de cette approche. Ces avis neutres peuvent refléter un manque de familiarité ou d'informations sur l'approche décisionnelle BIM écologie, ou une absence d'opinion formée.

8,3% des répondants ont indiqué ne pas connaître cette approche. Ce résultat peut être dû au fait que l'approche décisionnelle BIM écologie est relativement nouvelle.

Notre sondage révèle un soutien modéré en faveur de l'utilisation de l'approche décisionnelle BIM écologie pour l'optimisation technique. Il est important de noter que près d'un tiers des répondants ont émis des avis neutres, ce qui suggère un besoin d'informations supplémentaires ou de sensibilisation sur cette approche.

4.3.5 Opinion sur l'intégration du BIM avec la Blockchain en vue d'améliorer l'optimisation

Un soutien modéré en faveur de l'utilisation de la blockchain avec le BIM, avec 50% des répondants exprimant des avis forts. Cela indique qu'une proportion significative des participants est en faveur de cette approche pour l'optimisation technique.

8,3% des répondants ont émis des avis très forts en faveur de l'utilisation de la blockchain avec le BIM. Bien que ce pourcentage soit plus faible que pour les avis forts, il indique néanmoins un soutien solide parmi un segment de participants.

25% des répondants ont émis des avis neutres à l'égard de cette approche. Les avis neutres peuvent refléter un manque de familiarité ou d'informations sur la combinaison de la blockchain avec le BIM.

16,7% des répondants ont indiqué ne pas connaître cette approche. Cela peut indiquer que la combinaison de la blockchain avec le BIM n'est pas encore largement connue ou comprise par tous les participants, ce qui nécessite une sensibilisation et une éducation supplémentaires.

Notre sondage révèle un soutien modéré en faveur de l'utilisation de la blockchain avec le BIM pour l'optimisation technique. Il est important de noter que près d'un quart des répondants ont émis des avis neutres, ce qui suggère un besoin d'informations supplémentaires ou de sensibilisation sur cette approche.

4.3.6 Opinion sur l'intégration du BIM avec l'IA en vue d'obtenir une optimisation technique

On a obtenu un soutien significatif en faveur de l'utilisation de l'intelligence artificielle avec le BIM, avec 50% des répondants exprimant des avis forts. Cela indique un consensus important parmi les participants sur l'efficacité de cette combinaison pour atteindre une optimisation technique significative.

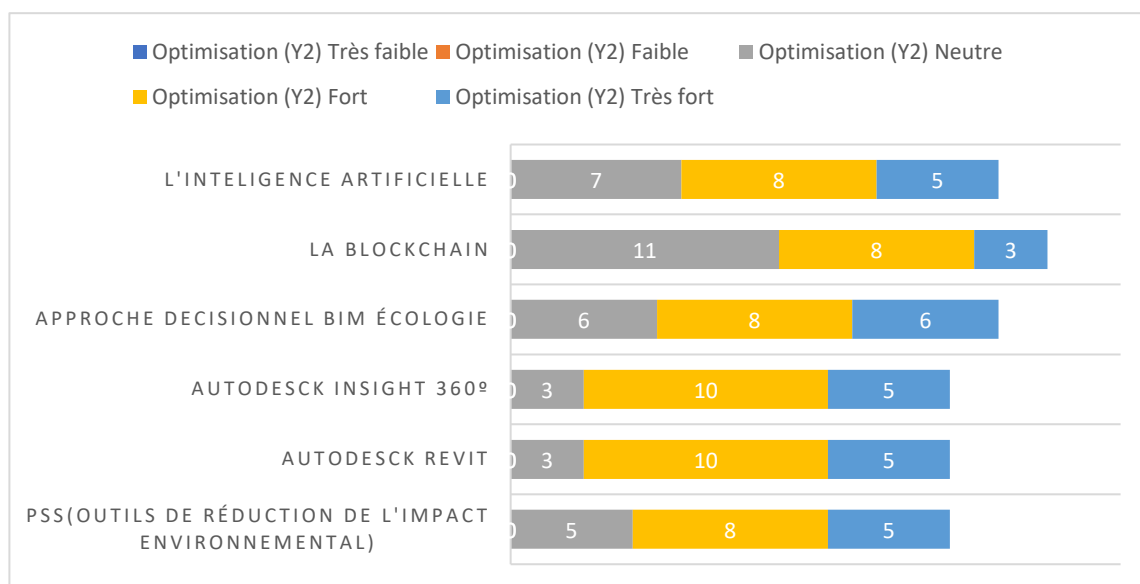
25% des répondants ont émis des avis très forts en faveur de l'utilisation de l'intelligence artificielle avec le BIM. Cela dénote un soutien substantiel parmi un segment de participants qui voit clairement le potentiel de cette approche. 16,7% des répondants ont émis des avis neutres à l'égard de cette approche. Les avis neutres peuvent refléter un besoin d'informations supplémentaires ou un manque de familiarité avec la combinaison de l'intelligence artificielle avec le BIM.

8,3% des répondants ont indiqué ne pas connaître cette approche. Cela peut indiquer que la combinaison de l'intelligence artificielle avec le BIM n'est pas encore largement connue ou comprise par tous les participants. Notre sondage révèle un soutien

significatif en faveur de l'utilisation de l'intelligence artificielle avec le BIM pour l'optimisation technique.

Il est important de noter que bien que certains répondants aient exprimé des avis neutres, la majorité a émis des avis forts ou très forts, ce qui indique un intérêt marqué pour cette combinaison.

Figure 24 Histogramme de la proposition 2.1



L'histogramme reflète une réception positive de l'idée d'intégrer des concepts, méthodes et outils BIM avec d'autres technologies pour améliorer l'optimisation technique dans le domaine de la construction. La majorité des répondants semblent favorables à cette proposition, ce qui indique un intérêt marqué pour l'utilisation du BIM en conjonction avec diverses approches technologiques pour améliorer les processus et les résultats techniques.

Blockchain : Cette dimension reçoit un fort soutien, avec 14 avis forts et très forts. Cela indique que l'intégration de la blockchain dans le contexte BIM est largement acceptée et perçue comme très prometteuse pour l'optimisation technique.

Approche Décisionnelle BIM Écologie et Intelligence Artificielle : Ces deux approches obtiennent également un soutien substantiel, avec 12 avis favorables (forts et très forts). Cela suggère que l'intégration de l'approche décisionnelle BIM orientée vers l'écologie et de l'intelligence artificielle est bien accueillie et peut avoir un impact positif sur l'optimisation technique.

Outil PSs (Outil de réduction de l'impact environnemental) : Cet outil obtient 10 confirmations, ce qui est un soutien considérable. Il est important de noter que cet outil est souvent utilisé pour garantir la sécurité des processus de construction.

Revit et Autodesk Insight 360 ° : Bien que le soutien pour ces outils soit moins fort, avec un pourcentage moindre de confirmations, le manque de connaissances est évoqué comme la principale raison. Cela suggère un potentiel d'adoption plus important une fois que les utilisateurs se familiariseront davantage avec ces outils.

4.4 ÉVALUATION DE LA PROPOSITION 2.2

La proposition P2.2 est relative à l'influence du Jumeau numérique dans l'amélioration de l'optimisation technique, Voici comment les répondants à l'étude ont réparti leurs réponses :

Tableau 17 Détails des réponses obtenues pour la proposition 2.2

P2.2	Optimisation (Y2)				
	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort
Outils et Approches Jumeau numérique (X2)					
Interface utilisateur	0	0	8	7	3
Caméra thermique et capteurs environnementaux	0	0	7	9	4
Algorithme d'apprentissage automatique	0	0	10	9	3
Intelligence artificielle	0	0	7	10	3
Espace de travail interactif	0	0	10	7	3
Modélisation prédictif	0	0	10	9	3
Block chaine	0	0	8	7	3

4.4.1 Opinion sur l'intégration du JN avec l'interface utilisateur en vue d'améliorer l'optimisation

Un soutien modéré en faveur de l'utilisation de l'interface utilisateur avec le Jumeau numérique, avec 41,7% des répondants exprimant des avis forts. Cela suggère que près de la moitié des participants sont en faveur de cette approche pour l'optimisation technique. Seulement 8,3% des répondants ont émis des avis très forts en faveur de l'utilisation de l'interface utilisateur avec le Jumeau numérique, Bien que ce pourcentage soit relativement bas, il indique un soutien solide parmi un segment de participants.

La moitié des répondants (50%) ont émis des avis neutres à l'égard de cette approche. Les avis neutres peuvent refléter un manque d'opinion formée, notre sondage donc révèle un soutien modéré, y compris un soutien très fort limité, en faveur de l'utilisation de l'interface utilisateur avec le Jumeau numérique pour l'optimisation technique.

4.4.2 Opinion sur l'intégration du Jumeau numérique avec l'interface utilisateur en vue d'améliorer l'optimisation

A Obtenu un soutien élevé en faveur de l'utilisation de caméras thermiques et de capteurs environnementaux avec le Jumeau numérique, avec 58,3% des répondants exprimant des avis forts. Cela indique un fort consensus parmi les participants sur l'efficacité de cette combinaison pour atteindre une optimisation technique significative, 16,7% des répondants ont émis des avis très forts en faveur de l'utilisation de caméras thermiques et de capteurs environnementaux avec le Jumeau numérique. Bien que ce pourcentage soit plus faible que pour les avis forts, il indique néanmoins un soutien solide parmi un segment de participants.

Seulement 16,7% des répondants ont émis des avis neutres à l'égard de ces outils. Ce faible pourcentage suggère que la majorité des participants ont une opinion formée sur l'utilisation de ces technologies, ce qui est un signe positif pour leur adoption.

8,3% des répondants ont indiqué ne pas connaître ces outils. Cela indique que la connaissance de ces technologies est relativement répandue parmi les participants, mais qu'il existe encore un petit pourcentage de personnes qui nécessitent davantage d'informations.

4.4.3 L'intégration du JN avec l'algorithme d'apprentissage automatique en vue d'améliorer l'optimisation

A reçu un solide soutien, avec 58,3% des répondants exprimant des avis forts en faveur de cette combinaison. Ce résultat indique un consensus important sur le potentiel de cette intégration pour l'optimisation technique. Bien que 25% aient émis des avis neutres, ce pourcentage est en minorité.

4.4.4 L'intégration du JN avec l'IA en vue d'améliorer l'optimisation

A reçu un soutien encore plus fort, avec 66,7% des répondants exprimant des avis forts. Cela suggère un enthousiasme substantiel pour cette approche. Toutefois, 16,7% ont émis des avis neutres, indiquant un besoin d'informations supplémentaires pour certains participants.

4.4.5 L'intégration du JN avec l'espace de travail interactif en vue d'améliorer l'optimisation

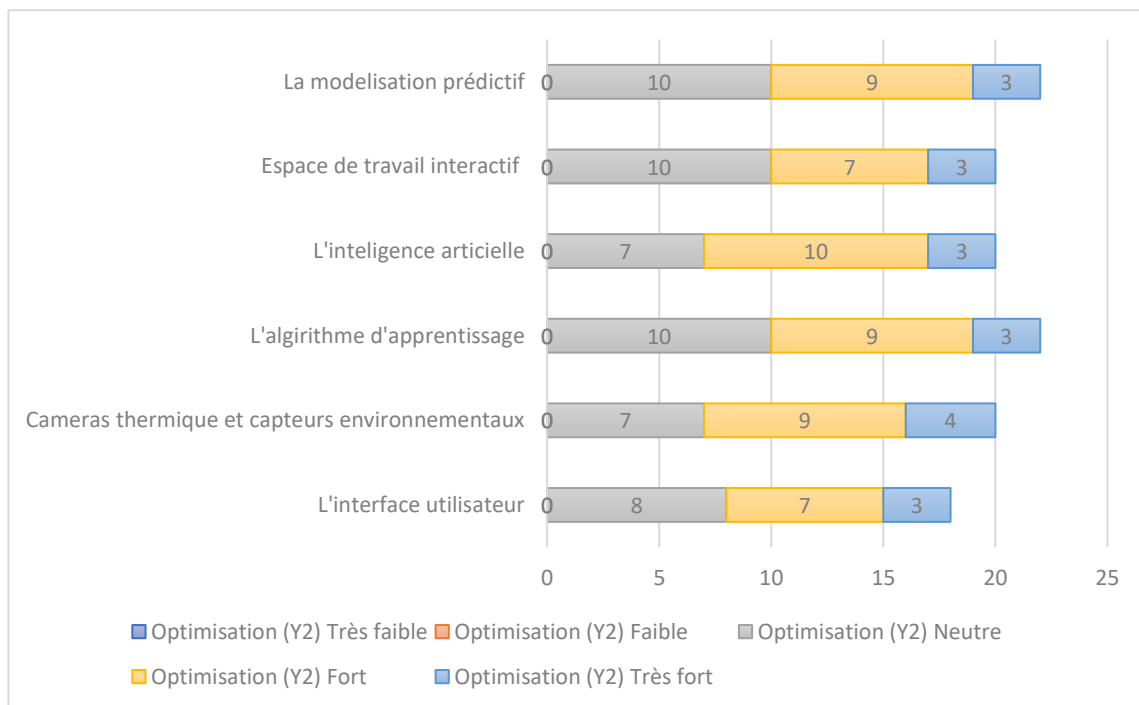
A reçu un soutien modéré, avec 41,7% des avis forts. Un pourcentage égal de 41,7% a émis des avis neutres, ce qui suggère que cette combinaison peut nécessiter plus de clarification ou d'exemples concrets pour susciter un soutien plus fort.

4.4.6 L'intégration du Jumeau numérique avec la modélisation prédictive en vue d'améliorer l'optimisation

A de nouveau obtenu un soutien solide, avec 58,3% des avis forts. La majorité des participants ont exprimé leur soutien à cette approche, bien que 25% aient des avis neutres, ce qui pourrait signifier un besoin de communication sur les avantages de cette intégration.

4.4.7 L'intégration du Jumeau numérique avec la blockchain en vue d'améliorer l'optimisation

A obtenu un soutien modéré, avec 50% des avis forts. Les avis neutres (25%) sont en minorité, ce qui suggère que la plupart des participants ont une opinion favorable. Cependant, 16,7% ont émis des avis très forts, indiquant un fort soutien parmi un segment de participants.

Figure 25 Histogramme de la proposition 2.2

L'histogramme représentant le nombre d'opinions sur l'intégration du Jumeau numérique avec d'autres technologies émergentes en vue d'obtenir une optimisation technique significative montre clairement les préférences et les perceptions des répondants.

Caméras thermiques et capteurs environnementaux ainsi que l'intelligence artificielle se démarquent comme les deux technologies les plus appréciées, avec 13 opinions favorables, y compris des avis forts et très forts. Cela suggère un consensus solide parmi les participants sur le potentiel de ces intégrations pour améliorer l'efficacité technique.

Algorithme d'apprentissage automatique et modélisation prédictive arrivent en deuxième position, avec 12 opinions favorables, y compris des avis forts et très forts.

Cependant, il est important de noter que 10 avis neutres accompagnent ces technologies, indiquant un besoin potentiel de communication ou d'explications supplémentaires.

Interface utilisateur et espace de travail interactif ont également obtenu un soutien considérable, avec 10 opinions favorables, y compris des avis forts et très forts. Cependant, 10 avis neutres accompagnent l'espace de travail interactif, tandis que l'interface utilisateur reçoit 8 avis neutres. Cela suggère que certains participants pourraient ne pas être familiers avec ces technologies ou avoir besoin de plus d'informations pour former une opinion solide.

En conclusion, l'histogramme met en évidence une forte préférence pour l'intégration du Jumeau numérique avec les caméras thermiques, les capteurs environnementaux et l'intelligence artificielle. Cependant, il est essentiel de noter que des avis neutres accompagnent plusieurs de ces technologies. Dans l'ensemble, ces résultats montrent un fort intérêt pour l'utilisation de ces technologies émergentes pour optimiser l'efficacité technique, mais ils soulignent également l'importance de l'information pour susciter un soutien plus large.

