

Reconceptualiser la notion du BIM 6D dans l'industrie des actifs bâtis à travers le prisme des systèmes de certification des bâtiments et des normes de durabilité

par

Meisam JABERI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION

M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 16 DECEMBRE 2024

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Meisam Jaberri, 2024



Cette licence [Creative Commons](#) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Érik Poirier, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Gabriel Jobidon, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Katherine D'avignon, examinateur externe
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 14 NOVEMBRE 2024

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

La réalisation de cette thèse a constitué un profond voyage de croissance académique et personnelle, rendu possible grâce au soutien et aux conseils de nombreuses personnes remarquables.

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude au professeur Érik Poirier, dont l'expertise et les conseils m'ont permis de naviguer dans les méandres de ma recherche. Son soutien constant et ses commentaires inestimables ont contribué de manière significative à mon développement académique. Je suis profondément reconnaissant d'avoir eu l'occasion de travailler sous sa supervision et j'apprécierai toujours son mentorat.

Je suis également immensément reconnaissant envers les membres du GRIDD. Cette communauté dynamique d'étudiants, de chercheurs et de professeurs a créé un environnement stimulant qui a grandement enrichi mon expérience de recherche. Je remercie tout particulièrement l'ÉTS de m'avoir fourni les ressources et le soutien académique qui ont été essentiels à mes recherches. L'atmosphère innovatrice et favorable de l'ÉTS s'est avérée cruciale pour faciliter mes efforts académiques.

Je remercie sincèrement tous les participants aux ateliers, aux enquêtes et aux entretiens pour leur contribution inestimable à ma recherche. Vos points de vue et vos expériences ont joué un rôle essentiel dans l'élaboration des conclusions de cette étude.

Enfin, je remercie du fond du cœur mes parents pour leur amour inconditionnel, leurs encouragements et leur soutien. Votre foi en mes capacités a été la force motrice de mes réalisations, et je vous dédie cet accomplissement.

Reconceptualiser la notion du BIM 6D dans l'industrie des actifs bâts à travers le prisme des systèmes de certification des bâtiments et des normes de durabilité

Meisam JABERI

RÉSUMÉ

Cette thèse examine le rôle de la Modélisation de l'Information du Bâtiment (BIM) 6D dans la reconceptualisation de la durabilité dans l'industrie des actifs bâts. En tant que contributrice significative à la dégradation environnementale, l'industrie fait face à l'impératif d'adopter des pratiques durables. C'est dans ce contexte que diverses certifications et normes de durabilité, telles que LEED, DGNB, BREEAM, ISO 14001 et la série GRI 200, ont été introduites. Ces systèmes visent à guider l'industrie, mais ont involontairement créé un paysage fragmenté en raison de la diversité et de la complexité de leurs indicateurs. La thèse réalise une analyse approfondie de 25 certifications et 26 normes, révélant des disparités substantielles dans la focalisation et l'étendue des mesures de durabilité.

Pour remédier à ces incohérences, une liste consolidée de 189 indicateurs a été développée, dérivée d'un examen approfondi et d'une analyse comparative des systèmes existants. Cette liste sous-tend un nouveau cadre qui intègre ces systèmes fragmentés en une stratégie cohérente pour l'évaluation de la durabilité. La méthodologie de recherche se base sur une approche mixte, combinant une analyse quantitative avec des insights qualitatifs d'experts grâce à des ateliers, des enquêtes et des entretiens réalisés avec des parties prenantes de l'industrie et des universitaires.

De plus, la thèse explore l'utilisation du BIM et des Jumeaux Numériques dans la mise en œuvre des indicateurs de durabilité, une méthode de plus en plus reconnue sous le terme BIM 6D. En analysant le rôle de la transformation numérique dans la promotion des actifs à faible empreinte carbone, l'étude explore le potentiel du BIM pour améliorer la normalisation de l'industrie et faciliter une transition vers des pratiques plus durables. Les résultats suggèrent un paysage nuancé de l'évaluation de la durabilité, indiquant le besoin d'une approche plus standardisée, inclusive et intégrée. Le cadre unifié proposé ne se contente pas de combler les lacunes actuelles, mais positionne également le BIM comme un outil central pour atteindre les objectifs de développement durable. La recherche dépasse le discours académique, en informant les décisions politiques, les pratiques industrielles et les directions futures de la recherche tout en traçant un chemin vers un environnement bâti plus responsable et durable.

Mots-clés : normes de durabilité, certifications de bâtiments, BIM 6D, modélisation des informations du bâtiment, jumeaux numériques

Reconceptualizing the Notion of 6D BIM in the Built Asset Industry Through the Lens of Building Certification Schemes and Sustainability Standards

Meisam JABERI

ABSTRACT

This thesis scrutinizes the role of 6D Building Information Modeling (BIM) in reconceptualizing sustainability within the built asset industry. As a significant contributor to environmental degradation, the industry faces an imperative to adopt sustainable practices. It is within this context that various sustainability certifications and standards, such as LEED, DGNB, BREEAM, ISO 14001, and GRI 200 series, have been introduced. These schemes aim to guide the industry but have inadvertently created a fragmented landscape due to the diversity and complexity of their indicators. The thesis conducts a thorough analysis of 25 certifications and 26 standards, revealing substantial disparities in the focus and breadth of sustainability measures.

Addressing these inconsistencies, a consolidated list of 189 indicators was developed, derived from an extensive review and comparative analysis of existing schemes. This list underpins a new framework that integrates these fragmented systems into a coherent strategy for sustainability assessment. The research methodology employed a mixed-methods approach, combining quantitative analysis with expert qualitative insights from workshops, surveys, and interviews conducted with industry stakeholders and academics.

Additionally, the thesis delves into the use of BIM and Digital Twin in implementing sustainability indicators, a method increasingly recognized as 6D BIM. By analyzing the role of digital transformation in promoting low-carbon assets, the study explores the potential of BIM in enhancing industry standardization and facilitating a shift towards more sustainable practices. The findings suggest a nuanced landscape of sustainability assessment, indicating a need for a more standardized, inclusive, and integrated approach. The proposed unified framework not only addresses current gaps but also positions BIM as a central tool in achieving sustainable development goals. The research extends beyond academic discourse, informing policy decisions, industry practices, and future research directions, highlighting a path towards a more responsible and sustainable built environment.

Keywords: Sustainability Standards, Building Certifications, 6D BIM, Building Information Modeling, Digital Twin

TABLE DES MATIÈRES

2.9.3.1	Conception et distribution de l'enquête	41
2.9.3.2	Contenu et structure de l'enquête	41
2.9.3.3	Critères d'évaluation	42
2.9.3.4	Préparation et analyse des données de l'enquête	44
2.9.3.5	Calcul du Score d'Accord Pondéré	46
2.9.3.6	Visualisation de l'analyse des données	47
2.9.4	Entretien avec des experts	49
2.9.4.1	Conception et justification de l'entretien	49
2.9.4.2	Sélection et préparation	49
2.9.4.3	Structure de l'entretien	50
2.9.4.4	Évaluation des indicateurs	51
2.9.4.5	Addition de l'analyse quantitative	52
2.10	Considérations éthiques	52
2.11	Résumé du chapitre	53
CHAPITRE 3 RÉSULTATS ET ANALYSE		55
3.1	Introduction	55
3.2	Liste des normes et certifications de durabilité sélectionnées	56
3.3	Développement et analyse de la Matrice Consolidée de Durabilité (MCD)	61
3.3.1	Extraction et agrégation des catégories et indicateurs à travers les schémas	61
3.3.2	Comparaison, alignement et identification des indicateurs communs	62
3.3.3	Présentation des tableaux comparatifs pour les certifications et les normes	63
3.3.4	Développement, finalisation et documentation de la MCD	65
3.3.4.1	Catégories de la MCD	69
3.3.4.2	Indicateurs de la MCD	71
3.4	Intégration des capacités du BIM et des jumeaux numériques	72
3.5	Résultats de l'analyse de la MCD	82
3.5.1	Distribution des indicateurs dans les schémas de certification et de normes	82
3.5.2	Répartition des indicateurs par catégorie et classification	84
3.5.3	Analyse des indicateurs dominants	84
3.6	Résultats de l'évaluation de l'artefact	86
3.6.1	Résultats de l'atelier	86
3.6.2	Résultats de l'enquête	90
3.6.2.1	Informations démographiques des répondants à l'enquête	90
3.6.2.2	Fréquence des catégories de durabilité sélectionnées par les répondants	92
3.6.2.3	Perspectives des participants: Potentiels de numérisation pour les indicateurs de durabilité	92
3.6.2.4	Répartition des préférences d'utilisation du BIM par catégorie	93

3.6.2.5	Classement des indicateurs de durabilité par niveau d'intégration du BIM	95
3.6.2.6	Analyse du consensus sur les indicateurs de durabilité	97
3.6.2.7	Analyse des diagrammes en boîte à moustaches	98
3.6.2.8	Indicateurs avec le score d'accord pondéré le plus élevé	99
3.6.2.9	Indicateurs avec le score d'accord pondéré le plus bas	100
3.6.2.10	Discussion des scores d'accord	101
3.6.3	Résultats des entretiens avec les experts.....	102
3.6.3.1	Évaluation des capacités du BIM et des DT pour chaque indicateur.....	104
3.6.3.2	Conclusion	106
3.7	Résumé du chapitre.....	106
CHAPITRE 4 DISCUSSION ET CONCLUSION		109
4.1	Introduction.....	109
4.2	Discussion sur la conception de la recherche	109
4.3	Réflexion sur les résultats	111
4.3.1	Développement et validation de la MCD.....	112
4.3.2	Incorporation des capacités BIM et DT	113
4.3.3	Résultats de l'analyse de la MCD	114
4.3.4	Évaluation de l'artefact.....	115
4.3.5	Analyse comparative avec les travaux antérieurs	115
4.3.6	Réalisation des objectifs de recherche	116
4.4	Discussion des limitations.....	116
4.4.1	Portée géographique limitée	116
4.4.2	Étendue des indicateurs de durabilité	117
4.4.3	Généralisation des résultats.....	118
4.4.4	Méthodes d'évaluation	118
4.4.5	Limitations technologiques	118
4.4.6	Focus sur les certifications et les normes.....	119
4.5	Contributions et implications.....	119
4.5.1	Avancement du concept du BIM 6D	120
4.5.2	Intégration de la technologie des jumeaux numériques	121
4.5.3	Amélioration des outils d'évaluation de la durabilité.....	121
4.5.4	Implications pour la théorie et la pratique	121
4.6	Directions pour les futures recherches	122
4.7	Conclusion	123
ANNEXE I	MATRICE CONSOLIDÉE DE DURABILITÉ (MCD)	125
ANNEXE II	DESCRIPTIONS DES INDICATEURS DE LA MCD	135
ANNEXE III	CLASSEMENT DES INDICATEURS EN FONCTION DE LEUR SCORE D'ACCORD PONDÉRÉ	149
BIBLIOGRAPHIE.....		153

LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau 2.1	Adoption de la méthodologie DSR pour cette recherche.....	27
Tableau 2.2	Tableau analytique 1 dans Excel, saisie de données pour analyse Power BI	37
Tableau 2.3	Tableau analytique 2 dans Excel, saisie de données pour analyse Power BI	38
Tableau 2.4	Structure de données transformée dans Power BI : vue non pivotée du tableau analytique 1	38
Tableau 2.5	Échelle à six points pour l'évaluation des capacités du BIM/DT	43
Tableau 2.6	Poids assignés aux réponses de l'enquête	46
Tableau 2.7	Aperçu des visualisations analytiques générées dans Power BI à partir des données de l'enquête.....	48
Tableau 2.8	Résumé des profils des participants experts pour les entretiens	50
Tableau 3.1	Liste des schémas de certification de construction sélectionnés	57
Tableau 3.2	Liste des Normes Sélectionnées.....	58
Tableau 3.3	Extrait des catégories et des indicateurs issus des schémas sélectionnés	62
Tableau 3.4	Extrait de l'examen de la description de chaque indicateur, du processus de mesure et des outils utilisés	63
Tableau 3.5	Partie du tableau comparatif pour les schémas de certification	64
Tableau 3.6	Partie du tableau comparatif des normes	65
Tableau 3.7	Partie de la MCD incluant toutes les certifications et normes	68
Tableau 3.8	Introduction aux catégories de la MCD	69
Tableau 3.9	Une partie des indicateurs de la MCD	72
Tableau 3.10	Cartographie des capacités BIM et DT dans les catégories de développement durable	73
Tableau 3.11	Informations démographiques des participants à l'étape de l'enquête	91

Tableau 3.12	Résumé en cinq nombres du consensus des participants sur les indicateurs de durabilité	99
Tableau 3.13	Perspectives des experts sur l'intégration du BIM et des DT dans les pratiques de durabilité : Résumé des perspectives	103
Tableau 3.14	Consensus sur les capacités du BIM et des DT pour les indicateurs de durabilité: Scores d'accord les plus élevés.....	105
Tableau A II.1	Descriptions des indicateurs de la MCD.....	135
Tableau A III.1	Classement des indicateurs en fonction de leur score d'accord pondéré.....	149

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Dimensions du BIM.....
Figure 1.2	Modèle adapté du BIM à la progression du jumeau numérique
Figure 2.1	Modèle de processus DSR
Figure 2.2	Processus en six étapes pour développer la MCD (Matrice Consolidée de Durabilité)
Figure 2.3	Intégration des capacités du BIM et des DT dans la MCD.....
Figure 2.4	Processus d'analyse des données de la MCD.....
Figure 2.5	Atelier au laboratoire GRIDD, ÉTS.....
Figure 2.6	Exemple de page d'enquête – Évaluation de l'intégration du BIM et des DT dans les indicateurs de durabilité pour la catégorie Énergie.
Figure 3.1	Nuage de mots pour chaque document de classification : À gauche : Certifications, À droite : Normes
Figure 3.2	Tableau de comptage de mots pour chaque document de classification : à gauche : Certifications, à droite : Normes
Figure 3.3	Partie des données extraites pour les schémas de certification.....
Figure 3.4	Vue schématique de la MCD
Figure 3.5	Répartition des indicateurs sur deux classifications de certifications et de normes
Figure 3.6	Répartition des indicateurs dans chaque schéma
Figure 3.7	Répartition des indicateurs pour chaque catégorie dans chaque classification
Figure 3.8	Indicateurs dominants dans les deux classifications.....
Figure 3.9	Indicateurs dominants séparés par chaque classification.....
Figure 3.10	Fréquence des niveaux de capacité BIM sélectionnés pour les indicateurs de durabilité lors de l'atelier GRIDD.....

Figure 3.11	Évaluation en atelier des indicateurs de durabilité à travers différents niveaux de capacité BIM : À GAUCHE : Aucune utilisation du BIM. À DROITE : Modèle numérique mis à jour	88
Figure 3.12	Évaluation en atelier des indicateurs de durabilité à travers différents niveaux de capacité BIM : À GAUCHE : Collaboration de modèle partagé. À DROITE : Données de capteur + Données liées	88
Figure 3.13	Évaluation en atelier des indicateurs de durabilité à travers différents niveaux de capacité BIM : Jumeau numérique complet	89
Figure 3.14	Fréquence des catégories de durabilité sélectionnées par les répondants	92
Figure 3.15	Fréquence des niveaux de capacité BIM/DT sélectionnés pour les indicateurs de durabilité dans l'enquête	93
Figure 3.16	Répartition des préférences d'utilisation du BIM par catégorie.....	94
Figure 3.17	Principaux indicateurs de durabilité classés selon : À GAUCHE : Pas d'indicateur de durabilité valide. À DROITE : Pas d'utilisation du BIM	96
Figure 3.18	Principaux indicateurs de durabilité classés selon : À GAUCHE : Modèle numérique mis à jour. À DROITE : Modèle partagé.....	96
Figure 3.19	Principaux indicateurs de durabilité classés selon : À GAUCHE : Modèle partagé avec données de capteurs intégrées. À DROITE : Jumeaux numériques complets	97
Figure 3.20	Visualisation du consensus pondéré sur les indicateurs de durabilité sous forme de diagramme en boîte à moustaches.....	98
Figure 3.21	Indicateurs avec le score d'accord pondéré le plus élevé.....	100
Figure 3.22	Indicateurs avec le score d'accord pondéré le plus bas	101
Figure 4.1	Distribution géographique des normes et certifications sélectionnées	117
Figure A I.1	Matrice Consolidée de Durabilité (MCD)	126

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ABM	Modélisation basée sur des agents
AEC	Architecture, Ingénierie et Construction
IA	Intelligence Artificielle
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BEM	Modélisation énergétique des bâtiments
BIM	Modélisation de l'information du bâtiment
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Method
CÉR	Comité d'éthique de la recherche
CFD	Dynamique des fluides computationnelle
CIBSE	Chartered Institution of Building Services Engineers
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (Conseil allemand pour la construction durable)
DSR	Recherche en sciences de la conception
DT	Jumeaux numériques
EC	Carbone incorporé
EPD	Déclaration environnementale des produits
ÉTS	École de Technologie Supérieure
GCN	Réseaux de convolution de graphes
GRI	Global Reporting Initiative
GRIDD	Groupe de recherche en intégration et développement durable en environnement bâti
HBIM	Modélisation de l'information du bâtiment patrimonial

HVAC	Chauffage, Ventilation et Conditionnement de l'Air
ICV	Véhicules intelligents et connectés
IEA	Agence Internationale de l'Énergie
IGBC	Indian Green Building Council
IOT	Internet des objets
ISO	Organisation Internationale de Normalisation
LBC	Living Building Challenge
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
ACV	Analyse du cycle de vie
MCD	Matrice Consolidée de Durabilité
MCDA	Analyse multicritère
NBIMS	Norme nationale de modélisation de l'information du bâtiment
NIBS	National Institute of Building Sciences
NZEB	Bâtiment à énergie quasi nulle
OGNB	Conseil autrichien pour la construction durable
PHI	Institut de la maison passive
PIEVC	Comité de vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques
QGIS	Système d'information géographique quantique
R	Langage de programmation R
SASB	Conseil des normes de comptabilité de la durabilité
ODD	Objectifs de Développement Durable
USGBC	U.S. Green Building Council
COV	Composés Organiques Volatils

RV	Réalité virtuelle
DEEE	Déchets d'équipements électriques et électroniques
XGB	Gradient Boosting Extrême

INTRODUCTION

Contexte et problématique

L'industrie des actifs bâtis se présente comme une pierre angulaire du développement économique mondial, pourtant son impact environnemental dresse un tableau saisissant des défis inhérents à l'équilibre entre progrès et durabilité. Les statistiques récentes soulignent l'empreinte environnementale substantielle de l'industrie : elle contribue à environ 37 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre liées à l'énergie et aux processus (United Nations Environment Programme, 2024). De plus, la consommation d'énergie du secteur, en 2022, est restée un moteur principal des émissions de carbone de l'économie mondiale, marquant un niveau record d'émissions de CO₂ liées à l'énergie à 36,8 milliards de tonnes (IEA, 2023). Cette situation s'accentue par la responsabilité de l'industrie pour environ 40 % de la consommation mondiale de matières premières (Heinrich & Lang, 2019), illustrant la gravité de l'équilibre entre développement économique et durabilité environnementale.