4.5 ÉVALUATION DE LA PROPOSITION 3.1

La proposition P3.1 explore l'impact du BIM sur les processus de gestion de projets de construction tout au long du cycle de vie d'un projet (*Z*), mettant particulièrement l'accent sur l'amélioration de l'efficacité énergétique et opérationnelle (*Y1*). Chaque outil est appliqué de manière principale à une étape spécifique du cycle de vie du projet. Les résultats de l'étude démontrent comment les répondants ont distribué leurs réponses en fonction des questions spécifiques pour chaque outil, ou les questions posées sur le questionnaire est relatives aux conclusions des recherches récentes et les approbations évoquées dans la revue de littérature présentée précédemment au chapitre 2

dont chaque outils est majoritairement utiliser dans une étape précise du cycle de vie du projet commençant par la modélisation 4D dans le BIM, lors de la phase de conception, qui se révèle bénéfique en permettant une planification plus précise, une coordination efficace et une communication améliorée, contribuant ainsi à la réussite globale du projet de construction. Les phases de planification privilégient la 5D et la 6D, tandis que la 7D, la 8D et l'approche LEAN sont appliquées lors de la phase de conception. La convergence avec l'outil DAS intervient en phase de clôture. L'outil ANFIS et le BWPE sont utilisés pendant la phase de conception, tout comme la 3D et l'intelligence artificielle. Chaque outil est spécifiquement dédié à une phase particulière du projet en fonction de son utilité, bien que certains puissent être utilisés dans d'autres phases, et l'utilisation de chaque outil est déterminée par des critères pertinents. Voici comment les répondants à l'étude ont réparti leurs réponses :

P3.1	Efficacité énergétique et opérationnelle (Y1)																													
Construction (Z)	Conception					Planification					Exécution					Surveillance et contrôle					Clôture									
	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort					
Convergence DAS(Évaluation de facilité de démontage)/BIM																										0	0	7	9	4
BWPE (Outil d'évaluation des éléments structurelle)	0	1	3	6	3																									
ANFIS (Outil de signalisation des déchets de la construction)	0	3	0	9	6																									
Intelligence artificiel						0	0	3	8	7																				
Modelisation3D						0	0	3	9	6																				

4.5.1 Opinion sur l'implication de la 3D BIM pendant la phase de Conception

L'implication de la modélisation 3D BIM pendant la phase de conception au sein des processus de gestion de projets de construction pour améliorer son l'efficacité A obtenu un fort soutien, avec 58,3% des répondants exprimant des avis forts en faveur de cette approche. Cela indique un consensus important sur l'efficacité de la modélisation 3D BIM pour l'amélioration des processus de gestion de projets de construction.

4.5.2 Opinion sur l'implication de la4D BIM pendant la phase de planification

L'implication de la modélisation 4D BIM pendant la phase de planification pour la gestion temporelle au sein des processus de gestion de projets de construction pour améliorer son l'efficacité A également obtenu un solide soutien, avec 50% des avis forts. La majorité des participants ont exprimé leur soutien à cette intégration, avec 41,7% d'avis très forts.

4.5.3 Opinion l'implication de la 5D BIM pendant la phase de planification

l'implication de la modélisation 5D BIM pendant la phase de planification pour la gestion des cout au sein des processus de gestion de projets de construction pour améliorer son l'efficacité A reçu un soutien fort, avec 58,3% des avis forts. Cela dénote un consensus important sur l'efficacité de la modélisation 5D BIM dans la gestion des coûts de projets de construction.

4.5.4 Opinion l'implication de la 6D BIM pendant la phase de Conception

l'implication de la modélisation 6D(Durabilité) BIM pendant la phase de Conception au sein des processus de gestion de projets de construction pour améliorer son l'efficacité a obtenu un soutien modéré, avec 41,7% d'avis forts. Bien que 16,7% aient émis des avis neutres, 16,7% ont également exprimé des avis très forts, indiquant un intérêt marqué pour la durabilité dans la gestion de projets de construction.

4.5.5 Opinion l'implication de la 7DBIM pendant la phase de clôture

l'implication de la modélisation 7D(gestion des installation) BIM pendant la phase de clôture au sein des processus de gestion de projets de construction pour améliorer son l'efficacité a reçu un soutien solide, avec 33,3% des avis forts. La même proportion de 33,3% a exprimé des avis très forts, indiquant un fort soutien à cette approche.

4.5.6 Opinion sur l'implication de la 8DBIM pendant la phase de clôture

L'implication de la modélisation 8D(gestion de la sécurité) BIM pendant la phase de clôture au sein des processus de gestion de projets de construction pour améliorer l'efficacité énergétique et opérationnelle a reçu un soutien solide, avec 33,3% des répondants exprimant des avis forts et 33,3% des avis très forts. Cela indique un consensus important sur l'efficacité de cette approche pour améliorer la sécurité dans la gestion de projets de construction. Cependant, 25% des avis étaient neutres, ce qui suggère un besoin de communication ou d'informations supplémentaires.

4.5.7 Opinion sur l'implication LEAN avec BIM pendant la phase de planification

L'implication des principes LEAN avec BIM pendant la phase de planification au sein des processus de gestion de projets de construction pour améliorer l'efficacité énergétique et opérationnelle a obtenu un fort soutien, avec 63,6% des avis forts et 27,3% des avis très forts. Cela reflète un enthousiasme marqué pour l'intégration des principes LEAN dans les processus de gestion de projets de construction. Seulement 9,1% des avis étaient neutres.

4.5.8 Opinion sur la convergence BIM avec DAS en phase de conception

La convergence BIM avec DAS (Évaluation de facilité de démontage pendant la phase conception au sein des processus de gestion de projets de construction pour améliorer l'efficacité énergétique et opérationnelle a reçu un soutien modéré, avec 33,3% d'avis forts. Cependant, 41,7% des avis étaient neutres, ce qui indique un besoin potentiel de clarification ou d'information supplémentaire.

4.5.9 Opinion sur l'implication de l'outil BWPE pendant la phase de conception

L'implication de l'outil BWPE (Outil d'évaluation des éléments structurels) Pendant la phase de conception au sein des processus de gestion de projets de construction améliorent l'efficacité énergétique et opérationnelle a également obtenu un soutien modéré, avec 33,3% d'avis forts. Cependant, 33,3% des avis étaient neutres, ce qui peut indiquer un manque de familiarité avec l'outil.

4.5.10 Opinion sur l'implication de la 7D BIM pendant la phase de clôture

l'implication de la modélisation 7D (gestion des installations) BIM pendant la phase de clôture au sein des processus de gestion de projets de construction pour améliorer l'efficacité énergétique et opérationnelle a reçu un soutien solide, avec 50% d'avis forts. Seulement 16,7% des avis étaient neutres, mais 16,7% ne connaissaient pas l'outil.

4.5.11 Opinion sur l'implication de l'outil ANFIS avec BIM pendant la conception

L'implication de l'outil ANFIS (Outil de signalisation des déchets de la construction) avec BIM Pendant la phase de conception pour améliorer l'efficacité énergétique et opérationnelle a obtenu un soutien solide, avec 50% d'avis forts. Toutefois, 25% ne connaissaient pas l'outil, ce qui suggère un besoin de sensibilisation.

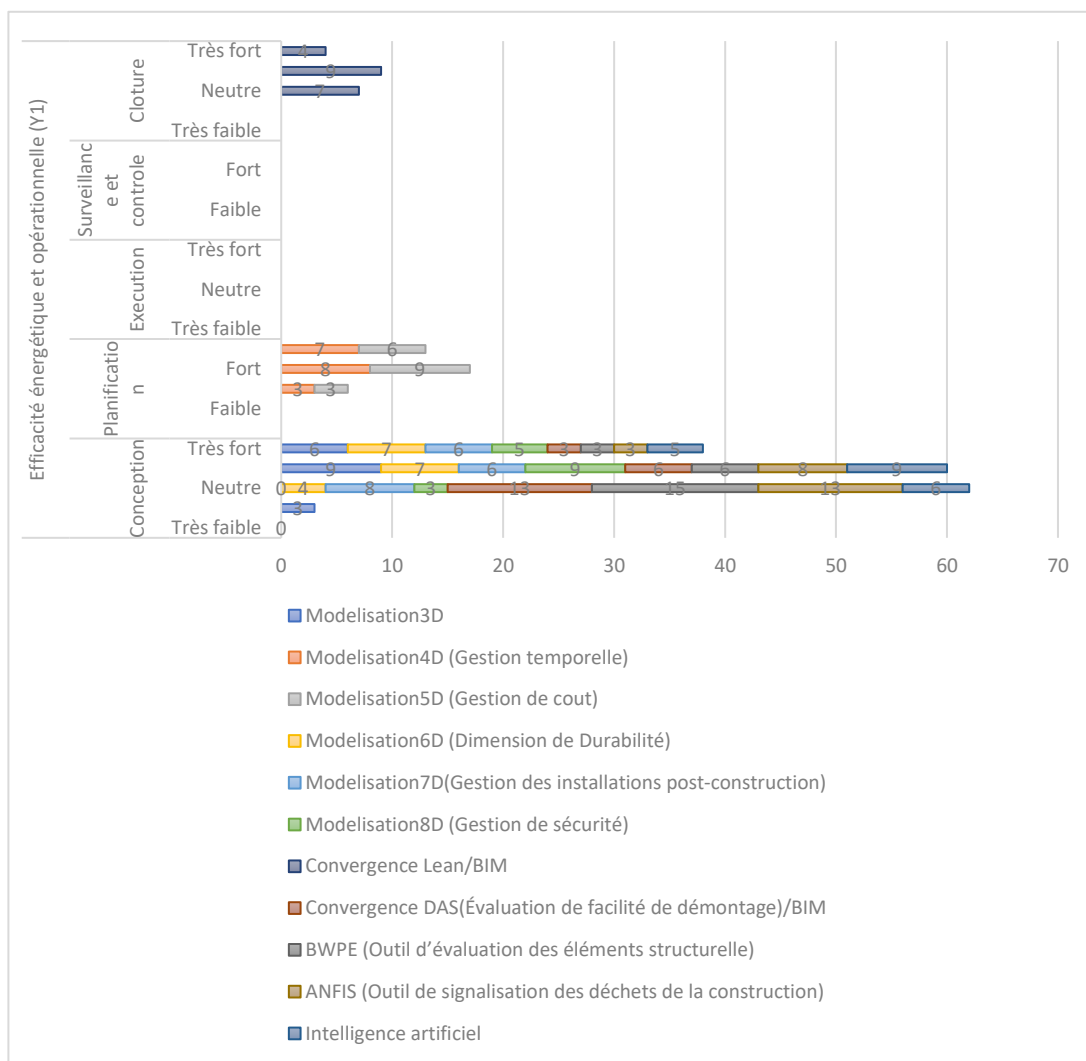
4.5.12 Opinion sur l'implication de l'IA avec le BIM en phase de planification

Pendant l phase de planification et tout au long du cycle de vie d'un projet de construction a reçu un soutien solide, avec 58% des avis forts. 8,3% des avis étaient neutres, mais 25% des avis étaient très forts.

En somme les résultats reflètent les niveaux de soutien et d'opinions neutres pour chaque intégration BIM spécifique dans les processus de gestion de projets de construction. Les résultats montrent un intérêt marqué pour l'efficacité améliorée, mais ils

soulignent également l'importance de l'information pour susciter un soutien plus large, en particulier lorsque les participants ne connaissent pas les outils ou les technologies mentionnés.

Figure 26 Histogramme de la proposition 3.1



Cet histogramme reflète de manière significative les perceptions des répondants quant à l'implication du BIM dans les processus de gestion de projets de construction pour améliorer l'efficacité opérationnelle et énergétique comme suit :

La modélisation 4D et 5D pendant la phase de planification se distingue clairement comme la préférence majeure, obtenant le plus grand nombre d'avis favorables avec 15, composés principalement d'avis forts et très forts. La faible présence d'avis neutres (seulement 3) suggère une forte reconnaissance et compréhension de l'impact positif de ces modélisations sur l'efficacité.

Ensuite, la modélisation 6D et 8D en phase de conception, ainsi que l'intelligence artificielle, ont toutes deux obtenu 14 avis favorables, démontrant un soutien significatif. Les avis neutres sont également limités (4 pour la modélisation 6D et 8D, 6 pour l'intelligence artificielle), indiquant un niveau élevé d'appréhension ou d'acceptation de ces technologies.

L'approche Lean en phase de clôture suit de près avec 13 avis favorables, bien que légèrement plus d'avis neutres (7). Cela pourrait suggérer que bien que l'approche soit généralement bien perçue, certains participants pourraient ne pas être totalement familiarisés avec ses avantages.

La modélisation 7D en phase de conception, bien qu'obtenant 12 avis favorables, présente un nombre plus élevé d'avis neutres (8). Cela pourrait indiquer une nécessité de clarification ou d'éducation sur cette approche spécifique.

La modélisation 3D en phase de conception a également reçu 12 avis favorables, mais a été accompagnée de 3 avis faibles. Cela pourrait indiquer une perception mitigée de son impact ou un besoin d'amélioration pour répondre aux attentes des répondants.

Enfin, les outils DAS, ANFIS et BWPE en phase de conception ont généré des avis neutres plus élevés, compris entre 13 et 15. Ceci suggère un manque de connaissance de ces outils par rapport aux autres, indépendamment de leurs avantages potentiels.

En conclusion, cet histogramme indique une forte préférence pour la modélisation 4D et 5D, ainsi qu'une acceptation significative de la modélisation 6D, 8D et de l'intelligence artificielle. Les résultats soulignent également la nécessité potentielle d'une meilleure communication sur les approches moins familières ou les outils spécifiques.

4.6 ÉVALUATION DE LA PROPOSITION 3.2

La proposition P3.2 est relative à l'influence du Jumeau numérique dans l'amélioration de l'efficacité énergétique et opérationnelle pendant les phases d'un projet de construction au sein des processus de gestion de projet, Chaque outil est appliqué de manière principale à une étape spécifique du cycle de vie du projet. Les résultats de l'étude démontrent comment les répondants ont distribué leurs réponses en fonction des questions spécifiques pour chaque outil, ou les questions posées sur le questionnaire est relatives aux conclusions des recherches récentes et les approbations évoquées dans la revue de littérature présentée précédemment au chapitre 2 dont chaque outil est majoritairement utilisé dans une étape précise du cycle de vie du projet commençant par l'outil HVAC, en la phase de conception. Le phase de planification privilégie l'intelligence artificielle, les scanner 3D, les neurones artificiels avec le code QR ainsi que les drones UAV et l'outil ANFIS, tandis que l'entretien prédictif et le Chat Bot sont appliquées lors de la phase de surveillance et contrôle. Les capteur et dispositif IOT intervient en phase d'exécution. Chaque outil est spécifiquement dédié à une phase particulière du projet en fonction de son utilité, bien que certains puissent être utilisés dans d'autres phases, et l'utilisation de chaque outil est déterminée par des critères pertinents Voici comment les répondants à l'étude ont réparti leurs réponses :

Tableau 19 Détails des réponses obtenues pour la proposition 3.2

P3.2	Efficacité énergétique opérationnelle (Y1)																								
Jumeau numérique (X2) Construction (Z)	Conception					Planification					Exécution					Surveillance et contrôle					Clôture				
	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort
HVAC Chauffage, climatisation, ventilation	0	0	6	9	5																				
Capteur et dispositif IOT										0	0	6	8	5											
Apprentissage automatique	0	0	6	9	5																				
Intelligence artificielle	0	0	6	7	7																				
Entretien prédictif																0	0	4	10	6					

4.6.1 Opinion sur l'implication de l'outil HVAC avec la JN pendant la phase de conception et planification

L'implication de l'outil HVAC (Chauffage, climatisation, ventilation) avec la Jumeau numérique pendant la phase de conception et planification au sein des processus de gestion de projets de construction en vue d'améliorer l'efficacité avec 58.3% d'avis forts. La présence de 25% d'avis très forts suggère une reconnaissance significative de l'efficacité potentielle de cette intégration.

4.6.2 L'implication de Capteur et dispositif IoT avec la JN pendant la phase d'exécution et de surveillance

L'implication de Capteur et dispositif IoT avec le Jumeau numérique pendant la phase d'exécution et de surveillance au sein des processus de gestion de projets de construction en vue d'améliorer l'efficacité a reçu un fort appui, avec 54.5% d'avis forts et 27.3% d'avis très forts. Les résultats positifs indiquent une perception solide de l'efficacité opérationnelle et énergétique améliorée.

4.6.3 L'implication de la modélisation 4D et 5D pendant la phase de conception

L'implication de la modélisation 4D et 5D pendant la phase de conception au sein des processus de gestion de projets de construction en vue d'améliorer l'efficacité a suscité un soutien massif, avec 58.3% d'avis forts. La forte présence d'avis très forts (25%)

souligne la reconnaissance de la valeur de ces modélisations dans les processus de gestion de projets de construction.

4.6.4 L'implication de l'IA avec le JN en phase de conception

L'implication de l'intelligence artificielle avec le Jumeau numérique pendant la phase de conception et tout au long du projet a généré un soutien équilibré au sein des processus de gestion de projets de construction en vue d'améliorer l'efficacité avec 41.7% d'avis forts et 41.7% d'avis très forts. Cette répartition égale suggère un consensus fort sur l'amélioration potentielle de l'efficacité.

4.6.5 L'implication de l'entretien préventif avec la JN pendant la phase de surveillance et contrôle

L'implication de l'entretien préventif avec le Jumeau numérique pendant la phase de surveillance et contrôle a remporté un large soutien, avec 66.6% d'avis forts au sein des processus de gestion de projets de construction en vue d'améliorer l'efficacité, la majorité d'avis très forts (8.3%) indique une forte conviction dans l'efficacité accrue grâce à cette intégration.

4.6.6 L'implication du scanner 3D en phase de conception

L'implication du scanner 3D a obtenu un solide soutien en phase de conception au sein des processus de gestion de projets de construction en vue d'améliorer l'efficacité avec 58.3% d'avis forts et 16.7% d'avis très forts. Les résultats positifs indiquent la reconnaissance de la valeur de ces modélisations dans les processus de gestion de projets.

4.6.7 L'implication de neurones artificielles et du code QR avec le Jumeau numérique en phase de conception

L'implication de neurones artificielles et du code QR avec le Jumeau numérique en phase de conception tout au long d'un projet a reçu un soutien varié au sein des processus de gestion de projets de construction en vue d'améliorer l'efficacité avec 33.3% d'avis forts et 8.3% d'avis très forts. Les résultats suggèrent une perception positive, bien que certains répondants aient besoin d'informations supplémentaires.

4.6.8 L'implication de Chat bot avec la JN pendant la phase de surveillance et contrôle

L'implication de Chat bot avec Jumeau numérique pendant la phase de surveillance et contrôle a généré des opinions diverses avec 25% d'avis forts et 16.7% d'avis très forts. Cependant, un tiers des répondants ont exprimé des avis neutres, indiquant un besoin potentiel de clarification.

4.6.9 L'implication de drone UAV avec la DT pendant la phase de conception

L'implication de drone UAV avec le Jumeau numérique pendant la phase de conception un fort soutien au sein des processus de gestion de projets de construction en vue d'améliorer l'efficacité avec 66.7% d'avis forts. La présence d'avis très forts (8.3%) souligne la confiance dans les avantages opérationnels de cette intégration.

4.6.10 L'implication de ANFIS avec la JN pendant la phase de conception

L'implication de ANFIS avec le Jumeau numérique pendant la phase de conception et planification a reçu un appui significatif au sein des processus de gestion de projets de construction en vue d'améliorer l'efficacité avec 41.7% d'avis forts et 8.3% d'avis très forts. La présence d'avis neutres (25%) suggère un besoin potentiel de sensibilisation sur cet outil spécifique.

Cet histogramme reflète de manière significative les perceptions des répondants quant à l'implication du Jumeau numérique dans les processus de gestion de projets de construction pour améliorer l'efficacité opérationnelle et énergétique comme suit :

L'entretien prédictif pendant la phase de surveillance et contrôle se distingue clairement comme la préférence majeure, obtenant le plus grand nombre d'avis favorables avec 16, composés principalement d'avis forts et très forts. La faible présence d'avis neutres (seulement 4) suggère une forte reconnaissance et compréhension de son impact positif sur l'efficacité.

Ensuite, l'outil HVAC, l'apprentissage automatique en phase de conception, ainsi que l'intelligence artificielle, ont toutes obtenu 14 avis favorables, démontrant un soutien significatif. Les avis neutres sont également limités à 6), indiquant un niveau élevé d'appréhension ou d'acceptation de ces technologies.

Les capteur et dispositifs IOT en phase d'exécution, les drones UAV en phase de conception suit de près avec 13 avis favorables, bien que légèrement plus d'avis neutres (6 et 7). Cela pourrait suggérer que bien que l'approche soit généralement bien perçue, certains participants pourraient ne pas être totalement familiarisés avec ses avantages.

L'outil ANFIS en phase de conception, bien qu'obtenant 9 avis favorables, présente un nombre plus élevé d'avis neutres (14). Cela pourrait indiquer une nécessité de clarification ou d'éducation sur cette approche spécifique.

Scanner 3D, neurone artificielle et code QR en phase de conception et le chat bot en phase de surveillance et contrôle ont également reçu 9 avis favorables mais avec des avis neutres plus enlevées (12 et 6 avis) neutre mais a été accompagnée de 3 avis faibles. Cela pourrait indiquer une perception mitigée de son impact ou un besoin d'amélioration

pour répondre aux attentes des répondants, aussi ceci suggère un manque de connaissance de ces outils par rapport aux autres, indépendamment de leurs avantages potentiels.

En conclusion, cet histogramme indique une forte préférence pour l'entretien prédictif de l'apprentissage automatique et de l'intelligence artificielle, ainsi qu'une acceptation significative de drone UAV, scanner 3D, des capteurs et dispositif. Les résultats soulignent également la nécessité potentielle d'une meilleure communication sur les approches moins familières ou les outils spécifiques.

4.7 ÉVALUATION DE LA PROPOSITION 4.1

La proposition P4.1 traite de l'influence du BIM sur l'amélioration de l'efficacité énergétique et opérationnelle tout au long des phases d'un projet de construction, dans le cadre des processus de gestion de projet. Chaque outil est principalement appliqué à une étape spécifique du cycle de vie du projet. Les résultats de l'étude démontrent comment les répondants ont réparti leurs réponses en fonction des questions spécifiques pour chaque outil, en lien avec les conclusions des recherches récentes et les approbations mentionnées dans la revue de littérature présentée au chapitre 2. Chaque outil est majoritairement utilisé dans une étape précise du cycle de vie du projet, débutant par la modélisation 3D dans le BIM, suivie de la 6D, des outils ANFIS, DAS, de l'intelligence artificielle ainsi que de l'outil BWPE lors de la phase de conception, qui s'avère bénéfique. Les phases de planification privilégient la 4D, la 5D et la 8D, ainsi que l'approche LEAN, tandis que la 7D est appliquée lors de la phase de clôture. Chaque outil est spécifiquement dédié à une phase particulière du projet en fonction de son utilité, bien que certains puissent être utilisés dans d'autres phases. L'utilisation de chaque outil est déterminée par des critères pertinents. Voici comment les répondants à l'étude ont réparti leurs réponses :

Tableau 20 Détails des réponses obtenues pour la proposition 4.1

P4.1	Optimisation (Y2)																								
BIM (X1) Construction (Z)	Conception					Planification					Exécution					Surveillance et contrôle					Clôture				
	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort
Modélisation 3D	0	4	0	8	5																				
Modélisation 4D (Gestion temporelle)						0	3	4	7	5															
Modélisation 5D (Gestion de cout)						0	3	3	9	4															
Modélisation 6D (Dimension de Durabilité)	0	3	4	8	4																				
Modélisation 7D (Gestion des installations)																					0	3	6	7	4

P4.1	Optimisation (Y2)																								
BIM (XI) Construction (Z)	Conception					Planification					Exécution					Surveillance et contrôle					Clôture				
	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort
Modélisation 8D (Gestion de sécurité)						0	4	3	7	6															
Convergence Lean/BIM						0	0	6	7	4															
DAS (Évaluation de facilité de démontage)	0	0	9	7	3																				
BWPE (Outil d'évaluation des éléments structurelle)	0	0	8	8	3																				
ANFIS	0	0	1	6	4																				
Intelligence artificiel	0	0	4	7	5																				

4.7.1 Opinion sur l'intégration la 3D BIM pendant la phase de

Conception

Opinion sur l'intégration de la modélisation 3D BIM pendant la phase de Conception en vue d'améliorer l'optimisation de la gestion de projets de construction nous avons enregistré une prépondérance de 54,4% d'opinions favorables fort, et 27,3% exprimant un très fort degré d'adhésion. Ces chiffres témoignent d'une confirmation substantielle du soutien en faveur de cette proposition, même si 18,2% des participants ont émis une opinion modérément défavorable.

4.7.2 Opinion sur l'intégration de la 4D BIM pendant la phase de

Conception

L'intégration de la modélisation 4D BIM pendant la phase de Conception en vue d'améliorer l'optimisation de la gestion de projets de construction, nous avons enregistré une prédominance de 45,5% d'opinions fortes, 27,3% ont exprimé un degré élevé d'adhésion avec des avis très forts. En outre, 18,2% des participants ont manifesté une neutralité d'opinion, tandis que 9,1% ont émis une opinion modérément défavorable.

4.7.3 Opinion sur l'intégration de la 5D pendant la phase de Conception

L'intégration de la modélisation 5D BIM pendant la phase de Conception en vue d'améliorer l'optimisation de la gestion de projets de construction, nous avons enregistré une prédominance de 63.3% d'opinions fortes, 18.2% ont exprimé un degré élevé d'adhésion avec des avis très forts. En outre, 9.1% des participants ont manifesté une neutralité d'opinion, tandis que 9,1% ont émis une opinion modérément défavorable.

4.7.4 Opinion sur l'intégration de la 6D BIM pendant la phase de

Conception

L'intégration de la modélisation 6D BIM pendant la phase de Conception en vue d' améliorer l'optimisation de la gestion de projets de construction, nous avons enregistré une prédominance de 54.4% d'opinions fortes, 18.2% ont exprimé un degré élevé d'adhésion avec des avis très forts. En outre, 18.2% des participants ont manifesté une neutralité d'opinion, tandis que 9,1% ont émis une opinion modérément défavorable.

4.7.5 Opinion sur l'intégration de la 7D BIM pendant la phase de

Conception

L'intégration de la modélisation 7D BIM pendant la phase de Conception en vue d' améliorer l'optimisation de la gestion de projets de construction, nous avons enregistré une prédominance de 50% d'opinions fortes, 20% ont exprimé un degré élevé d'adhésion avec des avis très forts. En outre, 20% des participants ont manifesté une neutralité d'opinion, tandis que 10% ont émis une opinion modérément défavorable.

4.7.6 Opinion sur l'intégration de la 8D BIM pendant la phase de

Conception

L'intégration de la 8D BIM pendant la phase de Conception en vue d' améliorer l'optimisation de la gestion de projets de construction, nous avons enregistré une prédominance de 45.5% d'opinions fortes, 27.3% ont exprimé un degré élevé d'adhésion avec des avis très forts. En outre, 9.1% des participants ont manifesté une neutralité d'opinion, tandis que 18.2% ont émis une opinion modérément défavorable.

4.7.7 Opinion sur l'intégration de l'approche LEAN- BIM pendant la phase de Planification

L'intégration de l'approche LEAN- BIM pendant la phase de planification en vue d'améliorer l'optimisation de la gestion de projets de construction, nous avons enregistré une prédominance de 45.5% d'opinions fortes, 36.4% ont exprimé un degré élevé d'adhésion avec des avis très forts. En outre, 9.1% des participants ont manifesté une neutralité d'opinion, tandis que 9.1% ont émis une opinion modérément défavorable.

4.7.8 Opinion sur l'intégration BIM- DAS pendant la phase de Conception

L'intégration BIM- DAS pendant la phase de conception en vue d'améliorer l'optimisation de la gestion de projets de construction, nous avons enregistré une prédominance de 45.5% d'opinions fortes, 9.1% ont exprimé un degré élevé d'adhésion avec des avis très forts. En outre, 36.4% des participants ont manifesté une neutralité d'opinion et 9.1 % ne connaissent pas l'outil DAS.

4.7.9 Opinion sur l'intégration de l'outil BWPE pendant la phase de Conception

Sur l'intégration de l'outil BWPE pendant la phase de conception en vue d'améliorer l'optimisation de la gestion de projets de construction, nous avons enregistré une prédominance de 54.5% d'opinions fortes, 9.1% ont exprimé un degré élevé d'adhésion avec des avis très forts. En outre, 27.3% des participants ont manifesté une

neutralité d'opinion, tandis que 9.1% ne connaissent pas l'outil BWPE. Manifesté une neutralité d'opinion et 9.1 % ne connaissent pas l'outil DAS.

4.7.10. Opinion sur l'intégration de l'outil ANFIS pendant la phase de Conception

L'intégration de l'outil ANFIS pendant la phase de Conception en vue d'améliorer l'optimisation de la gestion de projets de construction, nous avons enregistré une prédominance de 36.4% d'opinions fortes, 18.2% ont exprimé un degré élevé d'adhésion avec des avis très forts. En outre, 27.3% des participants ont manifesté une neutralité d'opinion, tandis que 18.2% ne connaissent pas l'outil ANFIS.

4.7.11 Opinion sur l'intégration de l'IA pendant la phase de Conception

L'intégration de l'IA pendant la phase de Conception en vue d'améliorer l'optimisation de la gestion de projets de construction, nous avons enregistré une prédominance de 50% d'opinions fortes, 30% ont exprimé un degré élevé d'adhésion avec des avis très forts. En outre, 20% des participants ont manifesté une neutralité d'opinion.

L'histogramme reflétant les résultats du sondage sur l'implication du Building Information Modeling (BIM) dans les processus de gestion de projets de construction tout au long du cycle de vie du projet souligne des tendances significatives. Voici une analyse détaillée :

Modélisation 3D, 5D, et 8D : La modélisation 3D, 5D et 8D a obtenu un solide soutien, avec 13 avis favorables, dont la majorité était entre les avis forts et très forts. Cependant, la 5D et la 8D ont enregistré trois avis neutres chacune, indiquant un besoin potentiel de clarification ou d'information pour ces dimensions spécifiques.

Modélisation 4D, 6D, et Intelligence Artificielle : La modélisation 4D, 6D, et l'Intelligence Artificielle ont également reçu un fort soutien, chacune obtenant 12 avis favorables entre forts et très forts. Néanmoins, la modélisation 4D et 6D ont généré quelques avis neutres, suggérant une nécessité d'explication supplémentaire ou une compréhension accrue de ces dimensions.

Modélisation 7D, BWPE, et approche LEAN : La modélisation 7D, l'outil BWPE et l'approche LEAN ont obtenu 11 avis favorables entre forts et très forts. Toutefois, un nombre significatif d'avis neutres, respectivement 6, 6, et 8, ainsi que 3 avis faibles pour la modélisation 7D, indiquent un besoin potentiel de sensibilisation ou de clarification sur ces concepts.

Outil ANFIS et Outil DAS : Les outils ANFIS et DAS ont généré un niveau modéré de soutien, avec 10 avis favorables pour chaque outil. Cependant, le nombre élevé d'avis neutres (9 et 11 respectivement) suggère un manque d'informations ou une compréhension insuffisante de ces outils spécifiques.

En conclusion, l'histogramme met en évidence une forte adhésion à plusieurs dimensions du BIM, mais révèle également des zones où des explications supplémentaires ou une sensibilisation pourraient renforcer le soutien. Les dimensions 5D, 8D, et les outils ANFIS et DAS semblent nécessiter une attention particulière pour améliorer la compréhension et l'acceptation au sein de la communauté sondée.

4.8 ÉVALUATION DE LA PROPOSITION 4.2

La proposition P4.2 traite de l'influence du Jumeau numérique sur l'optimisation tout au long des phases d'un projet de construction, dans le cadre des processus de gestion de projet. Chaque outil est principalement appliqué à une étape spécifique du cycle de vie du projet. Les résultats de l'étude démontrent comment les répondants ont réparti leurs réponses en fonction des questions spécifiques pour chaque outil, en lien avec les conclusions des recherches récentes et les approbations mentionnées dans la revue de littérature présentée au chapitre 2. Chaque outil est majoritairement utilisé dans une étape précise du cycle de vie du projet, débutant par l'outil HVAC, suivie de l'intelligence artificielle, du Chat Bot, les neurone artificielle et les code QR ainsi que l'apprentissage automatique lors de la phase de conception. Les phases d'exécution privilégient les capteurs et dispositif IOT, les scanner 3D ainsi que les drones UAV, tandis que l'entretien prédictif est appliqué lors de la phase de surveillance et contrôle. Chaque outil est spécifiquement dédié à une phase particulière du projet en fonction de son utilité, bien que certains puissent être utilisés dans d'autres phases. L'utilisation de chaque outil est déterminée par des critères pertinents. Voici comment les répondants à l'étude ont réparti leurs réponses :

P4.2	Optimisation (Y2)																								
Jumeau numérique s(X2) Construction (Z)	Conception					Planification					Exécution					Surveillance et contrôle					Clôture				
	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort	Très faible	Faible	Neutre	Fort	Très fort
Neurone artificiel et code QR	0	3	6	5	4																				
Chatbot	0	3	6	5	4																				
Drone UAV										3	0	4	8	3											

4.8.1 Opinion sur l'implication de l'outil HVAC avec le Jumeau numérique pendant la phase de conception et planification

L'implication de l'outil HVAC (Chauffage, climatisation, ventilation) avec le Jumeau numérique pendant la phase de conception et planification au sein des processus de gestion de projets de construction en vue d'améliorer l'optimisation, nous avons enregistré une prédominance de 40% d'opinions fortes, 20% ont exprimé un degré élevé d'adhésion avec des avis très forts. En outre, 40% des participants ont manifesté une neutralité.