Face à ces défis, la Modélisation de l'Information du Bâtiment (BIM) a émergé comme un outil transformateur. Le BIM, défini comme une représentation numérique des caractéristiques physiques et fonctionnelles d'une installation, facilite une ressource de connaissance partagée pour les informations sur une installation, formant une base fiable pour les décisions pendant son cycle de vie, et ce dès sa conception (NBIMS, 2007). L'évolution du BIM vers des modèles multidimensionnels, connus sous le nom de modélisation nD, intègre divers aspects tels que le temps (4D), le coût (5D) et la durabilité (6D) (Hire et al., 2022). Le concept du BIM 6D incorpore directement les considérations de durabilité dans le processus de construction, permettant à l'industrie d'améliorer les performances environnementales grâce à la transformation numérique. Cette avancée promet d'améliorer l'approche de l'industrie en matière de responsabilité environnementale en permettant des pratiques de construction plus efficaces et durables.

En parallèle, des certifications et normes de construction comme LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen), ISO 14001 (Organisation Internationale de Normalisation) et la série GRI 200 (Global Reporting Initiative) ont été développées pour promouvoir des résultats durables. Cependant, la prolifération de ces systèmes de certification a introduit un nouveau défi : un paysage fragmenté de critères de durabilité qui complique leur application et intégration dans les pratiques de construction. Bien que ces systèmes visent à promouvoir la durabilité, la diversité et la complexité de leurs indicateurs créent une approche fragmentée qui peut entraver une mise en œuvre efficace (Giama & Papadopoulos, 2012; Heinrich & Lang, 2019).

Cette thèse se positionne à l'intersection de ces défis, cherchant à mieux encadrer la notion du BIM 6D à travers le prisme des certifications et normes de durabilité, offrant une voie vers des pratiques de durabilité plus intégrées et efficaces dans l'industrie des actifs bâtis. En explorant l'intégration du BIM 6D dans le contexte de ces systèmes de certification et normes, la recherche vise à fournir des insights sur une approche plus unifiée et efficace de la durabilité dans l'industrie des actifs bâtis. Tirant parti de la puissance des technologies BIM et des jumeaux numériques (DT), qui créent des répliques numériques dynamiques et en temps réel des actifs physiques (Yitmen & Alizadehsalehi, 2021), l'étude aborde les défis environnementaux pressants auxquels l'industrie est confrontée. Les jumeaux numériques améliorent les capacités du BIM en intégrant des données en temps réel et des simulations avancées, offrant ainsi une compréhension complète de la conception, de la construction, de l'exploitation et de la maintenance d'un actif (Boschert et al., 2018).

Portée et objectifs de la recherche

Cette thèse explore l'intégration du BIM et des jumeaux numériques aux objectifs de durabilité dans l'industrie des actifs bâtis, guidée par la méthodologie de la recherche en design (Design Science Research, DSR) (Peffers et al., 2007; Vom Brocke et al., 2020). Elle vise spécifiquement à reconceptualiser la notion du BIM 6D, en se concentrant sur son potentiel à

tisser des pratiques de durabilité dans le tissu de l'industrie des actifs bâtis, éclairée par les systèmes de certification des bâtiments et les normes de durabilité. La recherche navigue à travers les complexités de l'alignement des technologies de construction numérique avec les objectifs de durabilité, développant et validant une solution innovante, un artefact, qui mappe habilement les indicateurs de durabilité aux capacités du BIM et des jumeaux numériques.

L'ambition centrale de cet effort consiste à :

1. Identifier et cataloguer les indicateurs de durabilité provenant de diverses certifications et normes, établissant un cadre clair pour le déploiement du BIM et des jumeaux numériques.
2. Évaluer les fonctionnalités et le potentiel du BIM et des jumeaux numériques dans l'opérationnalisation de ces indicateurs de durabilité, visant à améliorer les pratiques durables tout au long du cycle de vie de l'industrie des actifs bâtis.

Cette investigation est structurée autour d'une analyse des systèmes de certification des bâtiments et des normes de durabilité, conduisant à la création d'un cadre consolidé pour l'évaluation de la durabilité. Grâce à ce cadre, l'étude examine les capacités du BIM 6D dans l'opérationnalisation des indicateurs de durabilité. Cette approche multifacette aspire non seulement à enrichir le discours académique, mais aussi à informer les décisions politiques et les pratiques industrielles. En mettant en lumière l'intersection des technologies numériques et de la durabilité, la thèse contribue à l'objectif plus large de promouvoir un développement durable dans l'environnement bâti, offrant des insights et recommandations précieux pour les parties prenantes en politique, dans l'industrie et le milieu universitaire.

Aperçu méthodologique

Dans le cadre de la DSR, l'étude développe et valide un artefact innovant. Ce dernier, intégral à la recherche, inclut la Matrice Consolidée de Durabilité (MCD), un outil conçu pour mapper

les indicateurs de durabilité aux capacités du BIM et des jumeaux numériques. La MCD se présente comme un composant central de l'artefact, incarnant l'application pratique des insights théoriques de la recherche. Grâce à l'approche DSR, caractérisée par des cycles itératifs de développement, de test et de raffinement, la recherche garantit que l'artefact, mis en évidence par la MCD, répond aux défis identifiés de l'opérationnalisation de la durabilité dans l'industrie des actifs bâtis. Cette méthodologie, guidée par les travaux de référence dans le domaine de la DSR (Vom Brocke et al., 2020), assure une voie pragmatique vers l'atteinte des objectifs de la recherche, en mettant l'accent sur la création de valeur à la fois dans les cercles académiques et dans les applications pratiques de l'industrie.

Structure de la thèse

Cette thèse est organisée selon les chapitres suivants :

Chapitre 1, Revue de littérature : Établit les fondations conceptuelles du BIM, de la durabilité dans la construction, et de l'état actuel des normes et systèmes de certification de la durabilité.

Chapitre 2, Méthodologie : Détaille l'approche de recherche et les méthodes employées pour enquêter sur l'intégration de la durabilité dans les processus BIM.

Chapitre 3, Résultats et analyse : Présente les résultats de l'application de la méthodologie de recherche, y compris l'analyse des indicateurs de durabilité et l'évaluation des capacités du BIM et des jumeaux numériques.

Chapitre 4, Discussion et conclusion : Synthétise les résultats de la recherche, discute de leurs implications pour l'industrie et le milieu universitaire, et propose des orientations pour les recherches futures.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Introduction

Ce chapitre inaugure notre exploration du paysage actuel du BIM 6D et de son alignement avec les pratiques de durabilité dans l'industrie des actifs bâtis. Nous posons d'abord les bases en exposant les fondements conceptuels de la durabilité spécifiques au secteur des actifs bâtis, englobant les normes et certifications pertinentes qui guident les pratiques de construction durable. Cela prépare le terrain pour une discussion plus approfondie sur la définition, le développement et les dimensions multifacettes du BIM. Ensuite, la discussion se tourne vers l'intégration du BIM aux jumeaux numériques et leur potentiel collectif pour améliorer la gestion durable des actifs bâtis. Cette introduction sert de prélude à un examen des cadres et méthodologies existants, ouvrant la voie à la définition des capacités du BIM 6D et de son impact sur le développement durable dans le secteur de la construction.

1.2 Fondements conceptuels

1.2.1 Durabilité dans l'industrie des actifs bâtis

La durabilité de l'industrie des actifs bâtis est intrinsèquement liée aux défis urgents posés par le changement climatique, qui menace la santé humaine, la paix et la sécurité à l'échelle internationale. Malgré la nature progressive de la crise climatique, celle-ci n'a pas reçu l'attention immédiate nécessaire pour une action décisive. En 2022, la forte dépendance de l'économie mondiale aux combustibles fossiles a conduit à un niveau record d'émissions de CO₂ liées à l'énergie, atteignant 36,8 milliards de tonnes, soit une croissance de 0,9 % par rapport aux années précédentes (IEA, 2023). L'industrie de la construction, reconnue comme le secteur le plus intensif en ressources, est responsable de l'utilisation de près de 40 % des matières premières (Heinrich & Lang, 2019) et contribue désormais à environ 37 % des

émissions mondiales de gaz à effet de serre liées à l'énergie et aux processus (United Nations Environment Programme, 2024). Cette industrie génère également la plus grande quantité de déchets, impactant négativement l'économie, la société et l'environnement à travers son processus d'économie linéaire (Çimen, 2021).

Le dialogue, initialement ancré dans des discussions internationales fondamentales, concernant la durabilité dans le secteur de la construction a considérablement progressé. Cette évolution a été notablement influencée par la conceptualisation du développement durable comme la capacité à satisfaire les besoins d'aujourd'hui sans compromettre les perspectives des générations futures, un principe articulé dans le rapport Brundtland de 1987 (Keeble, 1988). Le secteur de la construction, malgré ses contributions significatives à l'activité économique, reste enraciné dans des pratiques traditionnelles qui exacerbent la rareté des ressources, l'utilisation de l'énergie et les émissions de gaz à effet de serre. La définition de la construction durable par Charles Kibert en 1994 a marqué un point significatif dans l'adoption de principes écologiques et d'efficacité des ressources au sein de l'industrie (Kibert, 1994). Le World Green Building Council (WorldGBC) a depuis souligné l'importance des bâtiments durables pour réduire l'impact environnemental et améliorer les aspects économiques et sociaux.

La durabilité des bâtiments nécessite de considérer toutes les dimensions – environnementale, économique et socio-culturelle – et implique l'effort d'une large recherche multidisciplinaire incluant divers acteurs. Les avantages potentiels des bâtiments durables sont significatifs, avec des projections indiquant une réduction de 50 % de la demande énergétique du secteur d'ici 2050, des économies substantielles et des avantages sociaux notables, y compris une meilleure qualité intérieure et le bien-être humain (WorldGBC, 2024).

La reconnaissance de la durabilité, il y a plus de trois décennies, par la Commission Brundtland a suscité des débats continus sur sa définition, son application et son évaluation dans l'environnement bâti. Le rôle de l'industrie de la construction en tant que grande consommatrice d'énergie et contributrice aux impacts environnementaux négatifs a fait de la durabilité une préoccupation mondiale. Des initiatives telles que la fondation du US Green

Building Council et celle du UK Green Building Council, ainsi que des législations et des normes visant à améliorer la performance des bâtiments, soulignent la nécessité cruciale de pratiques durables dans l'industrie des actifs bâtis (Anwar, 2022).

1.2.2 Normes et certifications de durabilité dans l'industrie des actifs bâtis

L'industrie de l'environnement bâti influence significativement la durabilité en raison de ses empreintes environnementales considérables. En réponse, une variété de normes et de certifications de durabilité ont émergé, y compris ISO 14001, ISO 50001, et la série Global Reporting Initiative (GRI), fournissant des cadres pour que les organisations gèrent leurs impacts environnementaux et améliorent la durabilité de leurs opérations. Des initiatives spécifiquement adaptées au secteur du bâtiment, telles que BREEAM, HQE et LEED, visent à relever les défis uniques associés à la conception et aux pratiques de construction des bâtiments (Bruckner & Strohmeier, 2018).

L'efficacité de ces certifications de durabilité dépend toutefois de divers facteurs, notamment la localisation géographique, les conditions locales de l'industrie du bâtiment et les cadres réglementaires en vigueur. Certaines certifications comme BREEAM, HQE et LEED ont une applicabilité mondiale, contrairement à d'autres telles que DGNB ou l'Écolabel de l'UE, qui ciblent des régions spécifiques (Giama & Papadopoulos, 2012; Heinrich & Lang, 2019). Malgré leurs différences, toutes ces certifications convergent vers un objectif unique : réduire l'impact environnemental et promouvoir le développement durable. Le paysage des certifications est complexe, et naviguer dedans devient particulièrement difficile lorsque plusieurs certifications s'appliquent à un seul projet. Cette tendance, de plus en plus observée dans l'industrie immobilière européenne, entraîne souvent de la confusion et entrave l'adoption plus large des pratiques de durabilité (Sánchez Cordero et al., 2019). De plus, bien que les certifications actuelles se concentrent principalement sur les aspects environnementaux, il existe une reconnaissance croissante de la nécessité d'inclure les dimensions sociales et économiques de la durabilité.

Des progrès vers une approche plus inclusive de la durabilité dans l'environnement bâti sont en cours. Le cadre Level(s) de l'Union européenne vise à harmoniser les certifications de durabilité des bâtiments dans les pays de l'UE, en alignant les Systèmes de Classification des Bâtiments Verts (GBRS) avec les Objectifs de Développement Durable (ODD) des Nations Unies (Sánchez Cordero et al., 2019). Les méthodologies d'analyse du cycle de vie (ACV), qui évaluent l'impact environnemental d'un bâtiment tout au long de son cycle de vie, sont de plus en plus intégrées dans les certifications de durabilité (Oviir, 2016). Cependant, l'intégration de l'ACV dans ces certifications et la qualité des données pour ces évaluations varient, soulignant la nécessité d'une plus grande cohérence et transparence.

Les certifications et normes de durabilité influencent également les dynamiques du marché et les comportements des parties prenantes, augmentant la sensibilisation du public, favorisant le développement des politiques et contribuant à la réduction de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂ (Giama & Papadopoulos, 2012). Ces outils soulignent l'importance d'intégrer la durabilité à chaque étape du cycle de vie d'un bâtiment, de la conception et la construction à l'exploitation et la maintenance.

En résumé, naviguer dans le paysage complexe des normes et certifications de durabilité est crucial pour favoriser un environnement bâti durable. Les recherches futures devraient viser à clarifier les voies de conformité et à résoudre les divergences entre ces systèmes, ainsi qu'à affiner et standardiser les critères d'évaluation de la durabilité. De tels efforts sont essentiels pour progresser vers l'objectif global d'un environnement bâti plus durable (Jaberi & Poirier, 2024).

1.2.3 Modélisation de l'Information du Bâtiment (BIM)

1.2.3.1 Définition et avantages

La numérisation dans le secteur de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction (AEC), facilitée par le BIM, répond aux complexités et défis inhérents à l'industrie, tels que la faible productivité, les coûts élevés et le partage inefficace des informations (Shirowzhan & Zhang,

2020). Le BIM, évoluant depuis ses débuts à la fin des années 1970 avec le concept de Building Product Model de Charles M. Eastman, représente un passage des logiciels CAO traditionnels vers une approche numérique plus intégrée (Sun et al., 2015). Ce passage est marqué par la capacité du BIM à encapsuler les caractéristiques physiques et fonctionnelles des projets de construction sous un format numérique, servant de répertoire complet pour les données du projet (NBIMS, 2007).

Défini par le National Institute of Building Sciences (NIBS) des États-Unis comme une « représentation numérique des caractéristiques physiques et fonctionnelles d'une installation », le BIM facilite la connaissance partagée et l'interopérabilité entre les parties prenantes, améliorant l'efficacité des échanges d'informations (NBIMS, 2007). Succar affine cette définition, décrivant le BIM comme un ensemble de processus et de technologies qui gèrent les dessins en 3D et les données du projet tout au long du cycle de vie d'un bâtiment (Succar, 2009).

L'adoption du BIM apporte de nombreux avantages, notamment un potentiel de gains d'efficacité significatifs à travers différentes phases de projet, de la pré construction et la conception à la construction et la post-construction (Ullah et al., 2019). Cela permet des processus plus rapides et plus efficaces, une meilleure qualité de conception, des coûts de cycle de vie contrôlés et une durabilité environnementale améliorée (Azhar, 2011). Les capacités de collaboration en temps réel du BIM permettent aux parties prenantes d'identifier et de rectifier facilement les erreurs et les incompatibilités, conduisant à une meilleure efficacité et productivité (Hire et al., 2022). De plus, le BIM facilite la prise de décision précoce et l'analyse approfondie des phases initiales, entraînant des économies substantielles sur le cycle de vie et la production de bâtiments performants (Begić & Galić, 2021).

En essence, le BIM signifie un changement de paradigme dans l'industrie AEC, promouvant une approche plus organisée, collaborative et efficace de la gestion des projets de construction et contribuant à l'objectif plus large d'atteindre la durabilité dans l'environnement bâti.

1.2.3.2 Dimensions du BIM

Le BIM a significativement influencé le secteur AEC en offrant une approche multidimensionnelle pour gérer des projets de construction complexes. Traditionnellement associé à la modélisation 3D pour la visualisation, le périmètre du BIM s'est élargi pour inclure des dimensions supplémentaires, chacune étant adaptée pour améliorer des capacités spécifiques à diverses étapes du cycle de vie d'un bâtiment (Hire et al., 2022). La transition du BIM 3D au BIM nD marque un passage de la simple représentation spatiale à l'intégration du temps (4D), des coûts (5D), de la durabilité (6D) et au-delà, abordant une vaste gamme d'informations de conception nécessaires tout au long du cycle de vie d'un bâtiment. La dimension 4D intègre la planification et la programmation de la construction en incorporant des données temporelles dans le modèle BIM, améliorant ainsi la gestion de projet et la communication entre les parties prenantes (Koutamanis, 2020). Par ailleurs, le BIM 5D introduit l'estimation des coûts en temps réel, facilitant une budgétisation efficace et une supervision financière (Vigneault et al., 2020).

Émergeant comme un candidat solide pour la dimension 6D, la durabilité intègre des aspects de performance du bâtiment tels que la réduction de l'impact environnemental, l'efficacité énergétique et la qualité acoustique. Une enquête en ligne a révélé que 86 % des praticiens de 28 pays de l'UE soutenaient l'inclusion de la durabilité en tant que composant 6D du BIM. En outre, la dimension 7D se concentre sur la gestion des installations (FM), visant à optimiser la maintenance et l'exploitation tout au long du cycle de vie de l'installation (Charef et al., 2018).

Malgré la compréhension établie des dimensions jusqu'à la 7D, l'exploration continue de dimensions supplémentaires persiste. Ces dimensions supplémentaires soulignent la nature évolutive du BIM et son potentiel à intégrer de nouvelles technologies et méthodologies, reflétant son rôle en tant que plateforme pour la conception collaborative et la gestion de projet (Ganiyu & Egbu, 2018).

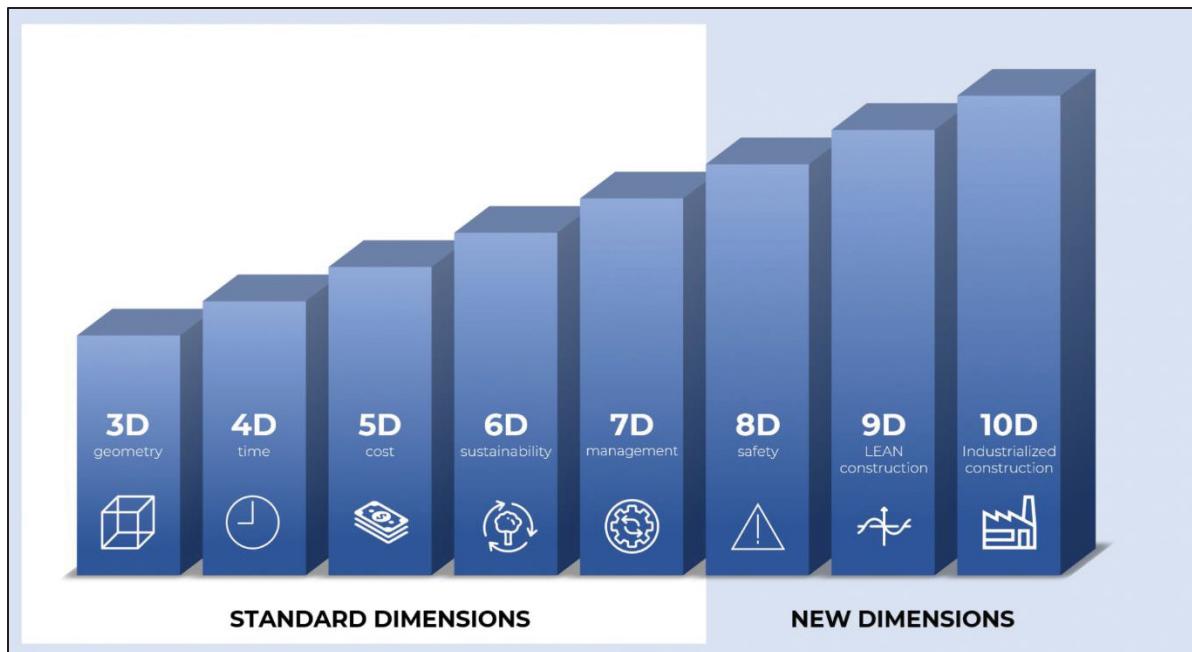


Figure 1.1 Dimensions du BIM

Tirée de BuildEXT, (2022, p.1)

L'intégration du BIM aux différentes phases de projet, de la planification du site à la post-construction, démontre sa capacité à rationaliser les processus, améliorer la communication et optimiser les résultats globaux des projets. En réduisant les difficultés d'interface et en facilitant un environnement collaboratif, le BIM transcende sa fonction originale d'outil de référence, devenant une plateforme complète pour gérer le cycle de vie d'un bâtiment (Ritu, 2023).

En résumé, l'expansion du BIM vers des modèles nD représente un changement de paradigme dans la gestion et l'exécution des projets de construction. En embrassant des dimensions au-delà de la 3D, le BIM offre un cadre robuste pour relever les défis multifacettes des projets de construction modernes, de l'amélioration de l'efficacité et de la communication à l'optimisation de la durabilité et des performances opérationnelles.

1.2.3.3 BIM : Une fondation pour la conception et la construction durables

L'avènement du BIM a catalysé une transformation significative dans le secteur AEC. Introduit par Autodesk en 2002, le BIM dépasse les outils de dessin traditionnels en fournissant une plateforme multidimensionnelle et interactive qui encapsule les caractéristiques physiques et fonctionnelles d'un bâtiment dans un format numérique. Cette innovation a marqué un changement de paradigme vers un processus intégré et coordonné numériquement, soutenant la gestion du cycle de vie des bâtiments avec des représentations 3D intelligentes et informatives (Preece et al., 2016). L'essence du BIM réside dans sa capacité à faciliter un espace de travail collaboratif parmi divers acteurs – architectes, ingénieurs, urbanistes et entrepreneurs – en améliorant le processus de prise de décision en mettant l'accent sur la durabilité (Succar, 2009).

L'évolution du BIM de la modélisation 3D à la modélisation 6D, où la sixième dimension se concentre explicitement sur la durabilité, illustre le rôle intégral de cette technologie dans les évaluations de durabilité. Cette dimension 6D du BIM permet des analyses complètes des indicateurs de durabilité environnementale, économique et sociale tout au long du cycle de vie d'un bâtiment, facilitant une prise de décision éclairée cruciale pour les objectifs de développement durable. Elle sert d'outil pour l'évaluation de la durabilité du cycle de vie, permettant aux concepteurs et aux décideurs de faire des choix éclairés concernant la conception durable et la gestion des installations. Cette capacité souligne le potentiel transformateur du BIM pour faciliter la durabilité dans l'environnement bâti (Habib & Kadhim R., 2020).

De plus, l'application du BIM dans les phases de planification et de conception est cruciale pour les alternatives de conception durable, la modélisation énergétique et l'intégration aux systèmes de notation de durabilité tels que LEED (Jalaei & Jrade, 2015). La technologie soutient l'évaluation et l'amélioration des références de durabilité des bâtiments, démontrant la capacité du BIM à réduire significativement l'empreinte environnementale des bâtiments. En promouvant l'efficacité énergétique et en améliorant la performance des bâtiments et le

confort des occupants, le BIM s'aligne sur les agendas mondiaux de durabilité, garantissant le développement d'espaces efficaces, rentables, écologiques et socialement responsables (Ahmad & Thaheem, 2018).

L'incorporation du BIM dans les pratiques de conception et de construction durables représente une approche holistique de la gestion des environnements bâtis. Il prône non seulement l'efficacité énergétique et la réduction de l'impact environnemental, mais aussi la viabilité économique et le bien-être social. En tant que tel, le rôle du BIM dans la durabilité transcende les méthodologies de construction traditionnelles, le positionnant comme un outil essentiel pour atteindre le développement durable dans l'industrie des actifs bâtis.

Cette intégration élargie du BIM dans les pratiques de conception et de construction durables met en évidence son application globale dans divers aspects de la durabilité, y compris la gestion de l'eau, la réduction des déchets et la gestion des matériaux. En facilitant la prise de décisions durables et en soutenant l'obtention de certifications de bâtiments verts, le BIM illustre son rôle multifacette dans la promotion de la durabilité au sein du secteur de la construction. En tirant parti du BIM, les parties prenantes de l'industrie des actifs bâtis sont équipées pour naviguer parmi les complexités des projets de construction modernes avec un accent sur la conservation écologique, l'efficacité économique et l'équité sociale (Habib & Kadhim R., 2020).

1.2.3.4 Évolution du BIM vers le jumeau numérique (DT)

Le passage du BIM au jumeau numérique dans l'industrie des actifs bâtis représente un saut significatif vers une approche plus sophistiquée, interconnectée et intelligente de la gestion du cycle de vie des projets de construction et des installations. Initialement, le BIM a posé les bases en offrant une représentation numérique des caractéristiques physiques et fonctionnelles d'une installation, servant de ressource de connaissance partagée tout au long du cycle de vie de cette dernière, de la conception à la démolition (Khajavi et al., 2019).

Au fur et à mesure de l'évolution de l'industrie a émergé le concept de jumeaux numériques, représentant une intégration plus dynamique du BIM avec des données en temps réel, des simulations avancées et des modèles numériques complets. Cette transition est marquée par le développement des jumeaux numériques, qui se distinguent des simulations traditionnelles par leur nécessité d'avoir un homologue physique et un réseau de capteurs pour faciliter un flux continu de données entre les mondes physique et virtuel (Boschert et al., 2018).

Les jumeaux numériques ont étendu les capacités du BIM au-delà des modèles statiques utilisés lors des phases de conception et de construction, vers des systèmes dynamiques qui améliorent la prise de décision tout au long des phases d'exploitation et de maintenance du bâtiment. Yitmen (2021) fournit une définition succincte d'un jumeau numérique comme « une réplique virtuelle d'un bâtiment ou d'une infrastructure physique qui intègre des données en temps réel, des simulations et des modèles numériques pour fournir une compréhension complète de la conception, de la construction, de l'exploitation et de la maintenance de l'actif. » Cette définition souligne la nature globale des jumeaux numériques, englobant non seulement la conception et la construction, mais aussi les aspects opérationnels et de maintenance d'un bâtiment ou d'une infrastructure, facilitant ainsi une approche de gestion holistique (Yitmen & Alizadehsalehi, 2021).

La transition du BIM aux jumeaux numériques est donc un continuum, représenté dans la Figure 1.2, englobant des niveaux d'intégration allant des applications BIM initiales aux représentations numériques les plus avancées. Ces étapes – allant de « Pas d'utilisation du BIM » à « Modèle numérique mis à jour », « Modèle partagé », « Modèle partagé avec données de capteurs intégrées » et enfin « Jumeau numérique complet » – reflètent les avancées progressives, mais profondes, des techniques de modélisation numérique tout au long du cycle de vie du bâtiment. L'architecture d'un jumeau numérique idéal dans l'environnement bâti intègre des sources de données hétérogènes, en utilisant des couches allant de l'acquisition de données à l'application, soutenant ainsi une multitude de simulations et d'analyses prédictives (Khajavi et al., 2019).

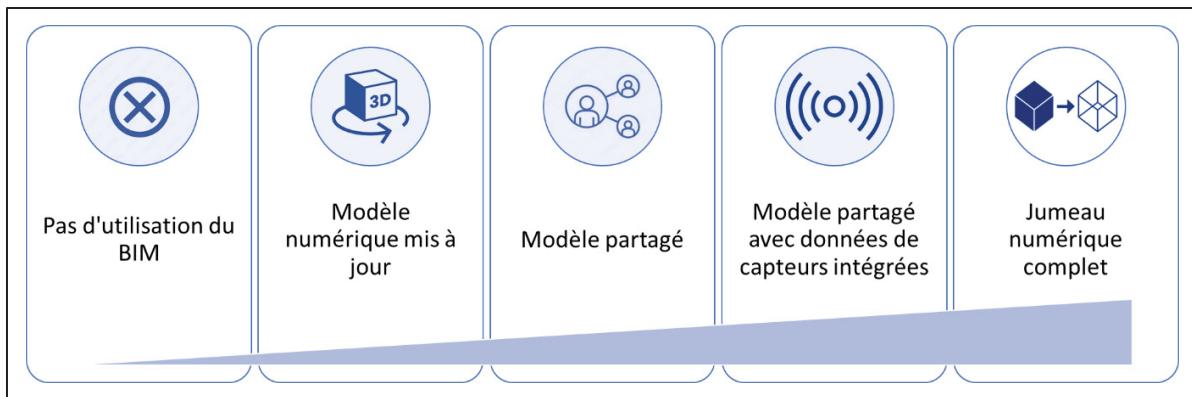


Figure 1.2 Modèle adapté du BIM à la progression du jumeau numérique

Les jumeaux numériques représentent un changement de paradigme, intégrant les données des capteurs avec les modèles numériques pour permettre la surveillance en temps réel, la maintenance prédictive et l'optimisation opérationnelle. Cela est évident dans l'adoption de prédictions en temps réel et d'outils de prise de décision avancés facilités par l'intégration du BIM, de l'Internet des objets (IoT) et des algorithmes d'apprentissage automatique, comme le montrent les études proposant des cadres pour la simulation de construction automatisée et la gestion opérationnelle des bâtiments (Deng et al., 2021).

Le cadre conceptuel d'un jumeau numérique idéal dans l'environnement bâti, tel que proposé dans diverses études, inclut une architecture systématique qui intègre des sources de données hétérogènes, en utilisant des couches allant de l'acquisition des données à l'application. Cette architecture permet l'intégration dynamique des données avec les technologies BIM pour soutenir diverses simulations et analyses prédictives, visant à améliorer la conception, la construction et l'évaluation des performances des bâtiments et des infrastructures urbaines (Khajavi et al., 2019).

En conclusion, l'évolution du BIM vers les jumeaux numériques marque une avancée significative dans l'industrie des actifs bâties, offrant un cadre plus nuancé, interconnecté et intelligent pour la gestion du cycle de vie complet des bâtiments et des infrastructures. Grâce à l'intégration des données en temps réel, des analyses prédictives et des modèles numériques

complets, les jumeaux numériques promettent de transformer l'industrie en améliorant l'efficacité, la durabilité et la résilience dans l'environnement bâti.

1.2.3.5 Jumeaux numériques : Amélioration de la performance de durabilité en temps réel

Les jumeaux numériques représentent la prochaine frontière dans la quête de durabilité au sein de l'industrie des actifs bâties, s'appuyant sur les capacités fondamentales du BIM. En offrant une représentation numérique dynamique et en temps réel des actifs physiques, les jumeaux numériques permettent un flux continu de données entre les mondes virtuel et physique. Cette intégration des données en temps réel permet de surveiller et d'optimiser les performances des bâtiments, faisant des progrès significatifs en matière d'efficacité énergétique et de durabilité opérationnelle (S. Liu, 2021).

L'application des jumeaux numériques va au-delà de la simulation de la performance énergétique pour englober une analyse énergétique complète du cycle de vie. Par exemple, les jumeaux numériques ont été utilisés pour optimiser la forme et l'orientation des bâtiments à plusieurs étages, réduisant ainsi considérablement la consommation d'énergie tout en maximisant les avantages environnementaux et économiques. Ce niveau d'analyse et d'optimisation souligne l'impact profond que les jumeaux numériques peuvent avoir sur la durabilité des bâtiments, depuis les premières étapes de conception jusqu'à la phase opérationnelle (Sabah Haseeb et al., 2023).

De plus, la technologie des jumeaux numériques joue un rôle crucial dans la gestion des énergies renouvelables. En intégrant des systèmes photovoltaïques avancés dans les rénovations de bâtiments historiques, les jumeaux numériques aident à relever des défis tels que l'acceptabilité sociale et l'impact esthétique, démontrant un flux de travail collaboratif incluant l'Heritage Building Information Modelling (HBIM) et la sélection des technologies photovoltaïques appropriées. Cette approche respecte non seulement l'intégrité architecturale des bâtiments patrimoniaux, mais améliore également leur autosuffisance énergétique (Lucchi & Agliata, 2023).

La surveillance énergétique en temps réel est une autre capacité significative des jumeaux numériques, offrant des informations précises et opportunes sur les modèles de consommation énergétique dans les constructions résidentielles de grande hauteur. Cette capacité facilite une approche proactive de la gestion de l'énergie, permettant des ajustements en temps réel pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les coûts opérationnels (S. Liu, 2021).

L'intégration des jumeaux numériques à la dynamique des fluides computationnelle (CFD) pour l'analyse thermique représente une approche innovante pour évaluer et atténuer l'impact de l'infrastructure sur le dégel du pergélisol. En recommandant des adaptations de conception pour la stabilisation des sols et la réduction du stress thermique, les jumeaux numériques contribuent au développement de bâtiments plus résilients aux effets du changement climatique, démontrant le potentiel des jumeaux numériques à relever des défis de durabilité plus larges tels que le changement climatique et l'épuisement des ressources (Younis et al., 2023).

En résumé, les jumeaux numériques améliorent la performance de durabilité en temps réel en tirant parti du flux continu de données pour l'optimisation des opérations des bâtiments. Leurs capacités en simulation de la performance énergétique, en gestion des énergies renouvelables et en surveillance en temps réel sont essentielles pour faire progresser les objectifs de durabilité dans l'environnement bâti. En intégrant les jumeaux numériques dans la gestion du cycle de vie des actifs bâties, les parties prenantes peuvent atteindre une meilleure efficacité opérationnelle, réduire l'impact environnemental et améliorer la viabilité économique, marquant une avancée significative dans la quête de durabilité de l'industrie.

1.3 La notion du BIM 6D : Un nouveau paradigme

Le concept du BIM 6D représente une approche transformative qui intègre la durabilité dans le cycle de vie des actifs bâties, soulignant le rôle crucial qu'il joue dans l'amélioration des résultats environnementaux, économiques et sociaux. Le BIM 6D va au-delà des paramètres

de conception traditionnels pour inclure des indicateurs de durabilité détaillés, permettant une analyse complète des performances d'un bâtiment, de sa conception à sa démolition.

D'un point de vue environnemental, le BIM 6D facilite le développement de modèles énergétiques qui simulent la performance réelle des bâtiments, soutenant ainsi les processus décisionnels visant à atteindre des normes élevées d'efficacité énergétique et de durabilité. Cette dimension du BIM utilise les informations des dimensions précédentes, notamment les définitions géométriques et les spécifications des matériaux, pour prévoir et analyser la consommation d'énergie, orientant la conception et l'exploitation de nouveaux bâtiments et de bâtiments existants vers la durabilité. Pour les nouvelles constructions, cette approche s'aligne avec les normes des Bâtiments à Énergie Quasi Nulle (NZEB), tandis que pour les structures existantes, elle permet une analyse holistique des impacts d'une rénovation, en se concentrant sur les améliorations de l'efficacité énergétique. Cette méthodologie s'est avérée cruciale pour orienter les efforts de réhabilitation vers l'amélioration de l'efficacité énergétique, offrant ainsi une meilleure qualité et un meilleur confort pour l'utilisation des bâtiments (Montiel-Santiago et al., 2020).

Le BIM 6D facilite un large éventail d'analyses qui surpassent de loin les modèles énergétiques de base. Par exemple, Lucchi & Agliata (2023) ont détaillé un flux de travail collaboratif au sein de l'Heritage Building Information Modelling (HBIM) pour harmoniser les systèmes photovoltaïques avancés dans les bâtiments historiques, relevant les défis de l'acceptabilité sociale et de l'intégration esthétique. Cet exemple illustre comment le BIM 6D transcende les simples simulations énergétiques, intégrant la gestion des énergies renouvelables dans la conservation des édifices historiques. De même, le travail de Younis et al. (2023) démontre l'utilité du BIM pour réaliser des analyses thermiques dans les bâtiments nordiques se trouvant sur du pergélisol. En intégrant le BIM à la dynamique des fluides computationnelle (CFD), l'étude offre des perspectives sur les adaptations de conception qui stabilisent le sol et réduisent les stress thermiques, montrant le rôle du BIM dans l'adaptation des environnements bâties aux défis posés par le changement climatique.

D'un point de vue économique, l'adoption du BIM 6D contribue à la durabilité financière des projets de construction en permettant la prise de décision précoce et l'évaluation d'alternatives de conception rentables. Cette capacité garantit que les pratiques durables sont économiquement viables, facilitant des estimations de coûts détaillées et des retours rapides sur les implications financières des choix de conception. Par exemple, l'intégration de l'analyse de données en temps réel pour les systèmes énergétiques, comme l'ont étudié Lv et al. (2023), s'appuie sur les bases fournies par le BIM 6D pour permettre l'optimisation du stockage d'énergie thermique dans les bâtiments intelligents. Cette incorporation de matériaux à changement de phase (PCM) dans les modèles de jumeaux numériques, qui représentent une évolution du BIM, fournit une analyse et une optimisation en temps réel du stockage et de la distribution de l'énergie, mettant en évidence les avantages économiques de la maintenance prédictive et de l'efficacité énergétique.

D'un point de vue social, le BIM 6D améliore la viabilité et la sécurité des environnements bâties. Il joue un rôle essentiel dans l'amélioration de la qualité environnementale intérieure grâce à une optimisation de l'éclairage naturel et de la ventilation, ce qui, en retour, a un impact positif sur la santé et le confort des occupants. De plus, les méthodologies BIM 6D, comme celle démontrée par Costa et al. (2023) avec leur Système d'Avertissement Précoce de Ventilation (VEWS), intègrent l'IoT, le BIM et l'IA pour prévoir et gérer la qualité de l'air intérieur dans les espaces de travail. Cette innovation est particulièrement pertinente en réponse à des préoccupations de santé publique telles que la COVID-19, soulignant l'importance du BIM 6D pour promouvoir la durabilité sociale en garantissant que les environnements bâties sont non seulement efficaces et durables, mais aussi propices au bien-être de leurs occupants.

En outre, le BIM 6D aide à obtenir des certifications de bâtiments verts telles que LEED, BREEAM et DGNB en facilitant l'intégration des sources d'énergie renouvelables et l'utilisation efficace de la lumière naturelle. Cela favorise non seulement les objectifs de durabilité environnementale, mais aussi les avantages économiques et sociaux en améliorant la performance des bâtiments et le confort des occupants. L'application du BIM 6D dans les

projets orientés vers la durabilité démontre un engagement à minimiser l'impact environnemental du secteur de la construction (Montiel-Santiago et al., 2020).

En résumé, le BIM 6D offre un cadre complet pour intégrer la durabilité dans la construction et l'exploitation des actifs bâtis. En abordant les dimensions environnementales, économiques et sociales de la durabilité, le BIM 6D émerge comme un outil crucial pour faire progresser le développement durable au sein de l'industrie de la construction. Son application favorise l'adoption de pratiques de construction durables, conduisant à la création d'environnements bâtis efficaces, rentables et socialement responsables.