4.8.2. Opinion sur l'implication de IoT avec le JN pendant la phase d'exécution et de surveillance

L'implication de Capteur et dispositif IoT avec le Jumeau numérique pendant la phase d'exécution et de surveillance au sein des processus de gestion de projets de construction en vue d'avoir une optimisation significative, nous avons observé une majorité de 54,5% d'opinions favorables, avec 9,1% ont exprimé un fort degré d'adhésion avec des avis très forts. Parallèlement, 27,3% des participants ont adopté une position neutre, tandis que 9,1% ont manifesté un avis moins favorable (faible).

4.8.3 Opinion sur l'implication d'apprentissage automatique avec le Jumeau numérique pendant la phase de conception

L'implication d'Apprentissage automatique avec le Jumeau numérique en phase de conception et pendant tout au long du projet au sein des processus de gestion de projets

de construction en vue d'avoir une optimisation significative, nous avons enregistré une majorité de 54,5% d'opinions favorables, avec 9,1% ont exprimé un fort degré d'adhésion avec des avis très forts. Parallèlement, 36.4% des participants ont adopté une position neutre.

4.8.4 Opinion sur l'implication de l'IA avec le Jumeau numérique pendant la phase de conception

L'implication de l'intelligence artificielle avec le Jumeau numérique tout au long du projet au sein des processus de gestion de projets de construction en vue d'avoir une optimisation significative, nous avons enregistré une majorité de 40% d'opinions favorables, avec 20% ont exprimé un fort degré d'adhésion avec des avis très forts. Parallèlement, 40% des participants ont adopté une position neutre.

4.8.5 Opinion sur l'implication de l'entretien préventif avec le Jumeau numérique

L'implication de l'entretien préventif avec le Jumeau numérique tout pendant la phase surveillance et contrôle au sein des processus de gestion de projets de construction en vue d'avoir une optimisation significative, nous avons enregistré une majorité de 54.4% d'opinions favorables, avec 18.2% ont exprimé un fort degré d'adhésion avec des avis très forts. Parallèlement, 18.2% des participants ont adopté une position neutre, tandis que 9.1% ont signalé un avis très faible.

4.8.6. Opinion sur l'implication de scanner 3D avec le JN pendant la phase conception et exécution

L'implication de scanner 3D avec le JN pendant la phase conception et exécution au sein des processus de gestion de projets de construction en vue d'avoir une optimisation significative, nous avons enregistré une majorité de 60% d'opinions favorables, 20% ont exprimé un fort degré d'adhésion avec des avis très forts. Parallèlement, 10% des participants ont adopté une position neutre, tandis que 10% ont signalé un avis très faible.

4.8.7 Opinion sur l'implication de neurones artificielles et du code QR avec le JN pendant la phase de conception

L'implication de neurones artificielles et du code QR avec le Jumeau numérique pendant la phase de conception et tout le long d'un projet au sein des processus de gestion de projets de construction en vue d'avoir une optimisation significative, nous avons enregistré une majorité de 30% d'opinions favorables, 20% ont exprimé un fort degré d'adhésion avec des avis très forts. Parallèlement, 40% des participants ont adopté une position neutre, tandis que 10% ont signalé un avis faible.

4.8.8 Opinion sur l'implication de Chat bot avec le Jumeau numérique pendant la phase surveillance et contrôle

Sur l'implication de Chat bot avec le Jumeau numérique pendant la phase surveillance et contrôle au sein des processus de gestion de projets de construction en vue d'avoir une optimisation significative, nous avons enregistré une majorité de 30%

d'opinions favorables, 20% ont exprimé un fort degré d'adhésion avec des avis très forts. Parallèlement, 40% des participants ont adopté une position neutre, tandis que 10% ont signalé un avis faible.

4.8.9 Opinion sur l'implication de drone UAV avec la JN pendant la phase de conception d'exécution, de surveillance et contrôle

L'implication de drone UAV avec le Jumeau numérique tout pendant la phase de conception d'exécution, de surveillance et contrôle au sein des processus de gestion de projets de construction en vue d'avoir une optimisation significative, nous avons enregistré une majorité de 60% d'opinions favorables, 10% ont exprimé un fort degré d'adhésion avec des avis très forts. Parallèlement, 20% des participants ont adopté une position neutre, tandis que 10% ont signalé un avis très faible.

4.8.10 Opinion sur l'implication de ANFIS (Outil de signalisation des déchets de la construction) avec la JN pendant la phase de conception et planification

L'implication de ANFIS (Outil de signalisation des déchets de la construction) avec le Jumeau numérique pendant la phase de conception et planification au sein des processus de gestion de projets de construction en vue d'avoir une optimisation significative, nous avons enregistré une majorité de 40% d'opinions favorables, 10% ont exprimé un fort degré d'adhésion avec des avis très forts. Parallèlement, 30% des participants ont adopté une position neutre, 10% ne connaissent pas l'outil ANFIS, tandis que 10% ont signalé un avis très faible.

L'histogramme représentant les résultats du sondage sur l'implication du Jumeau numérique dans les processus de gestion de projets de construction révèle des tendances significatives. Voici une analyse détaillée :

Entretien prédictif et Scanner 3D : L'entretien prédictif dans la phase de surveillance et contrôle, ainsi que le scanner 3D dans la phase d'exécution, ont suscité un solide soutien avec 11 avis favorables entre forts et très forts. Cependant, des nuances apparaissent avec trois avis neutres pour chacun, et trois avis très faibles spécifiquement pour le scanner 3D. Cela suggère la nécessité d'une clarification ou d'une information supplémentaire sur cet outil.

Modélisation HVAC, Capteurs et dispositifs IoT, Apprentissage automatique, et Drones UAV : La modélisation HVAC, les capteurs et dispositifs IoT, l'apprentissage automatique, ainsi que les drones UAV ont tous reçu 11 avis favorables entre forts et très forts. Toutefois, des avis neutres (6 pour chacun) indiquent une certaine réserve ou un besoin potentiel de plus d'informations. Des avis faibles, notamment trois très faibles pour les drones UAV et trois faibles pour les capteurs et dispositifs IoT, soulignent des zones où une sensibilisation accrue pourrait être bénéfique.

Intelligence artificielle (IA), Chat bot, Neurone artificielle avec code QR : L'IA, le chat bot, et le neurone artificiel avec code QR ont reçu 9 avis favorables entre forts et très forts. Cependant, des avis neutres (6 pour chacun) suggèrent un besoin potentiel de clarification ou de sensibilisation sur ces outils spécifiques. Trois avis faibles, notamment pour le chat bot et le neurone artificiel avec code QR, soulignent une zone où une compréhension accrue pourrait être bénéfique.

En somme, bien que le Jumeau numérique bénéficie d'un soutien généralisé, des variations dans les niveaux d'avis neutres et faibles indiquent des opportunités d'amélioration de la compréhension ou de la communication.

CHAPITRE 5 - CONCLUSION ET CONTRIBUTION ENVISAGÉE

Au travers notre recherche on a pu conclure que l'avenir de l'industrie AEC repose sur l'adoption de technologies innovantes en raison de la rapide transformation numérique de ce secteur. En explorant de nouvelles solutions, favorisant ainsi un environnement de travail à distance productif. Tout au long du cycle de vie d'un projet, depuis la conception jusqu'à la gestion, l'introduction de technologies innovantes repoussera les frontières de l'industrie AEC, générant de nouvelles idées et solutions pour chaque étape. Que ce soit l'optimisation du processus de conception, l'automatisation des tâches de construction, l'évaluation des risques pour les travailleurs, le fonctionnement efficace d'un projet sur l'ensemble de son cycle de vie ou la mise en œuvre de processus de démolition respectueux de l'environnement, les technologies numériques seront des atouts majeurs pour tous les acteurs du secteur AEC. Dans le cadre de notre étude, nous avons principalement examiné deux technologies novatrices, à savoir le BIM et les jumeaux numériques, tout en intégrant 20 autres outils et approches émergents, y compris l'intelligence artificielle en vue d'avoir une efficacité énergétique et opérationnelle et une optimisation significative au sein de nos projets de construction. Les résultats obtenus ainsi que les objectifs visés pour chaque technologie sont présentés ci-dessous, soulignant leur potentiel révolutionnaire dans le secteur AEC au cours de la prochaine décennie.

Conclusions	Réponses aux questions de recherche (QR)	Détails des réponses aux questions de recherche	Atteinte des objectifs (O)
<p>O1.1 BIM(X1) > Efficacité (opérationnel et énergétique) (Y1).</p> <p>QR1.1 Comment le BIM, peut être intégrées de manière optimale dans les projets de construction durable pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental ?</p> <p>P1.1 Partiellement confirmée</p>	<p>L'intégration des concepts, méthodes, outils BIM avec d'autre approches technologiques peut améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental</p>	<p>Convergence BIM 3D : Confirmée Convergence BIM 4D : Confirmée. Convergence BIM 5D : Confirmée Convergence BIM 6D : Confirmée Convergence BIM 7D : Confirmée Convergence BIM 8D : Confirmée L'intégration LEAN/BIM : confirmée L'approche DAS : Partiellement confirmée L'outil BWPE : Partiellement confirmée L'outil ANFIS : Confirmé L'intégration BIM avec l'intelligence artificielle : Confirmée</p>	<p>L'objectif visant à démontrer l'intégration des approches et des outils BIM avec d'autres technologies numériques pour atteindre une efficacité énergétique et opérationnelle a été réalisé.</p>
<p>O1.2 J.N > Efficacité (opérationnel et énergétique). Construction>BIM> Efficacité</p> <p>QR1.2 Comment les Jumeaux numériques peuvent-ils être appliqués de manière efficace pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental ?</p>	<p>L'utilisation des concepts, méthodes, techniques et outils du Jumeau numérique peut améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental.</p>	<p>L'intégration du J.N avec l'outil HVAC : Confirmé</p> <p>IOT avec Jumeau numérique: Confirmé Apprentissage automatique algorithmique : Confirmé Intelligence artificielle : Confirmé L'entretien Prédicatif : Confirmé Scanner 3D : Confirmé Neurones artificielle et code QR : partiellement confirmé Chat bot : Partiellement confirmé Drone : Partiellement confirmé</p>	<p>L'objectif visant à démontrer l'intégration des approches et des outils Jumeaux numériques avec d'autres technologies numériques pour atteindre une efficacité énergétique et opérationnelle a été réalisé.</p>

Conclusions	Réponses aux questions de recherche (QR)	Détails des réponses aux questions de recherche	Atteinte des objectifs (O)
P1.2 Partiellement confirmée		Robotique : Partiellement confirmé Exosquelette : Partiellement confirmé L'analyse des données avancées : Partiellement confirmé L'automatisation des tâches : partiellement confirmé	
O2.1-BIM > Optimisation QR2.1 Comment mettre en œuvre efficacement l'utilisation du BIM afin d'assurer une optimisation significative P2.1 Partiellement confirmée	L'intégration du BIM avec l'IA et d'autres technologies émergentes peut garantir une optimisation technique significative.	BIM avec l'outil PSS : confirmée. Autodesk Revit : confirmée Autodesk insight 360° : confirmée Approche décisionnel BIM écologie : Confirmé La Block chaîne : moyennement confirmé L'intelligence artificielle : Confirmé	L'objectif visant à démontrer l'intégration des approches et des outils BIM avec d'autres technologies numériques pour atteindre une optimisation significative a été réalisé.
O2.2-J.N>Optimisation QR2.2 Comment peut-on exploiter efficacement les jumeaux numériques afin de parvenir à une optimisation substantielle ?	L'intégration des jumeaux numériques avec l'IA et d'autres technologies émergentes peut conduire à une optimisation technique de grande envergure.	Jumeau numérique avec l'interface utilisateur : confirmé. Caméra thermique et capteurs environnementaux : Confirmé L'algorithme d'apprentissage : Confirmé L'intelligence artificielle : Confirmé La J.N avec l'espace de travail interactif : confirmé La modélisation prédictif : confirmé	L'objectif visant à démontrer l'intégration des approches et des outils Jumeaux numériques avec d'autres technologies numériques pour atteindre une optimisation

Conclusions	Réponses aux questions de recherche (QR)	Détails des réponses aux questions de recherche	Atteinte des objectifs (O)
P2.2 confirmée			significative a été réalisé.
<p>O3.1- Construction>BIM>Efficacité</p> <p>Q3.1 En quoi et Comment les projets de construction et les entreprises de construction utilisent-elles effectivement les modèles d'information sur les bâtiments (BIM) pour améliorer l'efficacité dans leurs projets de construction ?</p> <p>P3.1 confirmée</p>	L'implication du BIM au sein des processus de gestion de projets de construction tout au long du cycle de vie d'un projet de construction améliore son l'efficacité.	BIM 3D en phase de conception : confirmé BIM 4D en phase de planification : Confirmé BIM 5D en phase de planification : Confirmé BIM 6D en phase de conception : Confirmé BIM 7D en phase de conception : Confirmé BIM 8D en phase de conception : confirmé LEAN/BIM en phase de clôture : Confirmé Convergence DAS/BIM en phase de conception : Confirmée Convergence BWPE/ BIM en phase de conception : Confirmée Convergence ANFIS/ BIM en phase de conception : Confirmée intelligence artificielle en phase de conception : Confirmée	L'objectif visant à démontrer l'intégration des approches et des outils BIM avec d'autres technologies numériques au sein des phases de projet de construction et au processus de gestion pour atteindre une efficacité opérationnelle et énergétique a été réalisé.

Conclusions	Réponses aux questions de recherche (QR)	Détails des réponses aux questions de recherche	Atteinte des objectifs (O)
<p>O3.2-Construction>J.N>Efficacité</p> <p>QR3.2 Comment l'intégration des jumeaux numériques dans la gestion de projet de construction impacte-t-elle l'efficacité opérationnelle, les coûts et la qualité des projets ainsi que l'efficacité énergétique dans les projets de construction, les entreprises de construction, y compris PME ?</p> <p>P3.2 Partiellement confirmée</p>	<p>L'implication du J.N au sein des projets de construction rationalise la planification, la conception, la gestion de projet et améliore l'efficacité opérationnel et énergétique.</p>	<p>Outil HVAC en phase de conception : Confirmé Capteur et dispositif IOT en phase d'exécution : Confirmé Apprentissage automatique en phase de conception : Confirmé Intelligence artificielle ne phase de conception : Confirmé Entretien prédictif en phase de surveillance et contrôle : Confirmé .Scan 3D en phase de conception : Confirmé Neurone artificielle en phase de conception : Confirmé Chat bot en phase de surveillance et contrôle : partiellement Confirmé Drone UAV ne phase de conception : Confirmé Outil ANFIS en phase de conception : partiellement confirmé</p>	<p>L'objectif visant à démontrer l'intégration des approches et des outils Jumeaux numériques avec d'autres technologies numériques au sein des phases de projet de construction et au processus de gestion pour atteindre une efficacité opérationnelle et énergétique a été réalisé.</p>
<p>O4.1-Construction>BIM>Optimisation</p> <p>QR4.1 Comment opérer l'optimisation du Building Information Modeling (BIM), au sein des processus de gestion de projets de construction tout au long du cycle de vie d'un</p>	<p>L'implémentation BIM et l'adoption de technologie convergente tout en intégrant des pratiques de construction 5.0 contribuent à une optimisation dans la gestion des projets de tout au long du cycle de vie d'un projet de construction.</p>	<p>Modélisation 3D en phase de conception : Confirmée Modélisation 4D en phase de planification : Confirmée Modélisation 5D en phase de planification : Confirmée Modélisation 6D en phase de conception : Confirmée Modélisation 7D en phase de clôture : Confirmée Modélisation 8D en phase planification : Confirmée</p>	<p>L'objectif visant à démontrer des approches et des outils BIM avec d'autres technologies numériques au sein des phases de projet de construction et au processus de gestion pour atteindre une optimisation</p>