1.4 Synergie entre BIM et jumeaux numériques pour la gestion durable des bâtiments

La confluence des technologies BIM et des DT favorise un cadre robuste pour la gestion durable des bâtiments, tirant parti des capacités de représentation numérique complète du BIM avec la surveillance et l'analyse dynamiques en temps réel fournies par les DT. Cette synergie améliore les processus décisionnels, l'efficacité opérationnelle et les résultats en matière de durabilité tout au long du cycle de vie du bâtiment.

Le rôle fondamental du BIM dans cette intégration ne peut être surestimé. Il sert d'outil essentiel dans les phases de planification, de conception et de construction, facilitant la collaboration entre architectes, ingénieurs et professionnels de la construction. En offrant une représentation numérique des caractéristiques physiques et fonctionnelles d'un bâtiment, le BIM améliore la gestion de projet et permet aux parties prenantes de prendre des décisions éclairées en gardant la durabilité à l'esprit. La transition des modèles BIM statiques vers les systèmes DT dynamiques représente une évolution vers l'optimisation continue des performances des bâtiments pendant la phase opérationnelle, en utilisant des données en temps réel pour informer les ajustements proactifs (GhaffarianHoseini et al., 2017).

Les jumeaux numériques élèvent les capacités du BIM en permettant une surveillance continue des performances d'un bâtiment, fournissant ainsi aux parties prenantes des retours en direct

sur la consommation d'énergie, l'efficacité opérationnelle et le confort des occupants. Ces données en temps réel sont essentielles pour mettre en œuvre des pratiques durables et atteindre l'excellence opérationnelle. Le rôle des DT dans l'amélioration des performances de durabilité en temps réel est exemplifié par leur application dans la simulation de performance énergétique, la gestion des énergies renouvelables et l'analyse énergétique du cycle de vie, qui contribuent de manière significative à réduire l'empreinte environnementale d'un bâtiment (S. Liu, 2021).

De plus, l'intégration du BIM et des DT soutient la gestion durable des bâtiments en facilitant la conformité aux normes environnementales et en aidant à l'obtention de certifications de bâtiments verts telles que LEED et BREEAM. Grâce à des données détaillées et précises sur les performances des bâtiments, ces technologies simplifient le processus de certification, permettant à davantage de bâtiments de répondre à des normes de durabilité élevées et de contribuer à la conservation de l'environnement (Ahmad & Thaheem, 2018).

La synergie entre le BIM et les DT dépasse l'efficacité énergétique et la gestion environnementale, englobant également les aspects de la durabilité sociale. En améliorant la précision de la surveillance de la qualité environnementale intérieure et en optimisant les conceptions des bâtiments pour le confort et la sécurité des occupants (Harode et al., 2023), cette approche intégrée aborde le bien-être holistique des occupants des bâtiments, soulignant la nature multifacette de la durabilité dans l'environnement bâti.

En résumé, l'application synergique des technologies BIM et DT représente une approche prospective de la gestion durable des bâtiments, offrant une stratégie complète pour améliorer la conception, la construction et l'exploitation des environnements bâties. Cette intégration favorise non seulement l'efficacité énergétique et la durabilité environnementale, mais assure également la viabilité économique et le bien-être social, en alignement avec les objectifs plus larges du développement durable. En tirant parti des forces combinées du BIM et des DT, l'industrie de la construction est bien équipée pour relever les défis de la durabilité, ouvrant la

voie au développement d'environnements bâtis efficaces, résilients et harmonieux avec les objectifs mondiaux de durabilité.

1.4.1 Conclusion : Une approche holistique de la durabilité

L'intégration du BIM et des DT aux objectifs de durabilité représente une approche holistique de la construction et de la gestion des environnements bâtis, en alignement avec les agendas mondiaux de durabilité pour garantir le développement d'espaces efficaces, écologiques, économiquement viables et socialement responsables. En tirant parti de ces technologies, les parties prenantes de l'industrie des actifs bâtis sont équipées pour relever les défis de la durabilité, ouvrant la voie au développement d'environnements bâtis en harmonie avec les principes de durabilité, d'efficacité et de responsabilité sociale.

En résumé, le BIM et les DT se positionnent comme des outils essentiels dans la quête du développement durable au sein de l'industrie des actifs bâtis. Leur application complète soutient une approche transformative de la durabilité, équipant les parties prenantes pour naviguer parmi les complexités des projets de construction modernes en mettant l'accent sur la conservation écologique, l'efficacité économique et l'équité sociale. Grâce à l'intégration du BIM et des DT, l'industrie des actifs bâtis est prête à faire des progrès significatifs vers un avenir durable, démontrant le potentiel des technologies numériques avancées pour favoriser le développement durable dans le secteur de la construction.

1.5 Résumé du chapitre

Ce chapitre a posé les bases pour comprendre l'intersection du BIM 6D avec la durabilité dans l'industrie des actifs bâtis. Il commence par détailler les fondements conceptuels du BIM, y compris son évolution et l'importance d'intégrer les normes et certifications de durabilité. La revue de littérature met ensuite en lumière le potentiel du BIM 6D à faire progresser significativement les pratiques de gestion durable au sein de l'industrie.

Les perspectives tirées de cette revue de littérature sont cruciales pour cette thèse, en particulier pour le développement d'un cadre visant la durabilité en utilisant le BIM 6D. Cette exploration forme la base de l'approche méthodologique de la thèse, suivant la méthodologie de la recherche en design (Design Science Research, DSR). Cette approche est centrée sur la conceptualisation, le développement et la validation d'un cadre qui intègre les indicateurs de durabilité aux capacités du BIM et des DT, visant à améliorer les performances en matière de durabilité tout au long du cycle de vie des actifs bâtis.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

2.1 Introduction

Cette étude utilise la méthodologie de la recherche en design (Design Science Research, DSR) pour explorer comment le BIM et les jumeaux numériques (DT) peuvent soutenir la réalisation des objectifs de durabilité dans l'industrie des actifs bâtis. Reconnaissant la complexité et la multidimensionnalité de l'intégration des technologies numériques aux objectifs de durabilité, la DSR offre un cadre pour développer et évaluer des solutions innovantes. Ce chapitre décrit le cheminement méthodologique suivi depuis l'identification du problème de recherche au développement et à la validation d'un artefact, qui fait correspondre les indicateurs de durabilité aux capacités du BIM et des DT.

2.2 Méthodologie de la recherche en design (DSR)

La méthodologie de la recherche en design (DSR) est conçue pour la création et l'examen d'artefacts visant à résoudre des problèmes pratiques (De Sordi, 2021). Ces artefacts, résultant du processus, servent de solutions dans des contextes de recherche ou industriels, répondant à des problématiques spécifiques par des moyens innovants (Simon, 1996). La DSR opère selon un paradigme distinct de la science naturelle, qui ne se concentre pas sur la compréhension de la réalité, mais sur la création de nouveaux concepts, modèles, méthodes et systèmes pour servir des objectifs déterminés (March & Smith, 1995).

La méthodologie est structurée autour d'une séquence de six activités clés : identifier le problème et sa motivation ; définir les objectifs de la solution ; concevoir et développer l'artefact ; démontrer son application ; évaluer son efficacité ; et enfin, communiquer les résultats et le processus (Peffers et al., 2007). Cette approche structurée assure une exploration

et une validation complètes des solutions proposées, facilitant leur application dans l'intégration de systèmes tels que le BIM et les jumeaux numériques.

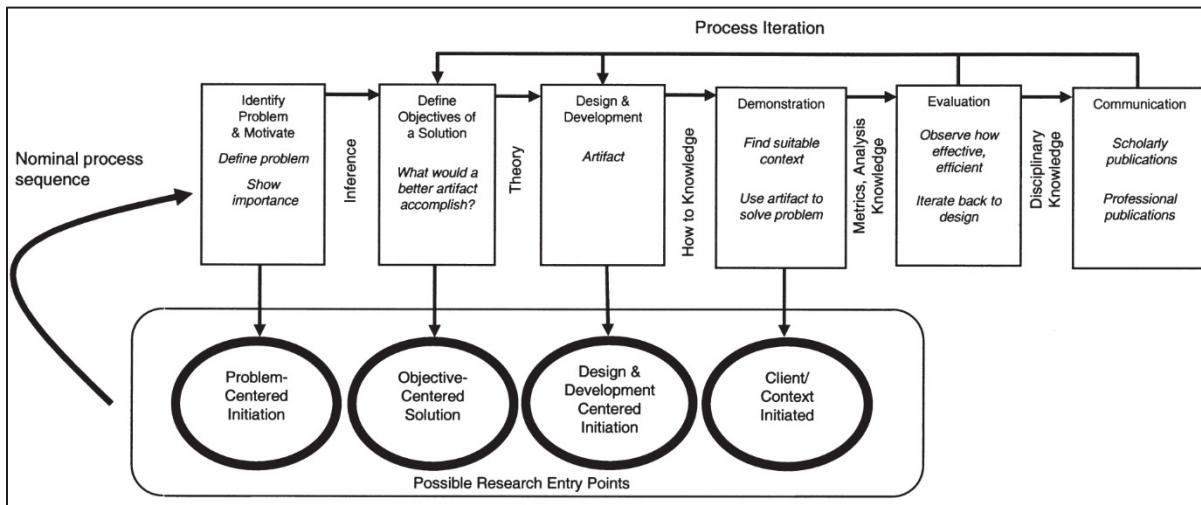


Figure 2.1 Modèle de processus DSR

Tirée de Peffers et al. (2007, p.54)

2.3 Mise en œuvre de la DSR dans cette étude

L'adoption de la DSR dans cette thèse est justifiée par sa capacité à aborder des problèmes complexes où les méthodes de recherche empirique traditionnelles peuvent s'avérer insuffisantes. Plus précisément, la DSR fournit une approche structurée pour :

- Conceptualiser un artefact qui intègre les indicateurs de durabilité avec les capacités du BIM et des DT,
- Développer une solution innovante, dans ce cas l'artefact, pouvant être appliquée pratiquement dans l'industrie des actifs bâtis,
- Valider l'efficacité et l'efficience de la solution dans des contextes réels.

La méthodologie DSR est opérationnalisée à travers les étapes suivantes, illustrées dans le Tableau 2.1, adaptées pour correspondre au contexte de cette recherche, basées sur les directives fournies par Peffers et al. (2007) et davantage éclairées par vom Brocke et al. (2020).

Le processus DSR est itératif, permettant un raffinement continu de l'artefact basé sur les retours et les conclusions à chaque étape.

Tableau 2.1 Adoption de la méthodologie DSR pour cette recherche

Étape	Description et activité
Identification du problème	Description : Établir la nécessité d'une nouvelle solution pour atteindre les objectifs de durabilité dans l'industrie des actifs bâtis via le BIM et les DT. Activité : Revue de littérature, consultation d'experts
Formulation des objectifs	Description : Déterminer les fonctionnalités spécifiques et les résultats que la solution doit fournir. Activité : Définir les indicateurs de durabilité, capacités du BIM et des DT
Conception de l'artefact	Description : Développer l'artefact en intégrant les indicateurs de durabilité et les capacités du BIM/DT. Activité : Développement de l'artefact, stratégie d'intégration
Démonstration	Description : Appliquer l'artefact dans des environnements réels ou simulés pour illustrer son application et son efficacité. Activité : Revue de littérature sur les études de cas, simulations, etc.
Évaluation	Description : Évaluer de manière critique la performance de l'artefact par rapport à des critères prédéfinis pour identifier des améliorations. Activité : Ateliers, enquêtes, avis d'experts
Communication	Description : Partager les résultats de la recherche, la méthodologie et les implications avec la communauté au sens large pour obtenir des retours et un développement ultérieur. Activité : Publications académiques, présentations dans l'industrie

Cette section a posé les bases pour les chapitres suivants, qui détailleront les phases de développement, de démonstration et d'évaluation de l'artefact. Grâce à cette approche DSR, la thèse vise à contribuer à la fois à la connaissance académique et aux avancées pratiques dans l'intégration de la durabilité aux technologies numériques dans la construction.

2.4 Identification du problème

La recherche de durabilité dans l'industrie des actifs bâtis englobe une large gamme d'aspects et d'indicateurs de mesure, reflétant la nature exhaustive des objectifs de durabilité. Les parties prenantes sont donc confrontées au double défi de, premièrement, délimiter les dimensions multifacettes de la durabilité pertinentes pour l'industrie et, deuxièmement, évaluer la faisabilité et l'efficacité de l'utilisation du BIM et des DT pour mettre en œuvre, atteindre et mesurer ces objectifs de durabilité. Cette recherche introduit une nouvelle approche pour améliorer les mesures de durabilité dans l'industrie des actifs bâtis. Elle se concentre sur la création d'un cadre accessible qui non seulement clarifie la vaste gamme d'indicateurs de durabilité, mais évalue également le potentiel du BIM et des DT pour mettre en œuvre ces indicateurs en vue d'un développement durable. Cette initiative vise à simplifier l'intégration des technologies BIM et DT pour promouvoir des pratiques industrielles plus durables.

Le défi ne se limite pas à l'identification des indicateurs de durabilité ; il s'agit d'intégrer ces indicateurs aux capacités du BIM et des DT pour améliorer la performance en matière de durabilité des actifs bâtis tout au long de leur cycle de vie. Malgré le potentiel reconnu du BIM et des DT pour soutenir les pratiques durables, l'industrie manque d'une approche adéquate pour tirer parti de ces technologies de manière efficace. Cette déconnexion entrave la capacité des parties prenantes à prendre des décisions éclairées sur l'incorporation de la durabilité dans les phases de planification, de conception, de construction, d'exploitation et de décommissionnement des actifs bâtis.

Cette recherche vise à combler cette lacune en développant un artefact qui :

- A. Définit clairement et catégorise les indicateurs de durabilité dans l'industrie des actifs bâtis, en s'appuyant sur diverses certifications et normes.
- B. Évalue la capacité du BIM et des DT à soutenir ces indicateurs de durabilité, offrant ainsi une feuille de route pour leur intégration dans les pratiques industrielles.

En abordant le problème identifié, cette étude propose un chemin non seulement pour améliorer la compréhension et l'application de la durabilité dans l'industrie des actifs bâtis, mais aussi pour faire progresser l'utilisation des technologies de construction numérique dans la promotion d'un environnement bâti durable. Ce double objectif de clarification des indicateurs de durabilité et d'exploitation du potentiel du BIM et des DT est essentiel pour les parties prenantes visant à atteindre des résultats pratiques en matière de durabilité.

2.5 Questions de recherche et objectifs

L'enquête centrale de cette thèse est encapsulée dans la question de recherche principale (RQ) suivante et est ensuite déclinée à travers des objectifs spécifiques visant à fournir une approche structurée pour aborder le problème identifié.

Question de recherche principale : Comment la notion du BIM 6D peut-elle être caractérisée et cadrée pour soutenir son adoption et sa mise en œuvre dans l'industrie des actifs bâtis ?

Cette question cherche à approfondir l'essence du BIM 6D, en explorant son potentiel et son cadre en tant qu'outil d'intégration des mesures de durabilité dérivées des certifications et normes de construction dans la gestion du cycle de vie des actifs bâtis.

Pour répondre à la question de recherche principale, l'étude est guidée par deux objectifs ciblés :

- **Objectif 1 :** Définir la durabilité dans le contexte du BIM 6D à travers le prisme des certifications et normes des actifs bâtis.
- **Objectif 2 :** Évaluer les capacités et le potentiel du BIM et des DT pour opérationnaliser les indicateurs de durabilité identifiés.

2.6 Collecte de données

2.6.1 Sélection des certifications et normes de construction

Le processus de sélection a débuté par la compilation d'une liste préliminaire de certifications et de normes grâce à une recherche documentaire. Cette collecte initiale s'est appuyée sur les connaissances existantes, les rapports de l'industrie et les articles universitaires pour identifier les certifications largement reconnues et influentes telles que LEED, BREEAM et DGNB, ainsi que des normes comme ISO 14001 et la série Global Reporting Initiative (GRI) 200.

Après cette compilation préliminaire, une recherche ciblée a été menée à travers plusieurs bases de données en ligne de renom, notamment Scopus, Engineering Village et Google Scholar. Pour naviguer efficacement parmi ces ressources, des mots-clés spécifiques ont été utilisés, combinés avec des opérateurs booléens pour affiner et élargir les résultats de recherche. Voici des exemples de chaînes de recherche :

- ("Building Information Modeling" OR "BIM") AND ("Built Asset Sustainability" OR "Sustainable Construction")
- ("Green Building Certifications" OR "Environmental Assessment Methods") AND ("Certification Standards" OR "Sustainability Indicators")
- ("Sustainability Standards" OR "Eco-friendly Building Practices") AND ("Certification Comparison" OR "Sustainability Assessment")
- ("LEED Certification" OR "BREEAM") AND ("Sustainability Criteria" OR "Green Building Guidelines")
- ("Energy Efficiency" OR "Sustainable Materials") AND ("Building Standards" OR "Construction Sustainability")

Cette approche a permis d'inclure un vaste éventail de certifications et de normes, capturant à la fois les schémas largement reconnus et les initiatives plus spécialisées. Pour enrichir davantage le jeu de données, la méthode de boule de neige telle qu'énoncée par Wohlin et al.

(2014) a été appliquée, étendant la recherche pour inclure des documents supplémentaires pertinents cités dans les sources initialement identifiées. Cette méthode itérative a facilité la découverte de certifications et normes moins connues, mais pertinentes.

Les consultations d'experts ont également été essentielles dans ce processus. La collaboration avec des professionnels de l'industrie et des experts universitaires a aidé à identifier les certifications et normes qui sont cruciales pour l'exploration pratique et académique de la durabilité dans l'industrie des actifs bâtis. Leurs perspectives ont été primordiales pour identifier des certifications spécifiques telles que Passive House (PHI) et One Planet (Bioregional), ainsi que des normes comme Living Building Challenge (LBC).

Cette liste finale pose les bases pour une analyse des indicateurs de durabilité dans l'industrie des actifs bâtis et l'exploration du BIM 6D pour soutenir les objectifs de durabilité.

2.6.2 Méthodes d'extraction des données

La méthode d'extraction des données a été planifiée pour capturer l'essence et les spécificités de chaque certification et norme. Cela a impliqué une revue détaillée des documents officiels, des directives et de tout matériel supplémentaire associé à chaque schéma. Cela comprenait :

Des manuels de certification : Guides détaillés et documentation fournis par les organismes de certification, décrivant les critères, processus et méthodes d'évaluation des indicateurs de durabilité.

Des spécifications de normes : Documents officiels des organisations de normalisation, détaillant les critères, méthodologies et indicateurs de performance pour la durabilité.

Pour l'identification et le catalogage des indicateurs, les principaux indicateurs de durabilité ont été identifiés à travers le processus de revue des documents. Chaque indicateur a été catalogué en fonction de son domaine de durabilité (par exemple : énergie, eau, matériaux, etc.) et des exigences ou directives spécifiques fournies par la certification ou la norme.

Pour gérer efficacement la quantité de données extraites, une base de données structurée a été établie en utilisant Microsoft Excel et Air Table. La base de données des certifications comprenait des champs tels que le nom du schéma, le pays d'origine, les dates de publication et de mise à jour, la portée, les niveaux, les principales catégories/secteurs/zones définis dans le schéma, le poids de chaque catégorie ou secteur (le cas échéant), les indicateurs, et la source des données. Pour les normes, la base de données organisait les informations par nom, titre, principes/catégories, région, année de publication et de mise à jour, échelle, portée, et source du document.

Pour garantir l'exactitude et la fiabilité des données collectées, un processus de vérification croisée des indicateurs de durabilité a été effectué. Cela impliquait une comparaison détaillée des indicateurs à travers divers schémas de certification et normes pour vérifier leur cohérence et leur pertinence.