Conclusions	Réponses aux questions de recherche (QR)	Détails des réponses aux questions de recherche	Atteinte des objectifs (O)
<p>projet de construction, de la conception à la démolition ?</p> <p>P4.1 Confirmée</p>		<p>LEAN/BIM en phase de planification : Confirmée</p> <p>DAS/BIM en phase de conception : Confirmée</p> <p>BWPE/BIM en phase de conception : Confirmé</p> <p>ANFIS/BIM en phase de conception : Confirmée</p> <p>Intelligence artificielle tout le long des processus d'un projet : Confirmée</p>	<p>significative a été réalisé</p>
<p>O4.2- Construction>J.N>Optimisation</p> <p>QR4.2 Quelles sont les meilleures pratiques d'intégration des Jumeaux numériques dans l'industrie de construction pour qu'ils puissent s'adapter aux besoins changeants des projets de construction ?</p> <p>P4.2 Confirmée</p>	<p>L'implémentation J.N et l'adoption de technologie convergente tout en intégrant des pratiques de construction 5.0, contribuent à une gestion optimale au sein des projet et des entreprises de construction</p>	<p>Outil HVAC en phase de conception : Confirmé</p> <p>Capteur et dispositif IOT en phase d'exécution : Confirmé</p> <p>Apprentissage automatique en phase de conception : Confirmé</p> <p>Intelligence artificielle tout le long du projet : Confirmé</p> <p>Entretien prédictif en phase de surveillance et contrôle : Confirmé</p> <p>Scanner 3D en phase d'exécution : Confirmé</p> <p>Neurone artificielle et code QR en phase conception : Confirmé</p> <p>Chat Bot en phase de conception : Confirmé</p> <p>Drone UAV en phase d'exécution : Confirmé</p> <p>ANFIS en phase de conception : Confirmé</p>	<p>L'objectif visant à démontrer l'intégration des approches et des outils Jumeaux numériques avec d'autres technologies numériques au sein des phases de projet de construction et au processus de gestion pour atteindre une optimisation significative a été réalisé</p>

5.1 CONTRIBUTION MANAGERIALE

Les propositions 1.1 et 1.2 de notre étude, qui traitent de l'impact du BIM et des jumeaux numériques sur l'efficacité énergétique et opérationnelle des projets, se concentrent principalement sur une contribution managériale en gestion de projet. Ces propositions abordent des problématiques auxquelles les chefs de projet sont quotidiennement confrontés, visant ainsi à améliorer la gestion des projets de construction par le biais de la digitalisation de leurs processus, tant sur le plan opérationnel qu'énergétique. Ce faisant, elles cherchent à relever les défis environnementaux tout en respectant les objectifs de coût, de qualité et de délais associés aux projets. La confirmation des propositions 1.1 et 1.2 pourrait guider les dirigeants de projet de savoir utiliser chaque technologie numérique pour améliorer l'efficacité énergétique et opérationnelle des projets de construction.

Les propositions 2.1 et 2.2 de notre étude, explorant l'influence du BIM et des jumeaux numériques sur l'optimisation technique significative des projets, se focalisent principalement sur une contribution managériale dans le domaine de la gestion de projet. Ces propositions abordent des problématiques quotidiennes auxquelles les chefs de projet sont confrontés, cherchant à améliorer la gestion des projets de construction par le biais de la digitalisation des processus. Elles se penchent spécifiquement sur les outils précis qui facilitent l'amélioration de l'optimisation des projets, tout en mettant en évidence leur convergence avec le BIM et les jumeaux numériques. La validation des propositions 2.1 et 2.2 pourrait orienter les responsables de projet d'adopter chaque technologie numérique afin d'optimiser la gestion de leurs projets de construction.

Les propositions 3.1 et 3.2 de notre recherche, se penchant sur l'influence du BIM et des jumeaux numériques sur l'efficacité énergétique et opérationnelle des projets à travers les processus de gestion de projets de construction sur l'ensemble du cycle de vie,

mettent principalement l'accent sur une contribution managériale dans le domaine de la gestion de projet. Ces propositions examinent les problématiques quotidiennes auxquelles font face les chefs de projet, avec pour objectif d'améliorer la gestion des projets de construction grâce à la digitalisation des processus, en appliquant des outils technologiques pertinents tant sur le plan opérationnel qu'énergétique à chaque étape du projet. Ce faisant, elles aspirent à relever les défis environnementaux tout en respectant les objectifs de coût, de qualité et de délais associés aux projets. La validation des propositions 3.1 et 3.2 pourrait orienter les leaders de projet quant à la pertinence et au moment propice d'adopter chaque technologie numérique en vue d'améliorer l'efficacité énergétique et opérationnelle des projets de construction.

Les propositions 4.1 et 4.2 de notre recherche, explorant l'influence du BIM et des jumeaux numériques sur l'optimisation technique significative des projets, se concentrent principalement sur une contribution managériale au sein des processus de gestion de projets de construction sur l'ensemble du cycle de vie d'un projet. Ces propositions abordent des problématiques spécifiques auxquelles les chefs de projet font face, visant à améliorer la gestion des projets de construction par le biais de la digitalisation des processus à chaque étape précise. Elles se penchent particulièrement sur les outils spécifiques facilitant l'amélioration de l'optimisation des projets, tout en soulignant leur alignement avec le BIM et les jumeaux numériques. La validation des propositions 4.1 et 4.2 pourrait guider les responsables de projet quant à la pertinence et au moment propice d'adopter chaque technologie numérique afin d'optimiser la gestion de leurs projets de construction à chaque étape du cycle de vie.

5.2 CONTRIBUTION THÉORIQUE

Notre travail a abordé plusieurs convergences technologiques liées au BIM et au Jumeau numérique. Par la suite, nous avons entrepris de sélectionner le plus grand nombre

des derniers outils et approches liés au BIM et au Jumeau numérique, cherchant à comprendre les mécanismes et les dynamiques sous-jacentes pour appréhender leur interaction à chaque étape et au sein des processus de gestion de nos projets. Les contributions théoriques de notre recherche se situent principalement dans les propositions 3.1-3.2, où la relation entre le BIM et l'efficacité énergétique et opérationnelle, ainsi que la relation entre le Jumeau numérique et l'efficacité opérationnelle et énergétique, ont été développées à travers l'impact de chaque outil sur une étape différente. Cela inclut des explications théoriques sur l'interrelation des phases et des outils. De même, dans les propositions 4.1-4.2, la relation entre le BIM et l'optimisation, ainsi que la relation entre le Jumeau numérique et l'optimisation, a été développée à travers l'impact de chaque outil sur une étape différente, accompagnée d'explications théoriques sur l'interrelation des phases et des outils en lien avec l'optimisation d'un projet de construction.

5.3 LIMITES DE RECHERCHE

Cette recherche abductive, menée sur une période temporelle transversale, limité à 20 répondant sur le Survey accorder à la recherche qualitative présente plusieurs limites méthodologiques et interprétatives.

Un échantillon aussi restreint peut ne pas être représentatif des professionnel cibles, limitant ainsi la généralisation des résultats à un niveau plus large, la diversité des caractéristiques individuelles, des contextes et des expériences peut être insuffisante, compromettant la validité externe des conclusions. Aussi les résultats peuvent être sensibles aux variations individuelles dans un petit échantillon, ce qui peut conduire à des conclusions moins fiables.

Ensuite une période temporelle très courte peut rendre difficile la détection de tendances significatives ou de changements substantiels au fil du temps. Une recherche

temporelle transversale ne permet généralement pas de capturer pleinement l'évolution des phénomènes au fil du temps, limitant ainsi la compréhension des dynamiques temporelles complexes.

Enfin avec un échantillon aussi réduit, la capacité à détecter des effets statistiquement significatifs peut être limitée, ce qui peut compromettre la robustesse des conclusions dont la confirmation ou le rejet des propositions d'analyse peut être entravé par le nombre limité de participants, rendant les résultats moins fiables et généralisables.

Cette recherche donc offre seulement une vision momentanée, dont la validité est limitée compte tenu de la croissance exponentielle des publications dans le domaine de l'Industrie 4.0 et 5.0. Par conséquent, des études de suivi sont nécessaires pour examiner l'évolution des tendances au fil du temps.

5.4 ORIENTATION FUTURE

Cette étude a entrepris une collecte exhaustive des technologies numériques, englobant 20 outils et approches ainsi que les technologies sous-jacentes émergentes, les classant en relation avec les concepts de jumeau numérique et de Modélisation des Informations du Bâtiment (BIM). Ces deux dernières sont identifiées comme les évolutions majeures dans l'industrie de la construction 4.0 et 5.0. L'objectif était de démontrer leur impact sur l'efficacité opérationnelle et énergétique des projets de construction tout au long de leur cycle de vie, ainsi que pendant les processus de gestion de ces projets.

L'analyse a souligné la nécessité d'approfondir la recherche dans l'ensemble des technologies numériques dont le secteur de la construction peut bénéficier. L'avenir de la construction réside dans l'intégration de technologies telles que les données (JN), le BIM,

l'intelligence artificielle (IA), la technologie de la blockchain (BCT) et la réalité virtuelle (VR) et bien plusieurs d'autre. Générant ainsi une convergence propice à de nouvelles combinaisons innovantes.

Les technologies convergentes, lorsqu'elles sont connectées à une base de données, sont en mesure de répondre aux besoins climatiques et de renforcer la résilience dans le domaine de la construction. Leur optimisation exige une exploration approfondie dans la littérature afin de maximiser leur intégration, en mettant en évidence leur impact sur d'autres critères de réussite des projets et la réalisation de bénéfices économiques et environnementaux.

Cette démarche s'inscrit dans le contexte de l'industrie 4.0, visant à assurer le développement d'une ère de construction 5.0 caractérisée par des interactions sécurisées, efficaces et intuitives entre les robots et les travailleurs dans les environnements de construction. Actuellement à un stade principalement expérimental, l'utilisation de robots interactifs dans la construction incite à élargir le concept de Construction 5.0 au-delà de son cadre initial, en intégrant d'autres technologies et applications pour influencer positivement le bien-être des travailleurs et les objectifs de durabilité du secteur de la construction.

BIBLIOGRAPHIE

Aaltonen, I., Salmi, T., & Marstio, I. (2019). Affiner les niveaux de collaboration pour soutenir la conception et l'évaluation de l'interaction homme-robot dans l'industrie manufacturière. *Procedia Manufacturing*, 38, 1151–1158, .
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.204>

Abioye, S.O., Oyedele, L.O., Akanbi, L., Ajayi, A., Delgado, J.M.D., Bilal, M., Akinade, O.O., & Ahmed, A. (2021). L'intelligence artificielle dans l'industrie de la construction : un examen de la situation actuelle, des opportunités et des défis futurs. *Journal of Building Engineering*, 103299. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103299>

Abiteboul, S., & Viéville, T. (2018, 16 juillet). La naissance du numérique (en ligne) *Binaire de publication du monde fr*
<https://www.lemonde.fr/blog/binaire/2018/07/16/la-naissance-du-numerique/.ET>

Abiteboul, S., & Viéville, T. (2018, July 16). La naissance du numérique. Le blog binaire du Monde. <https://www.lemonde.fr/blog/binaire/2018/07/16/la-naissance-du-numerique/> (consulté le 05 janvier 2023).

Adams, K. T., Osmani, M., Thorpe, T., & Thornback, J. (2017). Économie circulaire dans la construction : sensibilisation actuelle, défis et catalyseurs. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management*, 170, 15–24.
<https://doi.org/10.1680/jwarm.16.00011>

Aghimien, D. O., Aigbavboa, C. O., Ok, A. E., & Thwala, W. D. (2020). Cartographie des axes de recherche pour la recherche en robotique et en automatisation

dans les études liées à la construction : une approche bibliométrique. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 18, 1063-1079.

Agostinelli, S., Cumo, F., Guidi, G., & Tomazzoli, C. (2021). Systèmes cyber-physiques améliorant la gestion énergétique des bâtiments : jumeau numérique et intelligence artificielle. *Énergies*, 14, 2338. <https://doi.org/10.3390/en14082338>

Ahmad, T. (2023). Facteurs de succès du bâtiment écologique : une enquête exploratoire. *Journal of Environmental Building Engineering*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107136>

Akanbi, L.A.; Oyedele, L.O.; Omoteso, K.; Bilal, M.; Akinade, O.O.; Ajayi, A.O.; Delgado, J.M.D.; Owolabi, H.A. Disassembly and Deconstruction Analytics System (D-DAS) for Construction in a Circular Economy. *J. Clean. Prod.* **2019**, 223, 386–396

Akanmu, A. A., Anumba, C. J., & Ogunseiju, O. O. (2021). Vers des systèmes cyber-physiques de nouvelle génération et des jumeaux numériques pour la construction. *Journal of Information Technology in Construction*, 26, 505–525. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.027>

Åkerman, M., Humalisto, N., & Pitzen, S. (2020). Material Politics in the Circular Economy: The Complicated Journey from Manure Surplus to Resource. *Geoforum*, 116, 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2020.07.013>

Akinade, O. O., & Oyedele, L. O. (2019). Integrating Construction Supply Chains within a Circular Economy: An ANFIS-Based Waste Analytics System (A-WAS). *Journal of Cleaner Production*, 229, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.232>

Akinade, O. O., Oyedele, L. O., Ajayi, S. O., Bilal, M., Alaka, H. A., Owolabi, H. A., Bello, S. A., Jaiyeoba, B. E., & Kadiri, K. O. (2017). Design for Deconstruction (DfD): Facteurs critiques de succès pour détourner les déchets en fin de vie des décharges. *Gestion des déchets*, 60, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.084>

Akinade, O., Oyedele, L., Oyedele, A., Delgado, J. M. D., Bilal, M., Akanbi, L., Ajayi, A., & Owolabi, H. (2020). Conception pour la déconstruction à l'aide d'une approche d'économie circulaire : Obstacles et stratégies d'amélioration. *Production Planning & Control* 31, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103299>

Akundi, A., Euresti, D., Luna, S., Ankobiah, W., Lopes, A., & Edinbarough, I. (2022). État de l'industrie 5.0 — Analyse et identification des tendances actuelles de la recherche. *Applied System Innovation*, 5, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1562>

Alaloul, W. S., Qureshi, A. H., Musarat, M. A., & Saad, S. (2021). Évolution des technologies de détection à courte portée et d'acquisition de données vers l'automatisation de la surveillance de l'avancement de la construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 43, 102877. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.102042>

Alasmari, E., Vazquez, P. M., & Baniotopoulos, C. (2022). Modélisation des informations du bâtiment (BIM) vers une conception de bâtiment durable : une enquête. Dans *Actes du CESARE22, 3e ingénierie de coordination pour la durabilité et la résilience*, Irbid, Jordanie, 6-9 mai 2022 (pp. 6–9). <https://doi.org/10.3390/buildings13071858>

Alizadehsalehi, S., Hadavi, A., & Huang, J. C. (2020). From BIM to Extended Reality in AEC Industry. *Automation in Construction*, 116, 103254. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103254>

AlJaber, A., Alasmari, E., Martinez-Vazquez, P., & Baniotopoulos, C. (2023). Coût du cycle de vie dans l'économie circulaire des bâtiments en appliquant la modélisation des informations du bâtiment (BIM) : un état de l'art. *Buildings*, 13, 1858. <https://doi.org/10.3390/buildings13071858>

Almatared, M., Liu, H., Tang, S., Sulaiman, M., Lei, Z., & Li, H. X. (2022). Digital Twins dans l'architecture. *Ingénierie et industrie de la construction: une revue bibliométrique*. *Constr. Rés. Congr.*, 2022, 670–678. DOI: [10.1061/9780784483961.070](https://doi.org/10.1061/9780784483961.070)

Andrade, B. S., & Amorim, S. R. L. (2011). Methodological Changes in Project Process Management Applied with the Use of BIM Software. Paper presented at the 2nd Brazilian Symposium on Project Quality in the Built Environment and the 10th Brazilian Workshop on Project Process Management in Building Construction, Rio de Janeiro. *Vol. 4, n° 2*

Aranda, G., Crawford, J., Chevez, A., & Froese, T. (2009). La modélisation des informations du bâtiment démystifiée : est-il judicieux d'adopter le BIM ? *International Journal of Managing Projects in Business*, 16(2), 419–34. <https://doi.org/10.1108/17538370910971063>

Armenia, S., Dangelico, R. M., Nonino, F., & Alessandro, P. (2019). Gestion de projet durable : un examen axé sur la conceptualisation et une proposition de cadre pour les études futures. *Durabilité*, 11(9), 2664. <https://doi.org/10.3390/su11092664>

Arowoia, V. A., Moehler, R. C., & Fang, Y. (2023). Technologie jumelle numérique pour le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments : état de l'art et orientations futures. *Énergie et environnement bâti*. Département de génie civil,

Monash University Clayton, VIC 3800, Australie.
<https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.05.004>.