2.7 Développement de l'artefact

2.7.1 Développement de la Matrice Consolidée de Durabilité (MCD)

La Matrice Consolidée de Durabilité (MCD) est un composant fondamental de cette étude, conçue pour consolider les indicateurs de durabilité d'une large gamme de certifications et normes de construction en une seule matrice cohérente. La MCD vise à servir de point de référence, capturant l'essence des évaluations de durabilité dans l'environnement bâti et simplifiant l'analyse et la comparaison des indicateurs de durabilité.

Le développement de la MCD, à travers un processus structuré en six étapes, illustré dans la Figure 2.2, prépare le terrain pour l'intégration efficace des capacités du BIM et des jumeaux numériques. Cette intégration est essentielle pour améliorer les processus d'évaluation ultérieurs, y compris les enquêtes et les interviews, et pour faciliter une analyse plus efficace de la MCD.

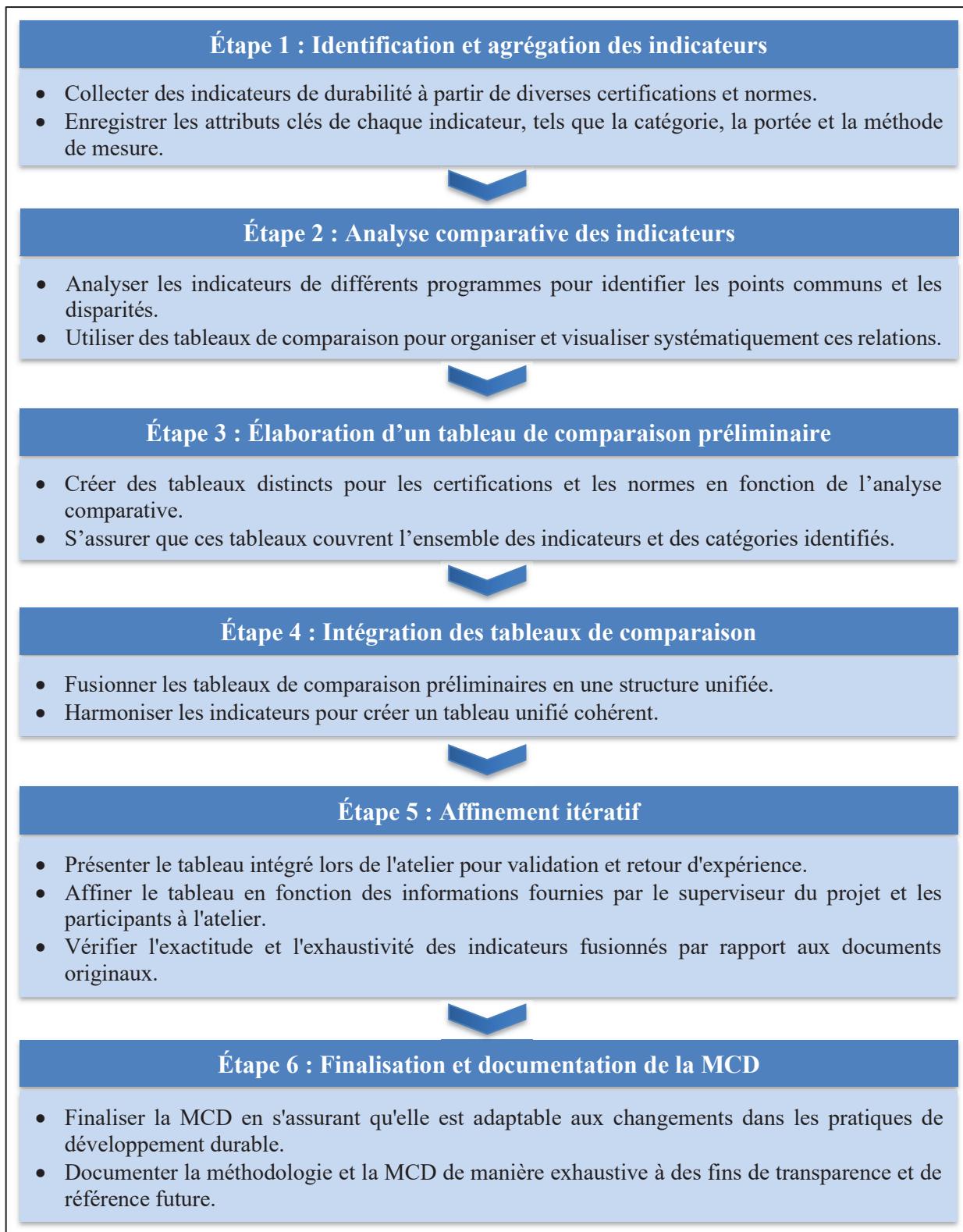


Figure 2.2 Processus en six étapes pour développer la MCD (Matrice Consolidée de Durabilité)

2.7.2 Incorporation des capacités du BIM et des jumeaux numériques

L'intégration du BIM et des jumeaux numériques au sein de la MCD est un aspect crucial de cette recherche. Dans cette section, nous décrivons notre approche pour aligner ces technologies numériques avec les principales catégories de durabilité identifiées dans notre étude.

Notre méthodologie commence par une cartographie de haut niveau des capacités du BIM et des DT selon des catégories de durabilité. Cette cartographie est informée et guidée par la revue de littérature, qui fournit des informations sur les fonctionnalités globales du BIM et des DT et sur la manière dont elles peuvent soutenir et améliorer les efforts dans des domaines clés tels que l'énergie, les émissions, les déchets, et les matériaux et produits. La revue de littérature sert de base pour comprendre l'intégration et l'application potentielles de ces technologies dans le domaine de la durabilité.

Pour chaque catégorie, en fonction des indicateurs impliqués, un mot-clé ciblé a été combiné avec la chaîne de recherche booléenne « AND BIM OR “Digital Twin” » pour garantir la récupération d'études axées sur l'application de ces technologies. Voici des exemples de chaînes de recherche utilisées :

- "Energy Simulation" AND BIM OR “Digital Twin”
- "Waste to Energy" AND Sustainability AND BIM OR “Digital Twin”
- "Renewable Energy" AND Management AND BIM OR “Digital Twin”
- "Emissions Tracking" AND BIM OR “Digital Twin”
- GHG AND BIM OR “Digital Twin”
- "Construction Waste" AND BIM OR “Digital Twin”
- "Lifecycle Assessment" AND BIM OR “Digital Twin”
- "Indoor Air Quality" AND BIM OR “Digital Twin”
- Biodiversity AND BIM OR “Digital Twin”
- "Brownfield Rehabilitation" AND BIM OR “Digital Twin”

Cette approche a facilité une recherche ciblée à travers plusieurs bases de données, telles que Scopus, Engineering Village et Google Scholar, élaborant une littérature qui aborde spécifiquement l'intégration du BIM et des DT dans l'industrie des actifs bâti.

Une vue d'ensemble simplifiée de cette intégration est présentée dans la Figure 2.3. Cette figure fournit une visualisation conceptuelle de la relation entre les capacités du BIM et des DT et la MCD, offrant une compréhension initiale de la manière dont les capacités du BIM et des DT s'intersectent avec les principales catégories et indicateurs de la MCD. Cependant, l'évaluation détaillée des capacités du BIM et des DT pour chaque indicateur de durabilité spécifique est menée à des étapes ultérieures de la recherche. Ces étapes, incluant la mise en œuvre d'ateliers, la conception et la distribution de sondages, ainsi que les entretiens avec des experts, fournissent une compréhension plus approfondie de l'application du BIM et des DT pour chaque indicateur de durabilité.

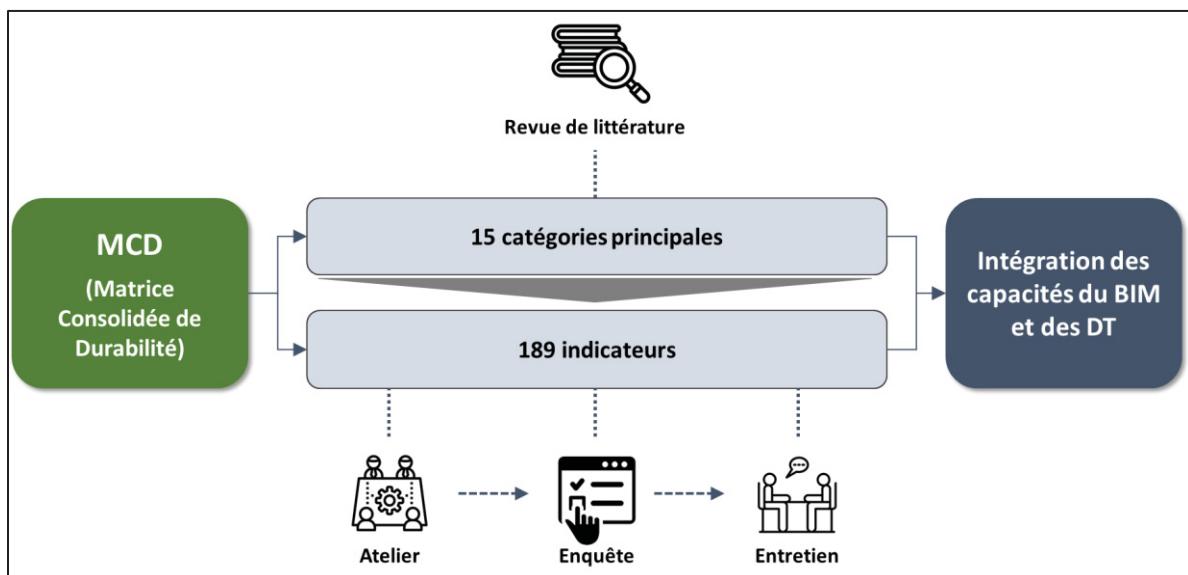


Figure 2.3 Intégration des capacités du BIM et des DT dans la MCD

2.8 Analyse des données de l'artefact

L'analyse de l'artefact, spécifiquement la MCD, fournit un panorama du paysage de la durabilité au sein de l'industrie des actifs bâtis, ce qui est essentiel pour positionner le BIM 6D dans les pratiques industrielles actuelles et futures. L'analyse de la MCD révèle les indicateurs de durabilité prédominants dans les certifications et les normes, aidant à identifier les tendances dominantes de l'industrie et les opportunités potentielles pour l'intégration du BIM 6D. En analysant ces indicateurs, la recherche obtient des informations sur les domaines où le BIM 6D pourrait contribuer le plus efficacement aux objectifs de durabilité, mettant en lumière les domaines sous-représentés qui pourraient bénéficier de l'innovation technologique. De plus, cette analyse enrichit le discours académique et professionnel sur la durabilité dans l'environnement bâti, jetant les bases pour des recherches supplémentaires et la promotion de la mise en œuvre du BIM 6D.

2.8.1 Processus d'analyse de la MCD

Notre approche pour analyser les données dérivées de la MCD implique un processus détaillé, illustré dans la Figure 2.4. Le flux de travail commence avec la MCD comme source de données, qui subit une préparation incluant la saisie et la transformation des données dans des outils analytiques. Les données préparées sont ensuite soumises à une analyse détaillée utilisant Power BI, menant à la phase de visualisation.

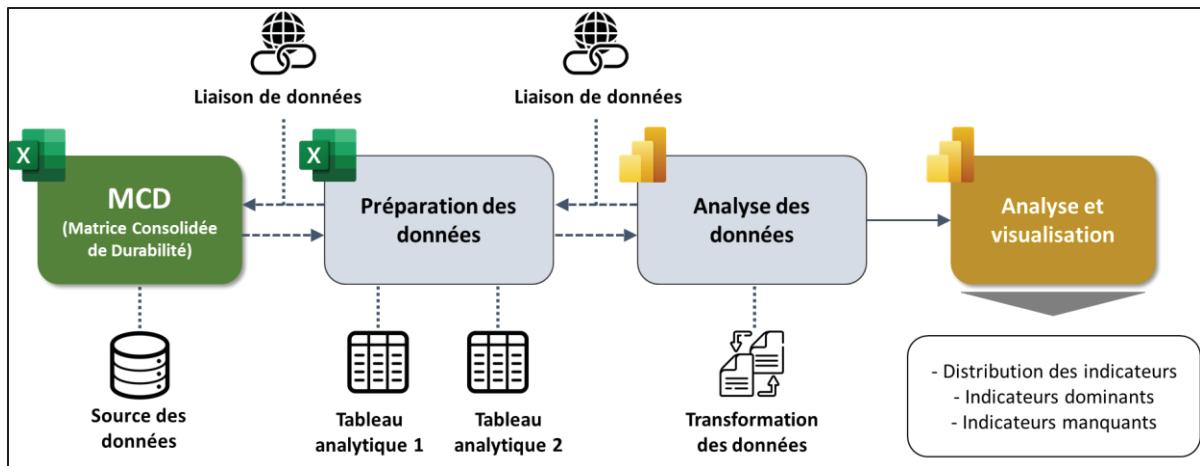


Figure 2.4 Processus d'analyse des données de la MCD

2.8.1.1 Crédit et transformation des données

Nous avons commencé par créer deux tableaux analytiques Excel à partir de la MCD. Le premier tableau, « Tableau Analytique 1 », fournissait une représentation binaire (1 pour la présence, 0 pour l'absence) de chacun des 189 indicateurs à travers différentes certifications et normes. Le second tableau, « Tableau Analytique 2 », se concentrerait sur la catégorisation de chaque indicateur dans l'une des 15 catégories de durabilité définies. Ces tableaux, illustrés ci-dessous, ont été conçus pour la clarté et la facilité d'importation dans Power BI.

Tableau 2.2 Tableau analytique 1 dans Excel, saisie de données pour analyse Power BI

Nom du schéma	Classification	Portée géographique	EN 01	EN 02	EN 03	EN 04	EN 05	EN 06	EN 07	EN 08	EN 09	EN 10	EN 11	EN 12
BNB	Certification	Allemagne	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
BREAM	Certification	ROYAUME-UNI	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1
DGNB	Certification	Allemagne	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1
Klimaaktiv	Certification	Autriche	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
LEED (USGBC)	Certification	États-Unis	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	
CASBEE	Certification	Japon	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1
ENVISION	Certification	États-Unis	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1
BCA Green Mark	Certification	Singapour	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1
E.E.W.H.	Certification	Taiwan	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Green Star	Certification	Australie et Nouvelle-Zélande	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1
GRIHA	Certification	Inde	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1
HK BEAM	Certification	Hong Kong	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1
OGNB	Certification	Autriche	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
Green Globes	Certification	Canada/États-Unis	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1
Lider A	Certification	Portugal	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
WELL	Certification	États-Unis	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0

Tableau 2.3 Tableau analytique 2 dans Excel, saisie de données pour analyse Power BI

EN 01	Demande en énergie primaire	Énergie
EN 02	Réponse flexible à la demande	Énergie
EN 03	Efficacité/performance énergétique	Énergie
EN 04	Surveillance énergétique	Énergie
EN 05	Quantification de l'énergie	Énergie
EN 06	Isolation	Énergie
EN 07	Prévisions de consommation	Énergie
EN 08	Étanchéité de l'enveloppe du bâtiment / Pont thermique	Énergie
EN 09	Énergie renouvelable	Énergie
EN 10	Mise en service améliorée	Énergie
EN 11	Harmonisation du réseau	Énergie
EN 12	Économie d'énergie / Réduction	Énergie
EN 13	Sous-comptage pour les locataires	Énergie
EN 14	Densité de puissance / Intensité énergétique	Énergie
EN 15	Consommation d'énergie décentralisée	Énergie
EN 16	Sources alternatives non renouvelables	Énergie
EN 17	Gestion du carburant des véhicules	Énergie

Après l'importation dans Power BI, nous avons utilisé la fonction « unpivot » dans le « Tableau Analytique 1 » pour convertir les données d'un format large, où chaque indicateur était une colonne distincte, en un format long, où chaque ligne représentait un indicateur par schéma. Ce tableau transformé incluait des champs essentiels tels que « Nom du Schéma », « Classification », « Portée Géographique », « Code de l'Indicateur » et « Valeur ».

Tableau 2.4 Structure de données transformée dans Power BI : vue non pivotée du tableau analytique 1

A ^B _C	Scheme Name	A ^B _C Classification	A ^B _C Geographic Scope	A ^B _C Indicator Code	1 ² ₃	Value
1	BNB	Certification	Germany	EN 01		1
2	BNB	Certification	Germany	EN 02		0
3	BNB	Certification	Germany	EN 03		0
4	BNB	Certification	Germany	EN 04		0
5	BNB	Certification	Germany	EN 05		0
6	BNB	Certification	Germany	EN 06		1
7	BNB	Certification	Germany	EN 07		0
8	BNB	Certification	Germany	EN 08		0
9	BNB	Certification	Germany	EN 09		0
10	BNB	Certification	Germany	EN 10		0
11	BNB	Certification	Germany	EN 11		0
12	BNB	Certification	Germany	EN 12		0

2.8.1.2 Lien des données et analyse Power BI

Les deux tableaux ont été liés en utilisant le champ « Code de l'Indicateur », permettant à Power BI de corrélérer précisément les données. Ce lien était crucial pour une analyse correcte prenant en compte à la fois la présence/absence des indicateurs et leur catégorisation. Avec les données correctement formatées et interconnectées, Power BI a pu réaliser une analyse approfondie de la MCD, examinant la distribution et la classification des indicateurs de durabilité à travers divers schémas.

2.9 Évaluation de l'artefact

2.9.1 Stratégie d'évaluation

Notre stratégie d'évaluation de l'artefact, intégrant le BIM et les DT avec les indicateurs de durabilité, utilise une approche mixte combinant des méthodes qualitatives et quantitatives. Cette stratégie, alignée avec les recommandations de Creswell et Plano Clark (2011), implique des ateliers, des enquêtes et des entretiens avec des experts pour évaluer l'efficacité et l'applicabilité de l'artefact dans l'industrie des actifs bâtis.

L'objectif est de valider la praticité de l'artefact et de le raffiner en fonction des retours des experts de l'industrie. Grâce à cette approche, nous visons à garantir que l'artefact est à la fois théoriquement solide et pragmatiquement viable pour des applications réelles.

2.9.2 Mise en œuvre de l'atelier

Dans le cadre de notre méthodologie, un atelier a été organisé au GRIDD (Groupe de recherche en intégration et développement durable en environnement bâti) à l'ÉTS (École de technologie supérieure), impliquant 12 étudiants en maîtrise et 6 doctorants. Ces participants, possédant une expertise dans des domaines tels que le BIM, les jumeaux numériques et le développement durable, ont été cruciaux pour évaluer l'application du BIM aux indicateurs de durabilité.



Figure 2.5 Atelier au laboratoire GRIDD, ÉTS

L’atelier était structuré en six groupes, chacun assigné à 3-4 catégories des 181 indicateurs de durabilité. L’objectif était d’évaluer l’applicabilité du BIM à chaque indicateur en utilisant une échelle prédefinie allant de 0 (Aucune Utilisation du BIM) à 4 (Jumeau Numérique Complet, représentant un jumeau numérique entièrement développé mis à jour en temps réel).

Pendant la session de 1,5 heure, nous avons recueilli des données quantitatives sur l’intégration du BIM et des jumeaux numériques aux indicateurs de durabilité. Ces données ont été initialement recueillies sur papier puis numérisées dans Excel pour une analyse structurée. En plus de l’analyse quantitative, les idées qualitatives des participants ont également été considérées comme cruciales. Ces idées incluaient des suggestions telles que l’ajout de descriptions détaillées pour chaque indicateur et option, et des conseils sur la fusion ou la séparation de certains indicateurs pour améliorer la clarté et la pertinence.

Les données numérisées ont été importées dans Power BI, nous permettant de réaliser une visualisation et une analyse. Cette étape a été essentielle pour identifier les tendances initiales, les motifs et les domaines d’amélioration basés sur les retours des participants. En incorporant

ces idées qualitatives, nous avons affiné notre approche pour les étapes suivantes de la recherche. Des ajustements tels que l'enrichissement des descriptions des indicateurs et l'optimisation de la liste des indicateurs ont directement influencé le développement de l'étape de l'enquête, assurant un cadre d'évaluation plus nuancé et efficace.

2.9.3 Étape de l'enquête

À la suite de l'atelier initial au GRIDD, la recherche a progressé vers une étape d'enquête plus expansive, utilisant la liste affinée des indicateurs de durabilité. Cette étape était conçue pour capturer un spectre plus large de perspectives sur l'applicabilité et l'efficacité du BIM et des jumeaux numériques pour chaque indicateur spécifique inclus dans la MCD.

2.9.3.1 Conception et distribution de l'enquête

La liste finale comprenait 189 indicateurs, répartis en 15 catégories critiques de durabilité, à savoir Énergie, Émissions, Changement Climatique, Déchets, Utilisation et Localisation du Site, Écologie, Mobilité, Eau, Effluents, Matériaux et Produits, Gestion, Confort des Occupants, Santé et Sécurité, Conception, et les aspects Sociaux et Économiques. L'enquête a été hébergée sur LimeSurvey et mise à disposition en anglais et en français pour assurer une large accessibilité et inclusivité.

La diffusion de l'enquête s'est réalisée sur divers canaux pour atteindre un public diversifié. Elle a été annoncée dans les bulletins d'information de l'industrie, partagée sur des forums techniques et éducatifs, promue via LinkedIn et envoyée directement à des experts de l'industrie, des étudiants et des professionnels impliqués dans la durabilité et les technologies de construction numérique.

2.9.3.2 Contenu et structure de l'enquête

L'enquête a débuté par une introduction explicative, soulignant son objectif : explorer la modélisation de l'information en 6D et examiner l'application des indicateurs de durabilité.

Les questions démographiques ont suivi, recueillant des données sur les rôles des participants, leurs niveaux d'expérience et leur familiarité avec les concepts du BIM et de durabilité.

Les participants ont ensuite choisi de s'engager dans les catégories qu'ils connaissaient le mieux ou qui les intéressaient le plus, garantissant des réponses informées et pertinentes. Chaque catégorie était méticuleusement présentée, contenant de 5 à 20 indicateurs, chacun accompagné d'une description concise pour faciliter la compréhension et la clarté de l'évaluation.

2.9.3.3 Critères d'évaluation

Pour évaluer les capacités du BIM et des DT, nous avons adopté une échelle à six points, illustrée dans le Tableau 2.5, influencée par la méthodologie décrite dans la littérature. Cette échelle, conçue pour évaluer l'étendue de l'intégration du BIM et des DT selon les indicateurs de durabilité, va de « non-Applicabilité » à 4, dénotant un jumeau numérique pleinement opérationnel. La progression reflète le chemin évolutif du BIM jusqu'au jumeau numérique, capturant divers niveaux d'intégration, de l'absence d'utilisation du BIM à la reproduction numérique complète des actifs physiques en temps réel. Cette approche est soutenue par les avancées des technologies BIM et DT décrites par Deng et al. (2021), qui mettent en évidence la transition des applications BIM de base aux jumeaux numériques entièrement intégrés, marquant un bond significatif vers une gestion sophistiquée, interconnectée et intelligente des cycles de vie des projets de construction (Deng et al., 2021).

Tableau 2.5 Échelle à six points pour l'évaluation des capacités du BIM/DT

No	Options	Description
-	N'est pas un indicateur de durabilité valide	Indicateur non pertinent aux critères de durabilité
0	Pas d'utilisation du BIM	Aucune incorporation des méthodologies BIM
1	Modèle numérique mis à jour	Utilisation du BIM pour des mises à jour périodiques des modèles numériques
2	Modèle partagé	Le BIM facilite le partage de modèles numériques pour une collaboration accrue des parties prenantes
3	Modèle partagé avec données de capteurs intégrées	Le BIM s'intègre aux données des capteurs, enrichissant l'utilité du modèle numérique et le suivi des performances
4	Jumeau numérique complet	Un jumeau numérique complet du bâtiment physique, mis à jour dynamiquement avec des données en temps réel pour une analyse et une optimisation approfondie

Les participants avaient également la possibilité de laisser des commentaires sur chaque section, permettant ainsi d'obtenir des informations qualitatives en parallèle des données quantitatives. La Figure 2.6 illustre une page type de l'enquête pour évaluer l'intégration du BIM et des jumeaux numériques selon les indicateurs de durabilité pour la catégorie Énergie.

1. Energy						
	<p>The Energy Category aims to identify methods, controls, and management policies that lower the total energy consumption of an asset. This category consists of 20 indicators related to energy which are necessary for enhancing sustainable development in the built asset industry.</p>					
<p>Are you willing to see and evaluate each specific indicator regarding their BIM uses in the ENERGY sector?</p> <p>① Choose one of the following answers</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No <input type="radio"/> I just want to see the indicators 						
<p>Please evaluate each indicator base on the potential for BIM and Digital Twin use to support its achievement in different areas such as planning, analysis, optimization, monitoring, etc.</p> <p>② 0 - No BIM use: No use of digital models or information modeling in the design, construction, or operation of a building.</p> <p>1 - Updated Digital Model: A digital representation of a building that is updated periodically with changes made during construction or operation.</p> <p>2 - Shared Model: A digital model that is shared among stakeholders, such as architects, engineers, contractors, and owners, to improve collaboration and communication.</p> <p>3 - Shared model with integrated sensor data: A digital model that is integrated with sensor data from the building's systems, such as HVAC, to monitor performance and enable predictive maintenance.</p> <p>4 - Full Digital Twin: A complete digital replica of a physical building that is constantly updated with real-time data from sensors and other sources to enable simulation, analysis, and optimization of building performance throughout its lifecycle.</p>						
	Not a valid sustainability indicator	0 - No BIM use	1 - Updated Digital Model	2 - Shared Model	3 - Shared model with integrated sensor data	4 - Full Digital Twin
EN01_primary energy demand [The total energy required to meet a built asset's annual heating and hot water needs, including energy losses that occur during the production, conversion, and distribution of the fuels used to generate this energy.]	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
EN02_flexible demand side response [Flexible demand-side response (DSR) refers to the ability of a building or a system to adjust its electricity usage in response to changes in energy demand, supply, and price.]	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Figure 2.6 Exemple de page d'enquête – Évaluation de l'intégration du BIM et des DT dans les indicateurs de durabilité pour la catégorie Énergie

2.9.3.4 Préparation et analyse des données de l'enquête

L'étape de l'enquête s'est conclue par la collecte de 190 réponses, comprenant 41 soumissions complètes et 149 soumissions partielles. Ces données, capturant un large éventail d'opinions

sur l'intégration du BIM et des jumeaux numériques dans la durabilité, ont été exportées de LimeSurvey au format Excel pour une analyse détaillée.

Dans Excel, les données de l'enquête ont été organisées en différents onglets, incluant les « Catégories Enquêtées », les « Indicateurs Enquêtés » et des informations démographiques telles que « Fonction dans l'Entreprise », « Années d'Expérience », « Type d'Entreprise », « Localisation », « Province », « Niveau d'Expertise BIM » et « Familiarité avec la Durabilité ». Cette organisation a facilité une approche structurée pour l'analyse ultérieure. Les données brutes ont ensuite été importées dans R Studio pour une analyse statistique. Dans R, nous avons suivi un processus structuré pour l'analyse des données, qui impliquait :

A. L'importation et la préparation des données :

- Importer les données de l'enquête depuis Excel, en s'assurant de la bonne organisation des catégories et des indicateurs.
- Transformer les réponses de l'enquête en un format long en utilisant `pivot_longer()` du package `tidyverse`, où chaque ligne représentait une réponse à un indicateur.

B. Le calcul des poids :

- L'attribution de poids aux réponses de l'enquête est basée sur des facteurs démographiques clés, spécifiquement les années d'expérience, le niveau d'expertise BIM et la familiarité avec la durabilité. Cette approche pondérée s'aligne avec les méthodologies qui mettent l'accent sur l'amélioration de la représentativité des données d'enquête et l'ajustement des variations dans l'expertise des répondants (Heeringa et al., 2017). En assignant un poids croissant à une plus grande expérience et expertise, l'analyse vise à refléter l'influence de la maturité professionnelle et de la profondeur des connaissances sur la validité des réponses. Le Tableau 2.6 illustre les poids assignés, conçus pour amplifier proportionnellement l'impact de chaque réponse en fonction des qualifications et de l'expérience du répondant dans le domaine.

Tableau 2.6 Poids assignés aux réponses de l'enquête

Années d'Expérience	Poids	Niveau d'Expertise BIM	Poids	Familiarité avec la Durabilité	Poids
Moins d'1 an	1	Aucun	1	Pas du tout familier	1
1 - 5 ans	2	Débutant	2	Peu familier	2
6 - 10 ans	3	Intermédiaire	3	Assez familier	3
11 - 20 ans	4	Expert	4	Familier	4
21 - 30 ans	5			Très familier	5
Plus de 30 ans	6				

C. Classement des options au sein de chaque catégorie (en tenant compte des poids)

:

- Fusionner les données des catégories avec les réponses et leurs poids respectifs.
- Agréger les poids pour chaque option au sein des catégories et classer les options en fonction de la somme pondérée.

D. Exportation des résultats :

- Exporter les données traitées et classées vers des fichiers CSV pour une visualisation ultérieure dans Power BI.

2.9.3.5 Calcul du Score d'Accord Pondéré

Le Score d'Accord Pondéré pour chaque indicateur a été calculé dans R, en tenant compte du niveau d'accord parmi les répondants et des poids assignés. Ce score a été déterminé en utilisant la formule suivante :

Équation 1 Formule du Score d'Accord Pondéré

$$S_w = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i \times W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

Où :

Sw : Score d'accord pondéré.

A_i : Valeur d'accord pour le i-ème répondant ($A_i=1$ si la réponse du répondant correspond à la modalité des réponses pour cet indicateur, $A_i=0$ sinon).

W_i : Poids attribué au i-ème répondant en fonction de ses facteurs démographiques.

n : Nombre total de répondants.

Les étapes détaillées pour ce calcul incluaient les actions suivantes :

1. Calculer la Modalité (Réponse la Plus Courante) pour Chaque Indicateur : Cela implique de déterminer l'option la plus fréquemment sélectionnée pour chaque question ou indicateur de l'enquête.
2. Déterminer l'Accord : Pour chaque réponse à un indicateur, vérifier si elle correspond à la modalité. Attribuer « 1 » en cas d'accord et « 0 » en cas de désaccord.
3. Appliquer les Poids : Multiplier chaque valeur d'accord par le poids du répondant. Ce poids est une mesure composite basée sur les années d'expérience du répondant, son niveau d'expertise en BIM et sa familiarité avec la durabilité.
4. Agréger pour Chaque Indicateur : Additionner les produits de l'accord et du poids pour chaque indicateur.
5. Normaliser par le Poids Total : Diviser la somme de l'étape 4 par la somme totale des poids pour cet indicateur.
6. Classer les Indicateurs en Fonction du Score : Ordonner les indicateurs du plus élevé au plus bas en fonction de leur Score d'Accord Pondéré.

2.9.3.6 Visualisation de l'analyse des données

La phase suivante a consisté à importer les fichiers CSV traités depuis R dans Power BI. Cette étape était cruciale pour visualiser et interpréter les données de l'enquête dans un format plus interactif et accessible. Dans Power BI, diverses visualisations analytiques ont été créées pour communiquer efficacement les résultats de l'enquête. Ces visualisations analytiques sont présentées dans le Tableau 2.7 ci-dessous.

Tableau 2.7 Aperçu des visualisations analytiques générées dans Power BI à partir des données de l'enquête

No	Analyse	Description
1	Informations démographiques	Résument les données démographiques des répondants, offrant des perspectives sur la diversité des participants.
2	Catégories enquêtées	Évaluent la fréquence de sélection pour chacune des 15 catégories de durabilité, révélant les niveaux d'intérêt et d'engagement des participants dans des thèmes spécifiques de durabilité.
3	Préférence générale des options	Analyse les préférences dans toutes les catégories pour identifier les choix communs concernant les capacités du BIM et des DT pour les indicateurs de durabilité, fournissant des insights sur les tendances générales et les perceptions.
4	Réponses spécifiques par catégorie	Effectuent des évaluations détaillées pour chaque catégorie de durabilité afin de comprendre la distribution des réponses pour chaque option, comparant l'importance ou l'applicabilité des utilisations du BIM dans différents domaines de durabilité.
5	Classement des indicateurs par option spécifique	Classe chaque indicateur de durabilité en fonction des votes sur un éventail d'options, de « Pas d'Utilisation du BIM » à « Jumeau Numérique Complet », pour évaluer l'applicabilité et l'efficacité perçues des indicateurs en corrélation avec les niveaux d'adoption de la technologie BIM.
6	Classement des indicateurs basé sur le score d'accord pondéré	Mesure le niveau de consensus pour chaque indicateur en utilisant le Score d'Accord Pondéré, classant les indicateurs en fonction de l'accord, du plus haut au plus bas, parmi les répondants.
7	Visualisation en diagramme à boîtes à moustaches	Améliore l'analyse de l'accord pondéré avec un diagramme à boîtes à moustaches dans Power BI. Cela fournit des insights détaillés sur la distribution du consensus à travers les indicateurs, mettant en évidence la variabilité et les mesures statistiques (moyenne, médiane, quartiles) des données d'accord.

2.9.4 Entretien avec des experts

2.9.4.1 Conception et justification de l'entretien

Dans le but d'explorer les perspectives sur l'intégration du BIM et des DT dans le contexte de la durabilité dans l'industrie des actifs bâti, cette recherche a adopté une approche d'entretien semi-structuré comme composant central de sa méthodologie. Le format semi-structuré, caractérisé par sa flexibilité et la profondeur de l'enquête, a été choisi en raison de son efficacité prouvée dans la recherche qualitative pour obtenir des informations détaillées de la part d'experts dans des domaines spécifiques (Alreshidi et al., 2017). Cette approche a permis une exploration approfondie de sujets complexes en permettant des réponses ouvertes et l'opportunité pour les intervieweurs de creuser certains thèmes ou réponses (Hsieh & Shannon, 2005).

2.9.4.2 Sélection et préparation

Les experts ont été choisis en fonction de leurs connaissances poussées et de leur expérience avec le BIM, les jumeaux numériques et les pratiques de durabilité, garantissant que leurs contributions seraient d'une valeur significative pour les objectifs de la recherche. Le processus de sélection a priorisé les individus capables d'offrir des perspectives diverses sur l'intégration des technologies numériques dans les efforts de durabilité au sein d'un environnement bâti. Avant les entretiens, les participants ont reçu une invitation par courriel, détaillant l'objectif de l'étude et la structure de la discussion à venir, ainsi que des ressources PowerPoint conçues pour les familiariser avec les thèmes clés de l'entretien. Cette phase préparatoire était essentielle pour faciliter un dialogue informé et ciblé (Leedy & Ormrod, 2015).

Les profils de ces experts, démontrant leurs qualifications et domaines d'expertise, sont résumés dans le Tableau 2.8, tout en assurant leur anonymat et en montrant la profondeur de leurs connaissances.

Tableau 2.8 Résumé des profils des participants experts pour les entretiens

ID de la personne interviewée	Profession	Expérience avec le BIM/Durabilité	Projets/Contributions notables
Expert 01	Expert de l'industrie	Senior (20+ ans)	Processus et normes BIM
Expert 02	Chercheur académique	Senior (10+ ans)	Architecture durable et BIM
Expert 03	Expert de l'industrie	Senior (15+ ans)	Gestion de la construction et BIM

2.9.4.3 Structure de l'entretien

Chaque entretien a été conduit en ligne à l'aide de plateformes comme Microsoft Teams ou Zoom, et a été enregistré avec le consentement des participants pour assurer l'exactitude de la collecte de données. Les discussions ont duré entre 1 et 2 heures, fournissant une richesse de données qualitatives et quantitatives. Après les entretiens, les enregistrements ont été transcrits et organisés pour analyse. Cette approche analytique a permis une compréhension nuancée des perspectives des experts sur l'intégration du BIM et des jumeaux numériques dans les pratiques de durabilité, contribuant aux résultats de la recherche.

Les entretiens étaient structurés autour d'une série de questions ouvertes, suivant un guide d'entretien inspiré par la méthodologie suggérée par Oates (2005). Ce guide était spécifiquement conçu pour explorer la catégorisation des indicateurs de durabilité, le potentiel du BIM et des jumeaux numériques pour faire progresser les objectifs de durabilité, et les expériences personnelles des experts avec ces technologies en pratique. Le format semi-structuré a permis une flexibilité dans la discussion, permettant l'exploration de sujets supplémentaires au fur et à mesure qu'ils apparaissaient, et la réorganisation des questions pour suivre le flux naturel de la conversation (Alreshidi et al., 2017).

Les principales questions posées pendant l'entretien étaient les suivantes :

1. Quel est votre avis sur les 15 catégories de durabilité ?

Cette question inclut l'exploration des points de vue des personnes interviewées sur l'approche d'une définition de la durabilité à travers les certifications et normes, en évaluant l'exhaustivité, la pertinence et les éventuels chevauchements dans le cadre de la catégorisation.

2. Que pensez-vous des résultats de l'enquête ?

Ici, la discussion se concentre sur l'alignement ou non des résultats de l'enquête avec les attentes des personnes interviewées et la validité perçue des classements de l'enquête, visant à évaluer la crédibilité et la pertinence des résultats de l'enquête.

3. Quel est votre avis sur les capacités du BIM et des jumeaux numériques dans ces indicateurs ?

Cette question sollicite des opinions sur les capacités du BIM et des jumeaux numériques pour chaque indicateur de durabilité, y compris les obstacles ou défis rencontrés, ainsi que toute expérience spécifique de projet mettant en lumière leur application dans les efforts de durabilité.

2.9.4.4 Évaluation des indicateurs

Un accent significatif a été mis sur l'évaluation de certains indicateurs de durabilité (question numéro 3), qui se situaient dans la plage des 25 % d'accord les plus faibles de l'étape de l'enquête, chacun présenté avec des descriptions détaillées et, le cas échéant, des supports visuels pour faciliter l'évaluation. Les experts avaient la possibilité d'évaluer la capacité du BIM et des jumeaux numériques pour chaque indicateur, en réfléchissant sur la praticité, les avantages et les défis de l'utilisation de ces technologies. Ce processus d'évaluation s'est vu enrichi par la fourniture d'indices dérivés de la revue de littérature, visant à susciter des réflexions et des perspectives plus profondes.

2.9.4.5 Addition de l'analyse quantitative

Pour compléter les informations qualitatives recueillies lors des entretiens, une composante d'analyse quantitative a été introduite pour évaluer la cohérence des évaluations entre les personnes interviewées pour un ensemble d'indicateurs. En utilisant R pour l'analyse statistique, une fonction d'accord personnalisée a été développée pour calculer le pourcentage d'accord entre les interviewés pour chaque indicateur de durabilité, basé sur leurs réponses catégorisées en options nominales représentant divers niveaux de mise en œuvre du BIM. Cette approche quantitative visait à quantifier le consensus des experts, fournissant une mesure robuste de l'alignement ou de la divergence des perspectives (Alreshidi et al., 2017).