Arsiwala, A., Elghaish, F., & Zoher, M. (2023). Jumeau numérique avec apprentissage automatique pour la surveillance prédictive du CO2 équivalent des bâtiments existants. *Construction de l'énergie*, 284, 112851.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112851>.

Aryal, A., & Becerik-Gerber, B. (2019, August). Une étude comparative de la prédiction de la sensation thermique individuelle et de la satisfaction à l'aide d'un capteur de température porté au poignet, d'une caméra thermique et d'un capteur de température ambiante. *Building and Environment*, 160, 106223.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106223>

Askar, R., Bragança, L., & Gervásio, H. (2021). Adaptability of Buildings: A Critical Review on the Concept Evolution. *Applied Sciences*, 11(10), 4483.
<https://doi.org/10.3390/app11104483>.

Askar, R., Bragança, L., & Gervásio, H. (2022). Design for Adaptability (DfA)— Frameworks and Assessment Models for Enhanced Circularity in Buildings. *Applied System Innovation*, 5, 24. <https://doi.org/10.3390/app11104483>

Attaran, M., & Celik, B. G. (2023). Digital Twins: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal*, 6, 100165.
<https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165>

Azhar, S. (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. *Leadership & Management in Engineering*, 11, 241-252. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127)

Azhar, S., Nadeem, A., Mok, J. Y., & Leung, B. H. (2016). Modélisation des informations du bâtiment (BIM) : un nouveau paradigme pour la modélisation et la simulation interactives visuelles pour les projets de construction. Dans *Actes de la première conférence internationale sur la construction dans les pays en développement, Karachi, Pakistan, 4-5 août 2008* (Volume 1, pp. 435–446). *Open Journal of Energy Efficiency*, 5(3), 9. <https://doi.org/10.4236/ojee.2016.53009>

Baduge, Sask., Thilakarathna, S., Perera, J. S., Arashpour, M., Sharafi, P., Teodosio, B., Shringi, A., & Mendis, P. (2022). Intelligence artificielle et vision intelligente pour le bâtiment et la construction 4.0 : méthodes et applications d'apprentissage automatique et profond. *Automation in Construction*, 141, 104440. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104440>

Barann, B., Hermann, A., Cordes, A.-K., Chasin, F., & Becker, J. (2019). Supporting Digital Transformation in Small and Medium-sized Enterprises: A Procedure Model Involving Publicly Funded Support Units. Université de Muenster – ERCIS. <https://hdl.handle.net/10125/59935>

Bavafa, M., Kiviniemi, A., & Weekes, L. (2012). Stratégie optimisée en utilisant le BIM et la conception basée sur des ensembles : dalles en béton armé. Dans *Actes de la conférence CIB W078 2012, Beyrouth, Liban, 17-19 octobre 2012*. <https://www.cibworld.nl/site/home/index.html>

Bertino, G., Kisser, J., Zeilinger, J., Langergraber, G., Fischer, T., & Österreicher, D. (2021). Principes fondamentaux de la déconstruction des bâtiments en tant que stratégie d'économie circulaire pour la réutilisation des matériaux de construction. *Applied Sciences*, 11(939). <https://doi.org/10.3390/app11030939>

Besklubova, S., Skibniewski, M. J., & Zhang, X. (2021). Facteurs affectant l'adaptation de la technologie d'impression 3D dans la construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 147(04021026). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002034](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002034)

Bière, J. M., Fisk, A. D., & Rogers, W. A. (2014). Vers un cadre pour les niveaux d'autonomie des robots dans l'interaction homme-robot. *Journal of Human-Robot Interaction*, 3, 74-99. [10.5898/JHRI.3.2.Beer](https://doi.org/10.5898/JHRI.3.2.Beer)

Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twins: Directions for future research. *Automation in Construction*, 114, 103179. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>

Boschert, S., & Rosen, R. (2016). Digital twin—the simulation aspect. In *Mechatronic Futures* (pp. 59-74). Springer.

Boton, C., & Forgues, D. (2018). Comprendre l'impact du numérique sur la gestion de projet en construction. *Érudit*. <https://id.erudit.org/iderudit/1056303art>

Boton, C., & Forgues, D. (2020). Construction 4.0: The next revolution in the construction industry. *CanBIM Innovation Spotlight*. <https://www.canbim.com/articles/construction-4-0>

Boushaba, S., & Chakor, A. (2023). L'impact de l'intelligence artificielle sur le management de projet : opportunités et défis. *International Journal of Economics and Management Research*, volume(4), numéro(5).
<https://revues.imist.ma/index.php/IJEMARE/article/view/39755>

Braholli. O (2020). Automated Procedures for LCA Analysis on a BIM Project, Master in Building Information Modeling, Politecnico Di Milano,

Celik, Y., Petri, I., & Rezgui, Y. (2023). "Intégration du BIM et de la Blockchain dans l'ensemble du cycle de vie de la construction et des chaînes d'approvisionnement." *BRE Institute of Sustainable Engineering, School of Engineering, Université de Cardiff, Royaume-Uni*. Article disponible en ligne sur
<https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103886>.

Chan, D. W. M., T. O. Olawumi, and A. M. L. Ho. 2019. "Perceived benefits of and barriers to building information modelling (BIM) implementation in construction: The case of Hong Kong." *J. Build. Eng.* 25 (Aug): 100764.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100764>.

Changali, S., Mohammad, A., & Nieuwland, M. V. (2023). "L'impératif de productivité de la construction." *Centre des sciences de la productivité McKinsey*. Disponible
<https://www.mckinsey.com/~/media/McKinsey/Industries/Capital%20Projects%20and%20>
[20](https://www.mckinsey.com/~/media/McKinsey/Industries/Capital%20Projects%20and%20)

Charef, R., & Emmitt, S. (2021). Utilisations de la modélisation des informations du bâtiment pour surmonter les obstacles à une économie circulaire. *J. Propre. Prod.*, 285, 124854. [10.1016/j.jclepro.2020.124854](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124854)

Chen, X., Chang-richards, A. Y., Pelosi, A., & Yang, N. (2021). Implementation of technologies in the construction industry: A systematic review. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 29, 3181–3209. <https://doi.org/10.1108/ECAM-02-2021-0172>

Chen, Y., Cai, X., Li, J., Zhang, P., & Liu, Z. (2022). Les valeurs et les obstacles de l'évaluation combinée de la mise en œuvre de la modélisation des informations du bâtiment (BIM) dans les bâtiments intelligents énergétiques et l'efficacité. Dans les actes de la 7e Conférence internationale sur les progrès des ressources énergétiques et de l'environnement Ingénierie (ICAESSE 2021), 19-21 novembre 2021, Guangzhou, Chine. *Nature*, 591, 526-528. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-00736-2>.

Cheng J.C. , K. Chen, W. Chen(2020), State-of-the-art review on mixed reality applications in the AECO industry J. Constr. Eng. Manag., 146 (2) Article 03119009, [10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001749](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001749)

Cheng M., Liu G., Xu Y., Chi M (2021). When blockchain meets the AEC industry: Present status, benefits, challenges, and future research opportunities Buildings, 11 , p. 340, 10.3390/buildings11080340

Chien, S., Liu, C., Hsiao, C., & Wang, M. (2019). Using artificial intelligence to assist project risk management. *Journal of Business Research*, 98, 365-374.

Chu, B., Jung, K., Han, C., & Hong, D. (2010). Une enquête sur les robots grimpants : Locomotion. *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 16(3), 227-235. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12541-010-0075-3#article-info>

Clausen, A., Arendt, K., Johansen, A., Sangogboye, F. C., Kjærgaard, M. B., Veje, C. T., & Jørgensen, B. N. (2021). Un cadre de jumeau numérique pour améliorer l'efficacité énergétique et le confort des occupants dans les bâtiments publics et commerciaux. *Informatique sur l'énergie*, <https://portal.findresearcher.sdu.dk/en/publications/a-digital-twin-framework-for-improving-energy-efficiency-and-occu>

Daily, J., & Peterson, J. (2017). Maintenance prédictive: comment l'analyse des mégadonnées peut améliorer la maintenance. In *Défis d'intégration de la chaîne d'approvisionnement dans l'aérospatiale commerciale*. Cham, Suisse: Springer. [267–278] https://doi.org/10.1007/978-3-319-46155-7_18

Darko, A., Chan, A. P. C., Adabre, M. A., Edwards, D. J., Hosseini, M. R., & Ameyaw, E. E. (2020). Artificial intelligence in the AEC industry: Scientometric analysis and visualization of research activities. *Automation in Construction*, *112*, 103081. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103081>.

Das M., Tao X., Cheng J.C (2021). BIM security: A critical review and recommendations using encryption strategy and blockchain. *Autom. Constr.*, *126* (2021), p. 103682, [10.1016/j.autcon.2021.103682](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103682)

Das. M, X. Tao, Y. Liu, J.C. Cheng. (2022) A blockchain-based integrated document management framework for construction applications *Autom. Constr.*, *133* (104, p. 001, [10.1016/j.autcon.2021.104001](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104001)

Dave, B., Koskela, L., Kiviniemi, A., & Tzortzopoulos, P. (2013). Mise en œuvre du Lean dans la construction : Lean Construction et BIM [Guide CIRIA C725]; *CIRIA—Construction Industry Research and Information Association* : Londres, Royaume-Uni.

https://www.researchgate.net/publication/280840298_Implementing_lean_in_constructi_on_lean_construction_and_BIM

DD Maesa, P. Mori, (2020), enquête sur les applications Blockchain 3.0. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 50(101), 444. <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2021.01.016>

Dehlin, S., & Olofsson, T. (2008). Un modèle d'évaluation des investissements en TIC dans les projets de construction. *Electronic Journal of Information Technology in Construction*, 13, 343–361. <https://www.itcon.org/2008/23>

Delgado, J. M. D., Oyedele, L., Demian, P., & Beach, T. (2020). A research agenda for augmented and virtual reality in architecture, engineering and construction. *Automation in Construction*, 120, 101122. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101122>

Delgado. J.M.D, L. Oyedele (2021), Digital Twins for the built environment: learning from conceptual and process models in manufacturing *Adv. Eng. Inf.*, 49 Article 10133. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101332>

Deng, M., Menassa, C. C., & Kamat, V. R. (2021). Du BIM aux jumeaux numériques : une revue systématique de l'évolution des représentations de bâtiments intelligents dans l'industrie AEC-FM. *Journal of Information Technology in Construction*, 26, 58–83, <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.005>

Dengun, Z., Chenun, Y., Yangun, J., & Causonec, F. (2023). AutoBPS : un outil de modélisation énergétique des bâtiments urbains pour soutenir l'amélioration de l'efficacité énergétique à l'échelle de la ville. *Energy and Buildings*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112794>.

Direction générale de l'automobile, du transport, des technologies numériques et des compétences sectorielles. (2021). Profil du secteur canadien des TIC. https://www.ic.gc.ca/eic/site/ict-tic.nsf/fra/h_it07229.html.

Dirzus, D et C, Gulpen, 2017. Mehr wertshopfung durch neue Geschäftsmodelle
Wissenschaft trifft Praxis. <http://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Publicationen/Wissenschaft-triff-Praxis/magazin-wissenschaft-tri8ff-praxis-ausgabe8>

Dissaux, T. (2017-2018). "Optimisation en Conception Architecturale : Les Alternatives aux Algorithmes Génétiques." Mémoire de Master en Architecture, dirigé par Sylvie Jancart, Année académique 2017-2018, Axe(s) de recherche : Culture Numérique. https://matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/5026/5/Erratum_Dissaux%20Thomas%20-TFE.pdf

Eberhardt, L.C.M.; Birkved, M.; Birgisdottir, H. (2022). Building Design and Construction Strategies for a Circular Economy. *Architectural Engineering and Design Management*, 18, 93–113. <https://doi.org/10.1080/17452007.2020.1781588>

Ejidike, C. C., & Mewomo, M. C. (2023). Benefits of adopting smart building technologies in building construction of developing countries: review of literature. *SN Applied Sciences*, 5(52). <https://doi.org/10.1007/s42452-022-0837-0>.

EL Mounla, K., Beladjine, D., Beddiar, K., & Mazari, B. (2023). Approche Lean-BIM pour améliorer la performance d'un projet de construction en phase de conception. *Bâtiments*, 13, 654. <https://doi.org/10.3390/buildings13030654>.

Elbashbishy T.S., Ali G.G., El-adaway I.H (2022) Blockchain technology in the construction industry: sapping current research trends using social network analysis and clustering *Constr. Manag. Econ.*, 40 , pp. 406-427, [10.1080/01446193.2022.2056216](https://doi.org/10.1080/01446193.2022.2056216)

Eldeep, A. (2022). Avantages de l'intégration entre Lean et Bim dans la phase de conception et de construction ; Leçons apprises. *SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applied Research*, 3, 21–28. <https://dx.doi.org/10.21608/svusrc.2022.120081.1029>

Elli, A. B. Artem, B. Vita, C. Christian, C. Konstantinos, D.C. Angelo, E. David, F. Christopher, L. Gennady, M. Yacov, S. Muralidharan, C.Murthy, B. Nguyen, M. Sethi, G. Singh, K. Smith, A. Sorniotti, C.Stathakopoulou, M. Vukolić, S. Cocco, J. Yellic (2018), Hyperledger fabric: a distributed operating system for permissioned blockchains *Proceedings of the Thirteenth EuroSys Conference*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA , [10.1145/3190508.3190538](https://doi.org/10.1145/3190508.3190538)

Fabozzi, S., Biancardo, S. A., Veropalumbo, R., & Bilotta, E. (2021). Approche basée sur l'I-BIM pour la modélisation géotechnique et numérique d'une excavation de tunnel conventionnelle. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 108, 103723. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2020.103723>

Fakhimi, A., Sardrood, J. M., Mazroi, A., Ghoreishi, S. R., & Azhar, S. (2017). Influences de la modélisation des informations du bâtiment (BIM) sur les entreprises pétrolières, gazières et pétrochimiques. *Science and Technology for the Built Environment*, 23, 1063-1077. <https://doi.org/10.3390/buildings13071858>

Figueiredo, K., A.W. Hammad, A. Haddad, V.W. Tam Assessing the usability of blockchain for sustainability: extending key themes to the construction industry J. Clean. Prod., 343 (131) (2022), [10.1016/j.jclepro.2022.131047](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131047)

Francisco, A., Ascé, S. M., Mohammadi, N., Taylor, J. E., & Asce, M. (2020). Smart City Digital Twins–Enabled Energy Management: Toward Real-Time Urban Building Energy Benchmarking. *Journal of Management in Engineering*, 36,04019045. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000741](http://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000741)

Ge, C., Lv, W., & Wang, J. (2023). L'impact de l'intégration du réseau d'innovation technologique numérique sur les performances d'innovation des entreprises : le rôle de l'acquisition de connaissances et de la transformation numérique. *Durabilité*, 15, 6938. <https://doi.org/10.3390/su15086938>

Ghaffarian Hoseini, A., Zhang, T., Nwadigo, O., Ghaffarian Hoseini, A., Naismith, N., Tookey, J., & Raahemifar, K. (2017). Application du système intégré de gestion des bâtiments basé sur les connaissances ND BIM (BIM-IKBMS) pour l'inspection de l'efficacité énergétique après la construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 935–949. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.061>

Ghaleb, H., Alhajlah, H. H., Bin Abdullah, A. A., Kassem, M. A., & Al-Sharafi, M. A. (2022). *A Scientometric Analysis and Systematic Literature Review for Construction Project Complexity*. *Buildings*, 12, 482. <https://doi.org/10.3390/buildings12040482>

Ghosh, A., Edwards, D. J., & Hosseini, M. R. (2021). Modèles et tendances de la recherche sur l'Internet des objets (IoT) : applications futures dans l'industrie de la

construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 147(5), 04021021.
<http://dx.doi.org/10.1108/ECAM-04-2020-0271>

Goerzing, D et T. Bauemhansl, 2018 entreprise architecture for digital transformation in small and medium sized enterprises, *procedia CIRP* 67

Gray, J et B. Ramp. 2017 Models for the digital transformation, *Software et systems Modeling* 16(2)

Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* (pp. 85-113). Springer.

Guignoneun, G., Calmonun, J. L., Vieirab, D., Bravob, A. (2023). Méthodologies d'intégration BIM et ACV : une analyse critique et des lignes directrices proposées. *Journal du génie du bâtiment*, 73, 106780. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106780>

Haleem, A.; Javaid, M.; Singh, R.P.; Suman, R. (2021) Significant roles of 4D printing using smart materials in the field of manufacturing. *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.* , 4, 301–311.

Heiskanen A.(2017)The technology of trust: How the Internet of Things and blockchain could usher in a new era of construction productivity*Construct. Res. Innov.*, 8 , pp. 66-70, [10.1080/20450249.2017.1337349](https://doi.org/10.1080/20450249.2017.1337349)

Henriette, E. M Feki, et I, Boughzala. 2015. The shapes of digital transformation: a systematic literature review. *Mediterranean conference on information systems proceeding*

Herbele, A., W. Lowe, A. Gustafson, et V. Vorrei, 2017 Digitalization Canvas-Towards Identifying digitalization use cases and project. *Journal of universal computer science* 23 (11)

Hosamo, H. H., Imran, A., Cardenas-Cartagena, J., Svennevig, P. R., Svidt, K., & Nielsen, H. K. (2022). A Review of the Digital Twins Technology in the AEC-FM Industry. *Volume 2022, Article ID 2185170*. <https://doi.org/10.1155/2022/2185170>

Hosamo, H. H., Nielsen, H. K., Kraniotis, D., Svennevig, P. R., & Svidt, K. (2022). Cadre Digital Twins pour la détection et la prédiction automatisées des sources de défauts pour l'évaluation des performances de confort des bâtiments norvégiens non résidentiels existants. *Building and Environment*, 281, 112732. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112732>

Hosamo, H., Imran, A., Cardenas-Cartagena, J., Svennevig, P. R., Svidt, K., & Nielsen, H. K. (2022). A Review of the Digital Twins Technology in the AEC-FM Industry. *Volume 2022, Article ID 2185170*. <https://doi.org/10.1155/2022/2185170>

Hunhevicz, J. J., & Hall, D. M. (2020). "Do you need a blockchain in construction? Use case categories and decision framework for DLT design options." *Advanced Engineering Informatics*, 45, 101094. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101094>

Junaid a, Ahmed u.(2020) défis pour intégrer l'acv basée sur le bim dans un nouveau projet de bâtiment commercial et une entreprise de construction au pakistan : areview.

Jussyk, T. (2017). *Projet d'amélioration et d'optimisation de processus : Gestion de la phase d'implantation (Mémoire de maîtrise)*. Université du Québec à Rimouski.

Kaddoura, M., Kambanou, M. L., Tillman, A.-M., & Sakao, T. (2019). Is Prolonging the Lifetime of Passive Durable Products a Low-Hanging Fruit of a Circular Economy? A Multiple Case Study. *Sustainability*, *11*, 4819. <https://doi.org/10.3390/su11184819>

Kang K., Liu X., Jiang Y., Lee K., Wan S., Huang G.Q., Zhong R (2022). Blockchain opportunities for construction industry in Hong Kong: A case study of RISC and site diary *Construct. Innov.* (2022), [10.1108/CI-08-2021-0153](https://doi.org/10.1108/CI-08-2021-0153)

Kanters, J. (2018, November 6). Design for Deconstruction in the Design Process: State of the Art. *Buildings*, *8*(11), Article 150. <https://doi.org/10.3390/buildings8110150>

Kesting, P., et F Gunzel-Jensen. 2015. SMEs and new ventures need business model sophistication, *Business Horizon* 58(3)

Khajavi, S. H., Motlagh, N. H., Jaribion, A., Werner, L. C., & Holmström, J. (2019). Digital Twins: Vision, Benefits, Limitations, and Creation for Buildings. *IEEE Access*, *7*, 148968-148984. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2946515>

Khanzode, A., et al., *A guide to applying the principles of virtual design & construction (VDC) to the lean project delivery process*. CIFE, Stanford University, Palo Alto, CA, 2006.

Kim, Y., Kim, H., Murphy, R., Lee, S., & Ahn, C. R. (2022). Délégation ou collaboration: comprendre les perceptions de la robotisation par les différents acteurs de la construction. *Journal of Management in Engineering*, 38, 04021084. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000994](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000994)

Knotten, V., Laedre, O., & Hansen, G. K. (2017). Gestion de la conception des bâtiments—Facteurs clés de succès. *Architectural Engineering and Design Management*, 13, 479–493. <https://doi.org/10.1080/17452007.2017.1345718>

Kocakaya, M. N., Namli, E., & Işıkdağ, Ü. (2019). Building Information Management (BIM), une nouvelle approche de la gestion de projet. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 4, 323–332. <https://dergipark.org.tr/en/pub/jscmt/issue/48748/620252>

Kor, M., Yitmen, I., & Alizadehsalehi, S. (2021). An investigation for integration of deep learning and digital twins towards Construction 4.0. *Journal of Information Technology in Construction*, 26, 600-614. <http://dx.doi.org/10.1108/SASBE-08-2021-0148>

Kor, M., Yitmen, I., & Alizadehsalehi, S. (2023). An investigation for integration of deep learning and digital twins towards Construction 4.0. *Smart and Sustainable Built Environment*, 12(3), 461-487. <https://doi.org/10.1108/SASBE-08-2021-0148>

Kuperberg M., Geipel M (2021). Blockchain and BIM (Building Information Modeling): Progress in Academia and Industry, [10.48550/arXiv.2104.00547](https://arxiv.org/abs/10.48550/arXiv.2104.00547)

Lee, S.-I., Bae, J.-S., & Cho, Y. S. (2012). Analyse de l'efficacité de la conception basée sur des ensembles avec la modélisation structurelle des informations sur le bâtiment

(S-BIM) sur les structures de bâtiments de grande hauteur. *Autom. Constr.*, 23, 20–32. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.12.008>

Liang, C. J., Wang, X., Kamat, V. R., & Menassa, C. C. (2021). Collaboration homme-robot dans la construction : classification et tendances de la recherche. *J. Constr. Ing. Gérer.*, 147, 03121006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000988](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000988)

Liao, L., & Teo, E. A. L. (2017). Critical success factors for enhancing the building information modelling implementation in building projects in Singapore. *J. Civ. Eng. Manage.*, 23(8), 1029–1044. DOI: <https://doi.org/10.3846/13923730.2017.1374300>.

Liker, J. K. (2004). *Toyota Way : 14 principes de gestion du plus grand constructeur mondial*. McGraw-Hill Education : New York, NY, États-Unis. ISBN 0-07-139231-9. <https://doi.org/10.4236/oalib.1107987>

Lima, A. C. L., Albuquerque, D. M. S., Pereira, I. K. L., & Melhado, S. (2014) BIM Platform as a Project Management and Coordination System for the Camará Reserve. Paper presented at the XV National Meeting of Built Environment Technology (ENTAC 2014), Maceió.

Liu, Y., Soleil, Y., Yang, A., & Gao, J. (2021). Digital Twin-Based Ecogreen Building Design. *Complexité*, 2021, 1391184.

Loo, B. P. Y., & Wong, R. W. M. (2023). Vers un cadre conceptuel d'utilisation de la technologie pour soutenir la construction intelligente : le cas de la construction intégrée modulaire (MiC). *Buildings*, 13, 372. <https://doi.org/10.3390/buildings13020372>

Lu, R., & Brilakis, I. (2019). Jumelage numérique de ponts en béton armé existants à partir d'amas de points labellisés. *Autom. Constr.*, 105, 102837. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102837>

Lu, V. Q., Parlikad, A. K., Woodall, P., Ranasinghe, G. D., & Heaton, J. (2019). Développement d'un jumeau numérique dynamique au niveau du bâtiment : Utilisation du campus de Cambridge comme étude de cas. Dans *Actes de la Conférence internationale sur les infrastructures et la construction intelligentes*.

Maciel, M., Oliveira, F., & Santos, D. (2013). "The use of BIM technologies and the types of losses in the process of elaborating projects in architecture offices in Aracaju-Sergipe." Paper presented at the 3rd Brazilian Symposium on Project Quality in the Built Environment, 6th Meeting of Information Technology and Communication in Construction (TIC 2013), Campinas.

Madni, A. M., Madni, C. C., & Lucero, S. D. (2019). Leveraging Digital Twins Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems*, 7(1), 7. <https://doi.org/10.3390/systems7010007>

Maesa. D.D, P. Mori (2020) Blockchain 3.0 applications survey J. Parallel Distrib. Comput., 138 , [10.1016/j.jpdc.2019.12.019](https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2019.12.019)

Malekitabar, H., Ardeshir, A., Sebt, M. H., & Stouffs, R. (2016). Construction safety risk drivers: A BIM approach. *Saf. Sci.*, 82(Feb), 445–455. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.11.002>.

Maltese, V., & Romenti, S. (2020). Leading construction projects: A critical review of leadership models and their applicability. *Construction Management and Economics*, 38(3), 267-285. <https://doi.org/10.1080/17517575.2020.1856422>

Mannino, A., Dejaco, M. C., & Re Cecconi, F. (2021). Modélisation des informations du bâtiment et intégration de l'Internet des objets pour la gestion des installations - revue de la littérature et besoins futurs. *Appl. Sci.*, 11, 3062. <https://doi.org/10.3390/app11073062>

Marinelli, M. (2023). De l'industrie 4.0 à la construction 5.0 : explorer la voie vers une collaboration homme-robot dans la construction. *Systèmes*, 11, 152. <https://doi.org/10.3390/systems11030152>

MarketResearchFuture. (2017). Le marché mondial des jumeaux numériques devrait croître à un taux de croissance de 37 % de 2017 à 2023. Consulté le 2 juillet 2023. <https://www.marketresearchfuture.com/reports/digital-twin-market-4504>

McKinsey & Company. The Next Normal in Construction Material Distribution. 2020. Available online: <https://www.mckinsey.com> (accessed on 30 December 2022).

Menezes, A. M., Viana, M. L. S., Pereira, M. L. P. J., & Palhares, S. R. (2013, July 24-26). CAD and BIM Technologies: A Comparison for Analysis in the Approval of Architecture Projects in Legal Instances. Paper presented at the 3rd Brazilian Symposium on Project Quality in the Built Environment, 6th Meeting of Information Technology and Communication in Construction (TIC 2013), Campinas.

Mewomo M, Ejidike C (2021) Smart building as a key driver in the elimination of greenhouse gas emissions in less economically developing countries (LEDC). In:

Exploring contemporary issues and challenges in the construction industry: (CCC2021). 5th CU Construction Conference, 2021, pp. 162–168. DOI:[10.1201/9781003325321-28](https://doi.org/10.1201/9781003325321-28)

Ministère du Logement et du Développement urbain-rural, Norme de conception pour la modélisation énergétique des bâtiments urbains : une revue. *Build. Environ.*, 217.

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *BMJ Physical Therapy*, 89, 873–880. Multimedia 25 (2) (2018) 87–92. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>

Munaro, M.R.; Tavares, S.F.; Bragança, L.(2022). The Ecodesign Methodologies to Achieve Buildings' Deconstruction: A Review and Framework. *Sustain. Prod. Consum.*, 30, 566–583. <https://doi.org/10.3390/buildings13071858>

N. Shan, S.T. Wee, T.L. Wai, G.K. Chen Construction waste management of Malaysia: case study in Penang *Adv. Sci. Lett.*, 24 (6) (2018), pp. 4698-4703 24(6), pp. 4698–4703 DOI:<https://doi.org/10.1166/asl.2018.11684>

Najjar, M. K., Figueiredo, K., Jorge Evangelista, A. C., Hammad, A. W. A., Tam, V. W. Y., & Haddad, A. (2022). Life cycle assessment methodology integrated with BIM as a decision-making tool at early-stages of building design. *International Journal of Construction Management*, 22(4), 1,828. <https://doi.org/10.1080/15623599.2019.1637098>

Nasaruddin, A., Ito, T., & Tuan, T. B. (année à préciser). Digital Twins approach to building information management. *Proc. Fab. Syst. Conférence divisionnaire, Journal*

of Information Technology in Construction - ISSN 1874-4753, 26, 58-83. DOI: [10.36680/j.itcon.2021.005](https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.005)

Nnaji, C., & Karakhan, A. A. (2020). Technologies pour la gestion de la sécurité et de la santé dans la construction : utilisation actuelle, avantages et limites de la mise en œuvre et obstacles à l'adoption. *Journal of Construction Engineering and Management*, 29(101212). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101212>

Olawumi, TO, & Chan, DWM. (2019). Building Information Modeling et Project Information Management Framework pour les projets de construction. *Journal of Civil Engineering and Management*, 25(53–75). <https://doi.org/10.1002/sd.1925>

Omrany, H., Al-Obaidi, K. M., Husain, A., & Ghaffarianhoseini, A. (2023). Jumeaux numériques dans l'industrie de la construction : un examen complet des implémentations actuelles, des technologies habilitantes et des orientations futures. *Sustainability*, 15(10908). <https://doi.org/10.3390/su151410908>

Opoku, D. J., Perera, S., Osei-Kyei, R., & Rashidi, M. (2021). Digital Twins application in the construction industry: A literature review. *Journal of Building Engineering*, 40, 102726. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102726>

Othman, A. A. E., & Alamoudy, F. O. (2021). Optimising building performance through integrating risk management and building information modelling during the design process. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 16(6), 1233–1267. <https://doi.org/10.1108/JEDT-06-2020-0246>

Ozorhon, B., & Karahan, U. (2017). Critical success factors of building information modeling implementation. *Journal of Management in Engineering*, 33(3), 04016054. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000505](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000505)

Ozturk, GB. (2021). Digital Twins Research dans l'industrie AECO-FM. *Journal of Construction Engineering and Management*, 40(102730). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102730>

Pan, Y., & Zhang, L. (2021). Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends. *Automation in Construction*, 128, 103826. www.elsevier.com/locate/autcon.

Parrish, K., & Tommelein, I. (2009). Prendre des décisions de conception en utilisant le choix par avantages. Dans *Actes de la 17e Conférence annuelle de l'International Group for Lean Construction*, IGLC17, Taipei, Taïwan, 15-17 juillet 2009 ; pages 501–510.

Perera S., Nanayakkara S., Rodrigo M., Senaratne S., Weinand R. (2020) Blockchain technology: Is it hype or real in the construction industry? *J. Ind. Inf. Integr.*, 17, p. 100125, [10.1016/j.jii.2020.100125](https://doi.org/10.1016/j.jii.2020.100125)

Poêle, M., & Pan, W. (2019). Déterminants de l'adoption de la robotique dans la production de béton préfabriqué pour les bâtiments. *Journal of Management in Engineering*, 35(05019007). [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000706](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000706)

Pradhananga, P.; El Zomor, M.; Santi Kasabdj, G. Identifying the Challenges to Adopting Robotics in the US Construction Industry. *J. Constr. Eng. Manag.* **2021**, 147, 05021003. [[Google Scholar](#)]

Qi, Q., & Tao, F. (2018). Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. *IEEE Access*, 6, 3585-3593.

Radzi, A. R., Rahman, R. A., & Doh, S. I. (2021). Decision making in highway construction: A systematic review and future directions. *Journal of Engineering Design and Technology*. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/641/1/012008>

Regona, M., Yigitcanlar, T., & Xia, B. (2022). Opportunities and Adoption Challenges of AI in the Construction Industry: A PRISMA Review. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 8, 45. <https://doi.org/10.3390/joitmc8010045>

Regona, M., Yigitcanlar, T., Xia, B., & Li, R. Y. M. (2022). Opportunities and Adoption Challenges of AI in the Construction Industry: A PRISMA Review. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 8(1), 45. <https://doi.org/10.3390/joitmc8010045>

Ruikar, K., Kotecha, K., Sandbhor, S., & Thomas, A. (2021). From BIM to Digital Twins: A Systematic Review of the Evolution of Intelligent Building Representations in the AEC-FM Industry. *Journal of Information Technology in Construction*, 26, 40-62. <http://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.005>

Ruikar, K., Kotecha, K., Sandbhor, S., Thomas, A. (Eds.). (2021). From BIM to digital twins: A systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry. *Journal of Information Technology in Construction*, 2021, 26, 58-83. [10.36680/j.itcon.2021.005](http://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.005)

Sandberg, M., Mukkavaara, J., Shadram, F., & Olofsson, T. (2019). Optimisation multidisciplinaire de l'énergie et des coûts du cycle de vie à l'aide d'un modèle maître basé sur le BIM. *Sustainability*, 11(286) <https://doi.org/10.3390/su11010286>

Sanka .A.I., R.C. Cheung (2021) A systematic review of blockchain scalability: issues, solutions, analysis and future research *J. Net w. Comput. Appl.*, 195 (103) (2021), , [10.1016/j.jnca.2021.103232](https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103232)

Sbiti, M., Beddiar, K., Beladjine, D., Perrault, R., & Mazari, B. (2021). Vers l'intégration de données BIM et LPS pour la gestion de projet de site Lean : un examen de l'état de l'art et des recommandations. *Buildings*, 11(196) <https://doi.org/10.3390/buildings11050196>

Schöggel, J.-P., Rusch, M., Stumpf, L., & Baumgartner, R. J. (2022). Mise en œuvre des technologies numériques pour une économie circulaire et une gestion durable dans le secteur manufacturier. *Sustainable Production and Consumption*. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.11.012>.