2.10 Considérations éthiques

Notre recherche a adhéré aux normes éthiques les plus élevées, en commençant par obtenir le consentement éclairé de tous les participants pour garantir la protection de leurs droits et de leur vie privée. Reconnaissant l'importance de la supervision éthique, nous avons suivi le protocole en vigueur dans des pays comme le Canada, où les universités ont des comités de révision internes chargés d'examiner les propositions de recherche impliquant des humains pour prévenir tout préjudice potentiel aux participants (Leedy & Ormrod, 2015). Ce processus garantit que toutes les activités de recherche sont menées avec le plus grand soin et la plus haute considération éthique.

Dans le cadre de la revue éthique pour l'étape des entretiens avec des experts, nous avons soumis le « Formulaire de présentation allégé » au Comité d'éthique de la recherche (CÉR) de l'université. Cette étape était cruciale pour aligner notre recherche avec les directives éthiques énoncées dans l'« Énoncé de politique des trois conseils : Éthique de la recherche avec des êtres humains » (*Énoncé de politique des trois conseils*, 2022), qui régit la conduite éthique de la recherche impliquant des humains.

La revue du CÉR a affirmé que notre projet, axé sur les pratiques de durabilité dans l'industrie des actifs bâtis, respectait ces normes éthiques, nous accordant la permission de procéder. Tout

au long de la recherche, nous avons veillé à la sécurité des données, évité les biais et respecté la propriété intellectuelle, en suivant les principes de conduite de recherche responsable tels que mandatés par le CÉR et les directives éthiques.

2.11 Résumé du chapitre

Ce chapitre décrit les bases méthodologiques de cette thèse, en utilisant le cadre de la recherche en design (DSR) pour explorer l'intégration du BIM et des jumeaux numériques aux mesures de durabilité dans l'industrie des actifs bâtis. La méthodologie DSR facilite le développement structuré et l'évaluation de solutions innovantes, à travers un processus comprenant l'identification du problème, la formulation des objectifs, la conception et le développement de l'artefact, la démonstration, l'évaluation et la communication des résultats.

L'artefact central de cette étude, incluant la Matrice Consolidée de Durabilité (MCD), est instrumental pour répondre à notre question de recherche et atteindre nos objectifs. Il agrège les indicateurs de durabilité de diverses certifications et normes, les cartographiant par rapport aux capacités du BIM et des jumeaux numériques pour explorer la caractérisation et le cadrage du BIM 6D pour son adoption dans l'industrie des actifs bâtis. Ce processus est vital pour identifier et cataloguer les indicateurs de durabilité, définir le contexte de durabilité pour le BIM 6D, et évaluer les capacités du BIM et des DT à opérationnaliser ces indicateurs. À travers une méthodologie englobant une revue des certifications et normes de durabilité, le développement de la MCD, l'incorporation des capacités du BIM et des DT, et l'évaluation des données via des ateliers, des enquêtes et des entretiens avec des experts, cet artefact joue un rôle crucial pour atteindre nos objectifs de recherche.

Le chapitre méthodologique établit un cadre pour explorer l'intégration du BIM et des DT à la durabilité dans l'industrie des actifs bâtis, préparant le terrain pour la présentation détaillée et l'analyse des résultats dans les chapitres suivants.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET ANALYSE

3.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats obtenus à partir de l'application des méthodologies détaillées précédemment. Ici, nous illustrons les résultats de notre revue des certifications et normes de durabilité, le développement et la validation de la Matrice Consolidée de Durabilité (MCD), l'évaluation des capacités du BIM et des DT, ainsi que la synthèse des perspectives des experts et des participants.

Nous commençons par une liste des normes et certifications de durabilité choisies, en explorant leurs divers domaines et portées géographiques, et en établissant la base de notre analyse. Vient ensuite le développement de la MCD et son examen approfondi, qui s'appuie sur un éventail de schémas de certification et de normes pour offrir une vue d'ensemble des indicateurs de durabilité dans l'industrie. Notre exploration se tourne ensuite vers l'intégration pratique des capacités du BIM et des DT au sein de la MCD. Cela inclut le détail des fonctionnalités générales et des applications potentielles de ces technologies pour soutenir les objectifs de durabilité identifiés dans 15 catégories.

Ensuite, nous présentons les résultats de l'évaluation de l'artefact, qui englobent des données provenant d'ateliers participatifs et d'enquêtes. Ces sections articulent les perspectives collectives sur l'utilité du BIM et des DT dans les efforts de durabilité et classent les indicateurs de durabilité en fonction de leur pertinence selon divers niveaux d'intégration du BIM. Enfin, les entretiens avec des experts fournissent une dimension qualitative à nos résultats, offrant des perspectives professionnelles sur la faisabilité et l'efficacité du BIM et des DT dans l'opérationnalisation de la durabilité dans l'environnement bâti.

3.2 Liste des normes et certifications de durabilité sélectionnées

Cette section présente la liste finale des certifications et normes de construction sélectionnées par le processus décrit dans le chapitre méthodologique. Notre objectif ici est de mettre en avant les résultats de la sélection, en montrant la diversité et la gamme de schémas incorporés dans cette étude.

La recherche a identifié un total de 25 certifications de construction et 26 normes. Ces certifications ont été sélectionnées pour fournir une représentation des mesures de durabilité globales et régionales dans l'industrie des actifs bâties. La sélection comprend des certifications bien connues comme LEED, BREEAM et DGNB, ainsi que des certifications émergentes et significatives régionalement comme Klimaaktiv et Green Star. Des normes telles qu'ISO 14001 et la série GRI 200 ont été incluses pour leur impact répandu.

Les informations détaillées sur chaque certification et norme sélectionnée sont résumées dans les Tableaux 3.1 et 3.2 ci-dessous.

Tableau 3.1 Liste des schémas de certification de construction sélectionnés

No	Nom de la certification	Portée géographique	Domaine	Échelle
1	BCA Green Mark (BCA, 2021)	Singapour	Conception, construction et exploitation des bâtiments	Actif
2	BNB (BNB, 2019)	Allemagne	Conception, construction et exploitation des bâtiments	Actif
3	BREEAM (BRE, 2020)	Royaume-Uni	Conception, construction et exploitation des bâtiments	Actif
4	CASBEE (IBEC, 2014)	Japon	Conception, construction et exploitation des bâtiments	Actif
5	DGNB (DGNB, 2020)	Allemagne	Conception, construction et exploitation des bâtiments	Actif
6	E.E.W.H. (Chuang et al., 2011)	Taiwan	Conception, construction et exploitation des bâtiments	Actif
7	ENVISION (ENVISION, 2018)	USA	Développement des infrastructures	Actif
8	GBC HB (GBC Italia, 2016)	Italie	Rénovation et utilisation des bâtiments historiques	Actif
9	Green Globes (GBI, 2021)	Canada/ USA	Conception, construction et exploitation des bâtiments	Actif
10	Green Star (GBC, 2020)	Australie & NZ	Conception, construction et exploitation des bâtiments	Actif
11	GRIHA (GRIHA, 2021)	Inde	Conception, construction et exploitation des bâtiments	Actif
12	HK BEAM (BSL, 2021)	Hong Kong	Conception, construction et exploitation des bâtiments	Actif
13	IGBC (IGBC, 2014)	Inde	Conception, construction et exploitation des bâtiments	Actif
14	ITACA	Italie	Conception, construction et exploitation des bâtiments	Actif
15	Klimaaktiv (Klimaaktiv, 2019)	Autriche	Conception, construction et exploitation des bâtiments	Actif
16	LEED (USGBC, 2021)	USA	Conception, construction et exploitation des bâtiments	Actif
17	LEVEL(S) (Dodd et al., 2021)	UE	Conception, construction et exploitation des bâtiments	Actif
18	Lider A (Duarte Pinheiro, 2019)	Portugal	Conception, construction et exploitation des bâtiments	Actif
19	MINERGIE (Gugerli et al., 2015)	Suisse	Efficacité énergétique des bâtiments	Actif
20	MINERGIE-ECO (Gugerli et al., 2015)	Suisse	Efficacité énergétique des bâtiments	Actif
21	NABERS (BRE, 2021)	Australie	Efficacité énergétique des bâtiments	Actif
22	OGNB (OGNB, 2013)	Autriche	Conception, construction et exploitation des bâtiments	Actif
23	One Planet (Bioregional, 2020)	Australie	Conception, construction et exploitation des bâtiments	Org.
24	Passive House (PHI, 2022)	Germany	Efficacité énergétique des bâtiments	Actif
25	WELL (IWBI, 2016)	USA	Santé et Bien-être dans l'Environnement Bâti	Actif

Tableau 3.2 Liste des Normes Sélectionnées

No	Nom de la norme	Portée géographique	Domaine	Échelle
1	ASHRAE 189.1 (ASHRAE & USGBC, 2014)	USA	Conception, construction et exploitation de bâtiments	Actif
2	CEN - EN 15804 (CEN, 2020)	Europe	Évaluation environnementale des produits de construction	Actif
3	CEN - EN 15978 (CEN, 2018)	Europe	Durabilité de l'environnement bâti	Actif
4	ISO 14001 (ISO, 2015)	Mondiale	Gestion de l'environnement	Organisation
5	ISO 14040 (ISO, 2006a)	Mondiale	Analyse du cycle de vie (ACV)	Actif
6	ISO 14044 (ISO, 2006b)	Mondiale	Analyse du cycle de vie (ACV)	Actif
7	ISO 14090/14091 (ISO, 2019a)	Mondiale	Adaptation au changement climatique dans une organisation	Organisation
8	ISO 15392 (ISO, 2019b)	Mondiale	Construction de bâtiments	Actif
9	ISO 20887 (ISO, 2020)	Mondiale	Bâtiments et ouvrages de génie civil	Actif
10	ISO 21929 (ISO, 2011)	Mondiale	Construction de bâtiments	Actif
11	ISO 21930 (ISO, 2007)	Mondiale	Évaluation environnementale des produits de construction	Actif
12	ISO 26000 (ISO, 2010)	Mondiale	Responsabilité sociale dans les organisations	Organisation
13	ISO 37101/37104 (ISO, 2016)	Mondiale	Le développement durable dans les collectivités	Organisation
14	ISO 37120 (ISO, 2018a)	Mondiale	Le développement durable dans les collectivités	Organisation
15	ISO 45001 (ISO, 2018b)	Mondiale	La santé et la sécurité au travail	Organisation
16	LBC 4.0 (LBC, 2019)	USA	Conception, construction et exploitation des bâtiments	Actif
17	PIEVC (Nodelman et al., 2021)	Canada	Changement climatique dans les infrastructures publiques	Actif
18	SASB (Construction Materials) (SASB, 2018b)	Mondiale	Rapports sur la durabilité dans le secteur des matériaux de construction	Organisation
19	SASB (Engineering Services) (SASB, 2018c)	Mondiale	Rapports sur la durabilité dans le secteur des services d'ingénierie	Organisation
20	SASB (Products and Furnishings) (SASB, 2018a)	Mondiale	Rapports sur la durabilité dans le secteur des produits et de l'ameublement	Organisation
21	SASB (Real Estate) (SASB, 2018d)	Mondiale	Rapports sur la durabilité dans le secteur immobilier	Organisation
22	SASB (Waste Management) (SASB, 2018e)	Mondiale	Rapports sur la durabilité dans le secteur de la gestion des déchets	Organisation
23	Série GRI 200 (GRI, 2018a)	Mondiale	Rapports sur la performance économique	Organisation
24	Série GRI 300 (GRI, 2018b)	Mondiale	Rapports sur la performance économique	Organisation
25	Série GRI 400 (GRI, 2018c)	Mondiale	Rapport d'impact social	Organisation
26	Série sectorielle GRI (GRI, 2023)	Mondiale	Rapports sectoriels sur la durabilité	Organisation

Ces tableaux servent de point de référence pour comprendre les différents critères de durabilité et les approches encapsulées dans ces certifications et normes, formant la base d'une analyse plus approfondie dans les sections suivantes de la thèse.

Après la liste des certifications et normes sélectionnées, notre analyse s'étend aux domaines thématiques mis en évidence dans ces documents. Pour illustrer cela, nous utilisons à la fois des nuages de mots (Figure 3.1) et des tableaux de comptage de mots (Figure 3.2), offrant une double perspective sur les thèmes prédominants. Ces outils visuels soulignent l'alignement thématique avec les objectifs de durabilité dans l'environnement bâti, révélant « bâtiment » comme un terme fortement mis en avant dans les certifications, signifiant une forte emphase sur les pratiques durables dans le secteur de la construction. De même, « organisation » émerge comme un terme clé dans les normes, pointant vers une approche organisationnelle large en matière de durabilité.

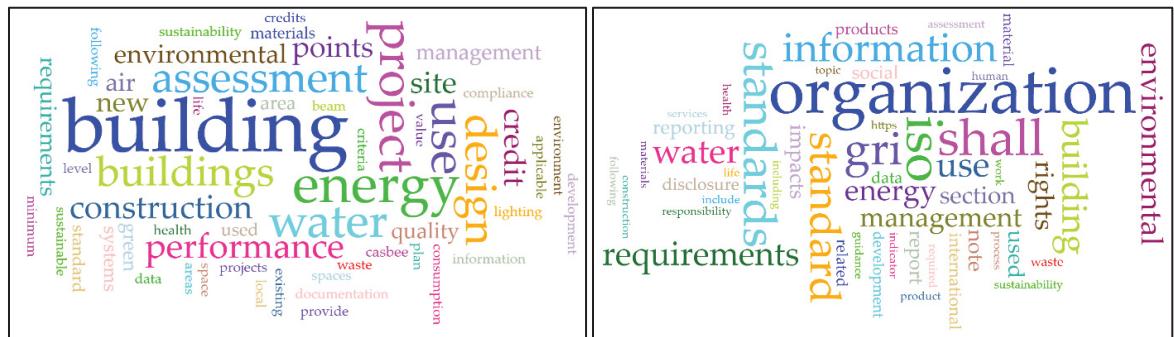


Figure 3.1 Nuage de mots pour chaque document de classification : À gauche : Certifications,
À droite : Normes

Le tableau de comptage de mots analyse davantage ces thèmes en affichant la fréquence et les tendances de distribution de termes spécifiques à travers une série de documents. La colonne « Count » dans le tableau quantifie le nombre total d'occurrences de chaque terme, fournissant une mesure simple de la prévalence thématique. De plus, une ligne de tendance suit la fluctuation de la fréquence de chaque terme d'un document à l'autre. Cette représentation dynamique, mise en évidence avec des marqueurs orange, capture les comptages les plus

élevés, les plus bas et ceux du dernier document, offrant des insights sur l'évolution de l'importance de certains thèmes de durabilité au sein du corpus des documents analysés.

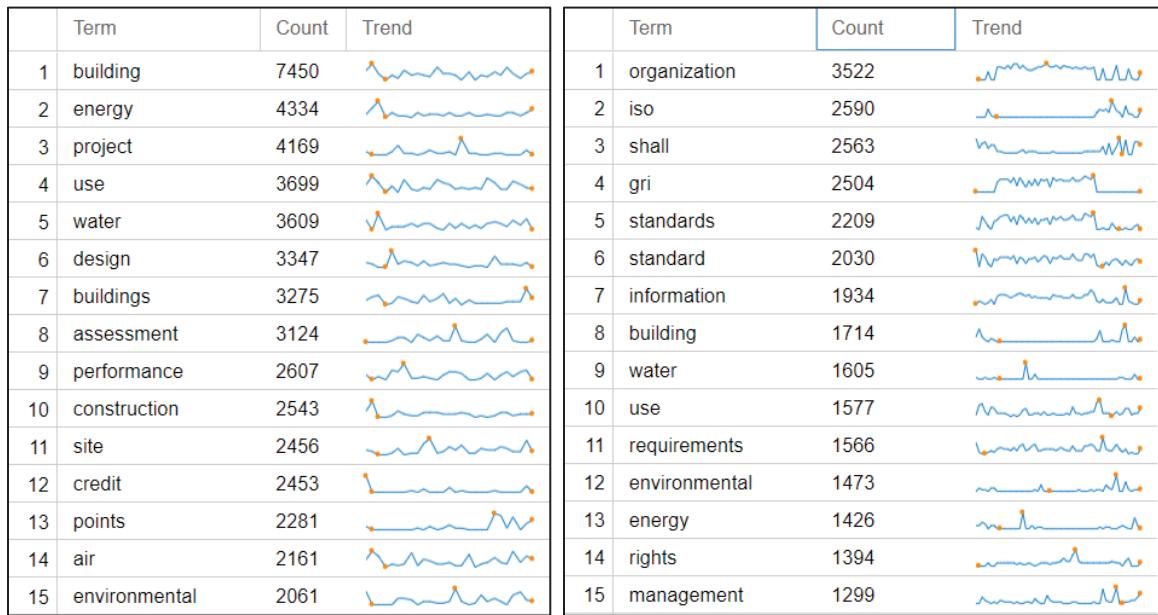


Figure 3.2 Tableau de comptage de mots pour chaque document de classification : à gauche : Certifications, à droite : Normes

Après la sélection des certifications et normes de construction, telle que discutée précédemment, nous avons procédé à l'extraction et à l'organisation des informations essentielles de chaque schéma pour comprendre leur portée et leur applicabilité dans le cadre de durabilité de l'industrie des actifs bâtis. Cette extraction de données a couvert divers aspects, y compris le nom officiel, le pays d'origine, le champ d'application (nouveaux bâtiments, rénovations, communautés, etc.), l'échelle de classification (grande ou petite), et les dates de publication, offrant une chronologie de leur évolution. Cette collection organisée de données est cruciale pour comprendre la diversité des pratiques de durabilité définies par différentes normes globales et régionales. Une partie des données recueillies pour les schémas de certification est présentée dans la Figure 3.3, illustrant l'approche adoptée pour cataloguer les schémas de certification et fournir une vue d'ensemble claire de leurs caractéristiques fondamentales.

	A. Name	Cert M...	Stand for	Count...	Scope	Scale	A.Y...	A.Y...	Ranking Method	Website
1	BNB		Bewertungssystem Nachhaltig...	Germany	New Bldg	Re	Large Scal...	2009	2017	1. Gold 2. Silver 3. Bronze https://www.bnbnachhaltigkeit.de/
2	BREEAM		Building Research Establishm...	UK	New Bldg	Re	Large Scal...	1990	2021	OUTSTANDING ≥ 85 EX... https://bregroup.com/pr...
3	DGNB		Deutsche Gesellschaft für Nachhaltigkeit	Germany	New Bldg	In	Large Scal...	2007	2020	Bronze: > 50% Silver: > ... https://www.dgnb.de/en/
4	Klimaaktiv			Austria	New Bldg	In	Large Scal...	2016	2019	Bronze: >35% Silver: >5...
5	LEED (USGBC)		Leadership in Energy and Envir...	USA	New Bldg	In	Small Scal...	1998	2021	Certified (40-49 credits) ... https://www.usgbc.org/l...
6	CASBEE		Comprehensive Assessment Syste...	Japan	New Bldg	In	Large Scal...	2001	2014	BEE≥3 Excellent (5 Stars) ... https://www.ibec.or.jp/C...
7	ENVISION			USA	Infrastructu...		Large Scal...	2012	2018	Verified: 20% Silver: 30... https://sustainableinfra...
8	BCA Green Mark		Building and Construction Au...	Singapore	New Bldg	In	Small Scal...	2005	2021	Green Mark Platinum: 9... https://www1.bca.gov.sg...
9	E.E.W.H.		Ecology, Energy Saving, Wast...	Taiwan	New Bldg	C	Small Scal...	1999	2011	(i) Qualified (30% of the...
10	Green Star			Australia	New	New	Large Scal...	2003	2022	1 to 6 stars
11	GRIHA		Green Rating for Integrated ...	India	New Bldg	In	Large Scal...	2007	2019	25-40 points - 1 star 41... https://www.grihaindia.o...
12	HK BEAM		Hong Kong Building Environmen...	Hong Kong	New Bldg			2010	2021	Bronze: at 40% of the cr... https://www.beamsociety.h...