Schöttle, A., Arroyo, P., & Christensen, R. (2018). Démontrer la valeur d'un processus décisionnel collaboratif efficace dans la phase de conception. Dans *Actes de la 26e Conférence annuelle de l'Internationale Group for Lean Construction*, Chennai, Inde, 18-20 juillet 2018 ; p. 18–20. <http://doi.org/10.24928/2018/0500>

Schweigkofler, A., Braholli, O., Akro, S., Siegele, D., Penna, P., Marche, C., Tagliabue, L., Matt, D., et al. (2022). *Digital Twins as energy management tool through IoT and BIM data integration*. In Actes de la conférence CLIMA 2022: The 14th REHVA HVAC World Congress (p. 46). <https://doi.org/10.34641/clima.2022.46>

Scott, D.J, T. Broyd, L. Ma Exploratory literature review of blockchain in the construction industry *Autom. Constr.*, 132 (103) (2021), p. 914, [10.1016/j.autcon.2021.103914](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103914)

Scott, DJ, T. Broyd, L. Ma. (2021). Revue exploratoire de la littérature sur la blockchain dans *Distributed Computing*, 138, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103914>

Seo, H., & Yun, W.-S. (2022). Cadre d'évaluation numérique basé sur le jumeau pour les économies d'énergie dans l'éclairage des salles de classe universitaires. *Buildings*, 12(544). <https://doi.org/10.3390/buildings12050544>

Sepasgozar, P. M. E. (2020). Décisions d'utilisation de la technologie numérique pour faciliter la mise en œuvre des technologies de l'Industrie 4.0. *Construction Innovation*, 21, 476–489.

Sepasgozar, P. M. E. (2021). Différencier le jumeau numérique de l'ombre numérique : élucider un changement de paradigme pour accélérer un environnement bâti intelligent et durable. *Buildings*, 11(151).

Sepasgozar, S. M. E., Khan, A. A., Smith, K., Romero, J. G., Shen, X., Shirowzhan, S., Li, H., & Tahmasebinia, F. (2023). BIM and Digital Twins for Developing Convergence Technologies as Future of Digital Construction. *Buildings*, 13(441). <http://doi.org/10.3390/buildings13020441>

Sepasgozar, S.M.E., Khan, A.A., Smith, K., Romero, J.G., Shen, X., Shirowzhan, S., Li, H., & Tahmasebinia, F. (2023). BIM and Digital Twin for Developing Convergence

Technologies as Future of Digital Construction. *Buildings*, 13, 441. <https://doi.org/10.3390/buildings13020441>

Sepasgozar. S, S. Davis, M. Loosemore. (2018). Pratiques de diffusion des fournisseurs de technologie des chantiers de construction dans les expositions technologiques. *Journal of Management in Engineering*, 34(6), 04018038. <https://doi.org/10.1108/ECAM-03-2017-0052>

Serghides. DK. CK Chatzinikola, MC Katafygiotou. (2021). Études comparatives du comportement des données volumineuses. *Journal of Network and Computer Applications*. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103232>.

Shafei, H., Radzi, A. R., Algahtany, M., & Rahman, R. A. (2022). Construction 4.0 Technologies and Decision-Making: A Systematic Review and Gap Analysis. *Buildings*, 12(2206). <https://doi.org/10.3390/buildings12122206>.

Shamseer, L., Moher, D., Clarke, M., Ghersi, D., Liberati, A., Petticrew, M., ... Stewart, L. A. (2015). Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015: Elaboration and explanation. *BMJ*, 349, g7647. <https://link.springer.com/article/10.1186/2046-4053-4-1>

Shao, Z., Li, Y., Huang, P., Abed, A. M., Ali, E., Elkamchouchi, D. H., Abbas, M., & Zhang, G. (2023). Analysis of the opportunities and costs of energy saving in the lightning system of library buildings with the aid of building information modelling and Internet of things. *Fuel*, 352, 128918. www.elsevier.com/locate/fuel

Sharafat, A., Khan, MS, Latif, K., & Seo, J. (2021). Cadre de modélisation des informations de tunnel basé sur le BIM pour la visualisation, la gestion et la simulation de

projets de tunnel de forage et de dynamitage. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 35(4020068). [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000955](http://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000955)

Shoubi M.V; et al. "Reducing the operational energy demand in buildings using building information modeling tools and sustainability approaches." *Ain Shams Eng J*, 6 (1) (2015), pp. 41-55.

Silva, T. F. L., Carvalho, M. M., & Vieira, D. R. (2022). BIM Critical-Success Factors in the Design Phase and Risk Management: Exploring Knowledge and Maturity Mediating Effect. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148(10), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002343](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002343)

Sores, P. A. DE S., et E Muller. (2018). Die Rattenfänger von Digitalien. *Manger magazin*, 68-77.

Stadel, A., et al. (2011). Intelligent sustainable design: Integration of carbon accounting and building information modeling. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 137(2), 51-54. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EI.1943-5541.0000053](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EI.1943-5541.0000053)

Stanitsas. M, K. Kirytopoulos, V. Leopoulos (2021) Integrating sustainability indicators into project management: the case of construction industry J. Clean. Prod., 279 (123) , [10.1016/j.jclepro.2020.123774](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123774)

Tagliabue, LC, Cecconi, FR, Maltais, S., Rinaldi, S., Ciribini, ALC, & Flammini, A. (2021). Tirer parti du jumeau numérique pour l'évaluation de la durabilité d'un bâtiment éducatif. *Sustainability*, 13(480). https://doi.org/10.1007/978-981-99-0252-1_4

Tan, Y., Chanson, Y., Zhu, J., Long, Q., Wang, X., & Cheng, JCP. (2018). Optimisation des opérations de levage et des horaires de transport des navires pour le démontage de plusieurs plates-formes offshore à l'aide du BIM et du SIG. *Automation in Construction*, 94, 328–339. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.012>

Tan, Y., Chen, P., Shou, W., & Sadick, A.-M. (2022). Approche numérique axée sur le jumeau pour améliorer l'efficacité énergétique de l'éclairage intérieur basée sur la vision par ordinateur et le BIM dynamique. *Building and Environment*, 270, 112271. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112271>

Tao, F., J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang, and F. Sui. 2018. “Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data.” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 94 (9–12): 3563–3576. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>.

Tchana, Y., Ducellier, G., & Remy, S. (2019). Designing a unique Digital Twins for linear infrastructures lifecycle management. *Procedia CIRP*, 84, 545-549. DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.176. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.176>

Teisserenc, B., & Sepasgozar, S. M. E. (2022). Software Architecture and Non-Fungible Tokens for Digital Twins Decentralized Applications in the Built Environment. *Buildings*, 12, 1447 <http://doi.org/10.3390/buildings12091447>

Tingley, D. D., Cooper, S., & Cullen, J. (2017). Comprendre et surmonter les obstacles à la réutilisation de l'acier de construction, une perspective britannique. *Journal of Cleaner Production*, 148, 642–652. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.2162.7766>

Trimble. Logiciel de gestion des actifs de construction - Trimble PULSE Telematics. (Consulté le 30 décembre 2022). <https://logicieldeconstruction.trimble.com>

Tsai, Y.-C. (2022). La chaîne de valeur du métaverse de l'éducation. *arXiv*, arXiv:2211.05833. (Consulté le 30 décembre 2022). <https://arxiv.org/abs/2211.05833>

Ullah, K., Lill, I., & Witt, E. (2019). An overview of BIM adoption in the construction industry: Benefits and barriers. In *10th Nordic Conference on Construction Economics and Organization*. Emerald Publishing Limited <https://doi.org/10.1108/S2516-285320190000002052>

Valinejadshoubi, et al. (2023). Développement d'un système d'alerte automatisé basé sur l'IoT et le BIM via la représentation graphique. *Energy and Buildings*, 279, 112652.

Vieira, D., Calmon, J. L., & Cavalcante, M. C. (2017). Building Information Modeling (BIM) in Brazil's Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry: A Review and a Bibliometric Study. *Journal of Modern Project Management*. <https://doi.org/10.19255/JMPM01303>

Vignali, V., Acerra, E. M., Lantieri, C., Vincenzo, D. F., Piacentini, G., & Pancaldi, S. (2021). Application de modélisation des informations du bâtiment (BIM) pour une infrastructure routière existante. *Automation in Construction*, 128, 103752. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104601>

W. Wu, H. He, Z. Chu, Y. Liu, L. Shi, M. Gu, T. Zhang, Z. Lin, L. Yang (2021) Blockchain-based smart payment scheme of power infrastructure funds *Energy Rep.*, 7 (S7), [10.1016/j.egy.2021.09.199](https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.09.199)

Wang, J., & Lu, W. (2021). A deployment framework for BIM localization. *Engineering, Construction and Architectural Management*. <https://doi.org/10.1108/ECAM-09-2020-0747>

Wang, M., Wang, C. C., Sepasgozar, S., & Zlatanova, S. (2020). Une revue systématique de l'adoption de la technologie numérique dans la construction hors site : état actuel et orientation future vers l'industrie 4.0. *Buildings*, 10(204). <https://doi.org/10.3390/buildings10110204>

Wang, Q., Chen, G., Khishe, M., Ibrahim, B. F., & Rashidi, S. (2023). Optimisation multi-objectifs de l'énergie des bâtiments écologiques basée sur l'IoT système utilisant des algorithmes métaheuristiques binaires. *Journal de l'Optimisation des Bâtiments Écologiques*. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106031>

Wang, W., Guo, H., Li, X., Tang, S., Li, Y., Xie, L., & Lv, Z. (2022). Modélisation VR basée sur l'intégration d'informations BIM dans les jumeaux numériques dans l'industrie 5.0. *Journal of Industrial Integration*, 28, 100351. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100351>

Wang, X. Q., Chen, P., Chow, C. L., & Lau, D. (2023). Artificial-intelligence-led revolution of construction materials: From molecules to Industry 4.0. *Materials Today*, 6(6), 1831-1859. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2023.04.016>

Wang, X., Wang, J., Wu, C., Xu, S., & Ma, W. (2022). Engineering Brain: Métaverse pour l'ingénierie future. *IA Civil Engineering*, 1(2). <http://dx.doi.org/10.1007/s43503-022-00001-z>

Wang, C, M. Ferrando, F. Causone, X. Jin, X. Zhou, X. Shi. (2021). Acquisition de données pour la Callcut, M. ; Agliozzo, J.-PC; Varga, L.; McMillan, L. Jumeaux numériques dans les systèmes d'infrastructure civile. *Durabilité*, 13, 11549. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109056>

Wang, M, G. Zhang, C. Zhang, J. Zhang, & C. Li. "Un système de contrôle d'appareils basé sur l'IdO pour les maisons intelligentes." Dans Proc. IEEE 4e Int. Conf. Renseignement. Informations de contrôle Processus. (ICICIP), 2013.

Weiss, A., Wortmeier, A. K., & Kubicek, B. (2021). Cobots in Industry 4.0: Une feuille de route pour les études de pratiques futures sur la collaboration homme-robot. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 51, 335-345. <https://doi.org/10.1109/thms.2021.3092684>

Wen, Q.-J., Ren, Z.-J., Hu, H., & Wu, J.-F. (2021). L'avancée et la tendance de la recherche BIM : une analyse de visualisation basée sur la bibliométrie. *Automation in Construction*, 124, 103558. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103558>

Won, J., & Lee, G. (2016). How to tell if a BIM project is successful: A goal-driven approach. *Automation in Construction*, 69, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.022>.

Won, J., Lee, G., Dossick, C., & Messner, J. (2013). Where to focus for successful adoption of building information modeling within organization. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(11), 04013014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000731](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000731).

X. Li, L. Wu, R. Zhao, W. Lu, F. Xue Two-layer (2021) adaptive blockchain-based supervision model for off-site modular housing production *Comput. Ind.*, 128 (103), [10.1016/j.compind.2021.103437](https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103437)

Xia. S, J. Nie, X. Jiang) (2021), CSafe: an intelligent audio wearable platform for improving construction worker safety in urban Environments. s.l Proceedings of the 20th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (Co-located with CPS-IoT Week 2021)pp. 207-221

Xia. S, J. Nie, X. Jiang. (2021). CSafe : une plate-forme portable audio intelligente pour améliorer la sécurité des travailleurs de la construction dans les environnements urbains. Dans : *Actes de la 20e Conférence internationale sur le traitement de l'information dans les réseaux de capteurs* (Colocalisée avec la semaine CPS-IoT 2021), pp. 207-221.

Xie, et al. (2020). Système d'inspection visualisé pour surveiller les anomalies environnementales pendant l'exploitation et la maintenance quotidiennes. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 27(8), 1835–1852. <https://zfin.org/ZDB-PUB-200403-96#summary>

Xie, H., Xin, M., Lu, C., & Xu, J. (2023). Carte des connaissances et prévision du jumeau numérique dans l'industrie de la construction : examen de l'état de l'art utilisant l'analyse scientométrique. *Journal of Cleaner Production*, 383, 135231. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135231>

Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). Industrie 4.0 et Industrie 5.0 — Création, conception et perception. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 530-535. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>

Yang, Y., & Pan, W. (2021). Véhicules guidés automatisés dans la construction intégrée modulaire : potentiels et orientations futures. *Construction Innovation*, 21, 85–104. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000905](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000905)

Yitmen, I., Almusaed, A., & Alizadehsalehi, S. (2023). Enquête sur les relations causales entre les catalyseurs du paradigme de la construction 5.0 : intégration de l'opérateur 5.0 et de la société 5.0 avec une approche centrée sur l'humain, la durabilité, et résilience. *Sustainability*, 15, 9105. <https://doi.org/10.3390/su15119105>

Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Tamošaitiene, J. (2010). Évaluation des risques des projets de construction. *Journal of Civil Engineering and Management*, 16, 33–46. <https://doi.org/10.3846/jcem.2010.03>

Zeng, S., Wang, K., Li, X., & Cao, J. (2019). How Artificial Intelligence Impacts Project Management: A State-of-the-Art Review.

Zeng, S., Wang, Y., & Chen, X. (2019). How artificial intelligence affects project management? A systematic review and future research agenda. *International Journal of Project Management*, 37(1), 107-125.

Zhang, J., Cheng, J. C. P., Chen, W., & Chen, K. (2022). Jumeaux numériques pour les chantiers de construction : concepts, définition de LoD et applications. *Journal of Management in Engineering*, 38, 04021094. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000948](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000948)

Zhang, J., Zhu, X., Khan, A. M., Houda, M., Kashif Ur Rehman, S., Jameel, M., Javed, M. F., & Alrowais, R. (2023). BIM-based architectural analysis and optimization

for construction 4.0 concept (a comparison). *Ain Shams Engineering Journal*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/eng4020093>

Zhang, J., Zhu, X., Khan, A. M., Houda, M., Rehman, S. K. U., Jameel, M., Javed, M. F., & Alrowaish, R. (2022). Analyse architecturale basée sur le BIM et optimisation pour le concept de construction 4.0 : une comparaison. *Advances in Science, Engineering, and Innovation*, 8(4), 102110. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.102110>

Zhang, X., Azhar, S., Nadeem, A., & Khalfan, M. (2018). Utilisation de la modélisation des informations du bâtiment pour atteindre les principes Lean en améliorant l'efficacité des équipes de travail. *International Journal of Construction Management*, 18(4), 293–300. <https://doi.org/10.1080/15623599.2017.1382083>

Zhang, Y., Liu, H., Kang, S. C., & Al-Hussein, M. (2020). Applications de réalité virtuelle pour l'environnement bâti : tendances et opportunités de recherche. *Automation in Construction*, 118, 103311. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103311>

Zhao, L., Zhang, H., Wang, Q., & Wang, H. (2021). Évaluation basée sur le jumeau numérique d'un bâtiment à énergie quasi nulle pour les bâtiments existants basée sur la numérisation vers le BIM. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 6638897. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2021.08.067>

Zhao, R., Chen, Z., & Xue, F. (2022). Un paradigme blockchain 3.0 pour les jumeaux numériques dans la gestion de projets de construction. *Automation in Construction*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104645>.

Zoghi, M., & Kim, S. (2020). Dynamic Modeling for Life Cycle Cost Analysis of BIM-Based Construction Waste Management. *Sustainability*, *12*, 2483. <https://doi.org/10.3390/su12062483>