Figure 3.3 Partie des données extraites pour les schémas de certification

3.3 Développement et analyse de la Matrice Consolidée de Durabilité (MCD)

Conformément à la méthodologie décrite dans les chapitres précédents, cette section présente les résultats du processus de développement de la MCD. Grâce à une approche en quatre étapes, nous avons synthétisé et intégré des indicateurs de durabilité issus d'un large éventail de certifications et de normes de construction. Les sous-sections suivantes détaillent les résultats de chaque étape, de l'agrégation initiale des indicateurs à la documentation finale de la matrice.

3.3.1 Extraction et agrégation des catégories et indicateurs à travers les schémas

Le processus d'extraction des données s'est concentré sur l'enregistrement des principales catégories et des indicateurs associés (ou crédits) utilisés par chaque schéma d'évaluation, dont chacun employait des terminologies variées telles que « crédits » dans LEED, « issues » dans BREEAM et « critères » dans DGNB. Ce travail fondamental s'est avéré crucial pour établir une compréhension des approches et des paramètres de mesure de chaque schéma. Un examen de la documentation pertinente, des lignes directrices, des critères et des ressources supplémentaires pour chaque schéma a facilité une compréhension claire des spécificités et des nuances de chaque catégorie et indicateur, préparant le terrain pour une analyse plus approfondie. Les résultats de ce processus d'extraction sont détaillés dans le Tableau 3.3, présentant l'extraction des catégories et des indicateurs de chaque schéma.

Tableau 3.3 Extrait des catégories et des indicateurs issus des schémas sélectionnés

NAME	Country of Origin	Sectors/Categories/Criteria	Weight	Indicators / Credits
BNB (Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen OR Assessment System for Sustainable Building)	Germany	1.ecological quality	22.50%	<p>(a) effects on the global and local environment Global Warming Potential/ Ozone Depletion Potential/ Photochemical Ozone Creation Potential/ Acidification Potential/ Eutrophication Potential/ Risks to the Local Environment/ Sustainable Material Extraction/Biodiversity</p> <p>(b) Demand of Resources Primary Energy Demand/ Drinking Water Demand and Quantity of Wastewater/ Land Consumption</p>
		2.economic quality	22.5	<p>(a) life cycle costs Building-related Life Cycle Costs</p> <p>(b) Economic Efficiency and Value Stability Space Efficiency/ Adaptability</p>
		3.socio-cultural and functional quality	22.5	<p>(a) health, comfort, user satisfaction Thermal Comfort/ Indoor Air Quality/ Acoustic Comfort/ Visual Comfort/ Influence of the User / Use Qualities/ Safety</p> <p>(b) functionality Barrier-free Building/ Accessibility/ Mobility Infrastructure</p> <p>(c) Ensuring Design Quality Design and Urban Quality/ Art in Architecture</p>
		4.technical quality	22.5	<p>(a) Technical Execution Sound Insulation/ Heat Insulation and Protection against Condensate/ Cleaning and Maintenance-friendliness/ Dismantling, Waste Separation and Utilisation/ Resistance to Natural Disasters/ Maintenance Friendliness of Building Systems</p>
		5.process quality	10	<p>(a) Management and Design Project Preparation/ Integrated Design and Planning/ Complexity and Optimisation of Planning/ Invitation to Tender and Contract Awarding/ Preconditions for Optimum Utilisation and Management</p> <p>(b) Building Construction Building Site/Building Processes</p> <p>Quality Assurance of Building Construction/ Controlled Commissioning</p>
		6.location Profile		<p>(a) Location Profile Risks at the Micro-Site/ Conditions at the Micro-Site/ Image and Character of Location and Quarter/ Traffic Connections/ Vicinity to Use-specific Services/ Supply Lines/Site Development</p>
DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen OR German Sustainable Building Council)	Germany	1. ENVIRONMENTAL QUALITY	22.50%	Building life cycle assessment/ Local environmental impact/ Sustainable resource extraction/ Potable water demand and waste water volume/ Land use/ Biodiversity at Life cycle cost/ Flexibility and adaptability/ Commercial viability
		2. ECONOMIC QUALITY	22.50%	Thermal comfort/ Indoor air quality/ Acoustic comfort/ Visual comfort/ User control/ Quality of indoor and outdoor spaces/ Safety and security/ Design for all
		3. SOCIOCULTURAL AND FUNCTIONAL QUALITY	22.50%	Fire safety/ Sound insulation/ Quality of the building envelope/ Use and integration of building technology/ Ease of cleaning building components/ Ease of recovery and recycling/ Immissions control/ Mobility infrastructure
		4. TECHNICAL QUALITY	15%	Comprehensive project brief/ Sustainability aspects in tender phase/ Documentation for sustainable management/ Urban planning and design procedure/ Construction site/construction process/ Quality assurance of the construction/ Systematic commissioning/ User communication/ FM-compliant planning
		5. PROCESS QUALITY	12.50%	Local environment/ Influence on the district/ Transport access/ Access to amenities
		6. SITE QUALITY	5%	

3.3.2 Comparaison, alignement et identification des indicateurs communs

Après l'agrégation initiale des catégories et des indicateurs, une comparaison a été réalisée pour identifier les points communs et les différences entre les différents schémas. Cette comparaison a pris en compte plusieurs aspects, y compris les descriptions, les processus de mesure, les outils utilisés, les unités de mesure, les composants évalués et les résultats. L'objectif était d'identifier les indicateurs avec des attributs partagés ou des objectifs similaires à travers différents systèmes, mettant en évidence les domaines potentiels d'alignement. Cette analyse était cruciale pour identifier les indicateurs partagés qui faciliteraient le processus de fusion et de classification dans le développement de la MCD. Une partie des résultats détaillés

pour l'identification des indicateurs communs est résumée dans le Tableau 3.4, qui examine la description de chaque indicateur, le processus de mesure et les outils utilisés.

Tableau 3.4 Extrait de l'examen de la description de chaque indicateur, du processus de mesure et des outils utilisés

Indicators	Description	Measuring Process / Tools
Fundamental Commissioning	Fundamental commissioning can be thought of as the best practices completed by the commissioning authority in ensuring that building performance requirements are identified early in a project's development and verifying that systems have been installed in compliance with those requirements. Fundamental commissioning can be thought of as the best practices completed by the commissioning authority in ensuring that building performance requirements are identified early in a project's development and verifying that systems have been installed in compliance with those requirements	Designate a Commissioning Authority (CxA) to lead, review, and oversee completion of commissioning process 1- Must be experienced for two similar projects 2- independent person 3- for projects less than 50,000 SF, commissioning can be done by design or construction team.
Enhanced Commissioning	The intent of Enhanced Commissioning is to "Begin the commissioning process early during the design process and execute additional activities after systems performance verification is completed."	1- Designating an independent CxA to lead, review, and oversee the completion of all commissioning process activities prior to the start of the construction documents phase. 2- Conduct, at a minimum, one commissioning design review of the OPR, BOD, and design documents prior to mid-construction documents phase and back-check the review comments in the subsequent design submission. 3- Review contractor submittals applicable to systems being commissioned for compliance with the OPR and BOD concurrent with A/E reviews and submitted to the design team and the Owner. 4- Develop a systems manual that provides future operating staff the information needed to understand and optimally operate the commissioned systems. 5- Verify that the requirements for training operating personnel and building occupants are completed; and 6- Assure the involvement by the CxA in reviewing building operation within 10 months after substantial completion with O&M staff and occupants.
Land Use	Using land and soil sparingly and in a way that minimises the impact on this land and soil is necessary not just from an ecological standpoint; against a backdrop of increasing infrastructure costs, financial aspects must also be considered. Sparing use of land that minimises the impact on this land at a local level, results in lower development, waste water charges and an improved microclimate.	1- Land use 2- Soil sealing factor and/or compensatory measures
BIM Integration	Encourage the design team to discuss and work through the design platform and deliver holistic solution using Building Information Modelling	(a) Coordinated Use of BIM within Design Teams (b) Coordinated Use of BIM within Design and Construction Teams (c) BIM for Time (d) BIM for Facility Management Use

3.3.3 Présentation des tableaux comparatifs pour les certifications et les normes

Dans le développement de la MCD, des tableaux comparatifs distincts ont été créés pour les certifications et les normes afin d'organiser et de présenter les indicateurs communs identifiés. Pour les certifications, un tableau comparatif a été élaboré pour encapsuler les aspects essentiels de chaque schéma de certification, assurant une intégration cohérente et significative des indicateurs fusionnés et classifiés. Une partie de ce tableau comparatif des schémas de certification est résumée dans le Tableau 3.5.

Tableau 3.5 Partie du tableau comparatif pour les schémas de certification

No.	Certification name	Country of Origin	Scope		Scale	Date	Comparable criteria (Building Certifications)																				
							Energy									Air											
			Year of last Update/Revision	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	BNB	Germany	New Construction Renovation/ Refurbishment In-Use	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
2	BREEAM	UK	Communities	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
3	DGNB	Germany	Infrastructures	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
4	Klimaaktiv	Austria	Historic Building	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
5	LEED (USGBC)	USA	Interior	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
6	CASBEE	Japan	Policy	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
7	ENVISION	USA	Large Scale Projects	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
8	BCA Green Mark	Singapur	Small Scale Projects	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
9	E.E.W.H.	Taiwan	Year of Publication	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
10	Green Star	Australia & New Zealand	Historic Building	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
11	GRIIHA	India	Interior	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
12	HK BEAM	Hong Kong	Policy	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
13	QGNB	Austria	Large Scale Projects	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
14	Green Globes	Canada/ USA	Small Scale Projects	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
15	Lider A	Portugal	Year of Publication	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
16	WELL	USA	Historic Building	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
17	LEVEL(S)	EU	Interior	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
18	NABERS	Australia	Large Scale Projects	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
19	MINERGIE	Swiss	Small Scale Projects	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
20	MINERGIE-ECO	Swiss	Year of Publication	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
21	GBC HB	Italy	Historic Building	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
22	Passive House (PHI)	USA	Interior	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
23	One Planet (Bioregional)	UK	Large Scale Projects	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
24	IGBC	India	Small Scale Projects	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
25	ITACA	Italy	Year of Publication	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
SUM				6	2	17	10	7	7	1	4	9	2	4	2	6	1	1	1	0	10	6	4	2	1	5	1

De même, pour les normes, une approche parallèle a été entreprise pour consolider les indicateurs et les catégories communs, visant à fournir une perspective intégrée alignée sur les objectifs de durabilité plus larges dans l'industrie des actifs bâti. Cet effort de consolidation a abouti à la création d'un tableau comparatif pour les normes, détaillé dans le Tableau 3.6.

Tableau 3.6 Partie du tableau comparatif des normes

Ces tableaux servent de composants critiques de la MCD, facilitant une comparaison et une intégration claires des indicateurs de durabilité provenant de divers schémas de certification et de normes en une structure cohérente.

3.3.4 Développement, finalisation et documentation de la MCD

L'intégration des tableaux comparatifs pour les certifications et les normes dans une matrice unifiée a été motivée par le besoin de développer un outil simplifiant l'évaluation des indicateurs de durabilité. Cette matrice unifiée sert d'artefact crucial pour rationaliser le processus d'évaluation, permettant une approche plus simple pour mener des enquêtes, des

entretiens et faciliter l'analyse de la matrice elle-même. De plus, cette intégration jette les bases pour l'incorporation des capacités du BIM et des DT, enrichissant davantage la capacité de la recherche à évaluer et mettre en œuvre efficacement des pratiques de durabilité. La Figure 3.4 illustre une vue schématique de la MCD.

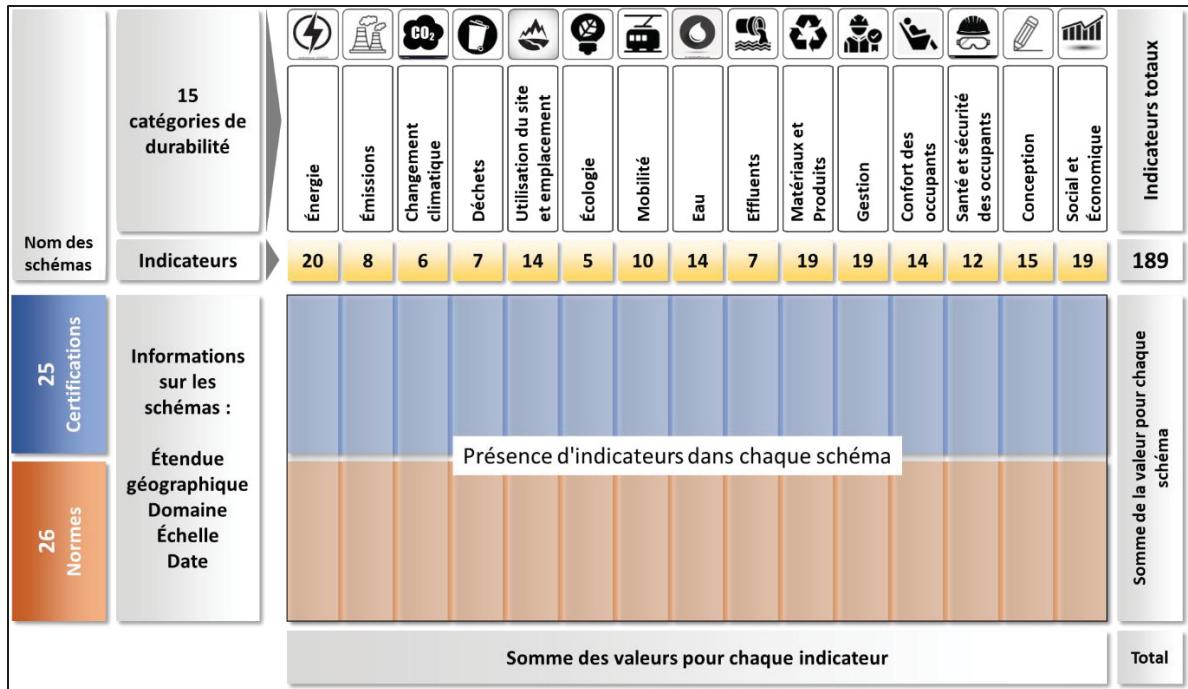


Figure 3.4 Vue schématique de la MCD

Le développement de cette matrice a impliqué le mélange des tableaux comparatifs préliminaires en une structure cohérente, l'harmonisation des indicateurs pour assurer une vue d'ensemble complète. Un exemple illustratif de cette harmonisation est l'indicateur « **Réduction des émissions de gaz à effet de serre** ». Cet indicateur a été développé en synthétisant des éléments chevauchants et complémentaires provenant de diverses certifications et normes. Par exemple :

- LEED met l'accent sur la réduction des émissions opérationnelles grâce à des mesures d'efficacité énergétique, l'harmonisation des réseaux et l'intégration des énergies

renouvelables, en fournissant des méthodologies détaillées pour calculer les émissions de GES en équivalence CO₂ (USGBC, 2021).

- Envision aborde la réduction des émissions tout au long du cycle de vie d'un projet, y compris les phases de construction et d'exploitation, et intègre des stratégies telles que les compensations carbone et la séquestration dans le cadre d'une approche climatique globale (ENVISION, 2018).
- BNB se concentre sur des calculs précis des émissions de gaz à effet de serre ajustées et non ajustées pendant l'exploitation du bâtiment, en prenant en compte des métriques spécifiques de consommation énergétique et des émissions en amont (BNB, 2019).
- Normes GRI mettent en avant l'importance d'un reporting standardisé couvrant plusieurs périmètres d'émissions (Scopes 1, 2 et 3) tout en incluant divers gaz à effet de serre au-delà du CO₂, comme le méthane et l'oxyde nitreux (GRI, 2018b).
- LBC promeut des stratégies de carbone net positif, combinant séquestration du carbone, production d'énergie renouvelable et planification de la résilience (LBC, 2019).

Ces différentes approches ont été comparées et consolidées en une description unique : « Minimiser ou éliminer le rejet de gaz contribuant au changement climatique, tels que le dioxyde de carbone, le méthane et l'oxyde nitreux, par l'utilisation de pratiques et de technologies durables. »

Cette intégration garantit que l'indicateur final reflète les intentions fondamentales de chaque source tout en s'alignant sur une perspective holistique et actionnable de la réduction des gaz à effet de serre. Par exemple, alors que LEED et Envision mettent l'accent sur différentes étapes du cycle de vie d'un bâtiment, l'indicateur combiné traite des réductions d'émissions à la fois pendant les phases opérationnelles et incarnées. De même, en incluant divers gaz (par exemple, le méthane, l'oxyde nitreux) et en permettant une flexibilité pour les pratiques émergentes telles que les compensations ou la séquestration du carbone, l'indicateur reflète les objectifs mondiaux évolutifs en matière de durabilité. Le développement de l'indicateur « Réduction des émissions de gaz à effet de serre » illustre l'effort global de la MCD visant à équilibrer spécificité et praticité. Cette approche garantit que la matrice est à la fois

suffisamment détaillée pour répondre aux exigences des certifications diverses et suffisamment simplifiée pour faciliter son application dans divers contextes.

De plus, la MCD a été raffinée de manière itérative lors des étapes d'évaluation, sur la base des retours des ateliers et des insights des experts de l'industrie. Ce processus s'est achevé par la vérification de l'exactitude et de l'exhaustivité des indicateurs, menant à la finalisation et à la documentation complète de la matrice. Le Tableau 3.7 illustre une partie de la MCD incluant toutes les certifications et normes. L'ensemble de la MCD, ainsi que la liste complète des certifications et normes, est fourni en Annexe 1.

Tableau 3.7 Partie de la MCD incluant toutes les certifications et normes

Certifications	Classification	No.	Nom du schéma	Portée géographique	Domaine	Échelle	Année de publication	Année de la dernière mise à jour/révision	Critères comparables (certification)	
									Énergie	
									EN 01 Demande en énergie primaire	EN 02 Réponse flexible à la demande
1		1	BNB	Allemagne	Durabilité de l'environnement bâti	Actif	2009	2017	1	1
2		2	BREAM	ROYAUME-UNI	Durabilité de l'environnement bâti	Actif	1990	2021	1	1
3		3	DGNB	Allemagne	Durabilité de l'environnement bâti	Actif	2007	2020	1	1
4		4	Klimaaktiv	Autriche	Durabilité de l'environnement bâti	Actif	2016	2019	1	1
5		5	LEED (USGBC)	États-Unis	Durabilité de l'environnement bâti	Actif	1998	2021	1	1
6		6	CASBEE	Japon	Durabilité de l'environnement bâti	Actif	2001	2014	1	1
7		7	ENVISION	États-Unis	Durabilité des infrastructures	Actif	2012	2018	1	1
8		8	BCA Green Mark	Singapour	Durabilité de l'environnement bâti	Actif	2005	2021	1	1
9		9	E.E.W.H.	Taiwan	Durabilité de l'environnement bâti	Actif	1999	2011		
10		10	Green Star	Australie et Nouvelle-Zélande	Durabilité de l'environnement bâti	Actif	2003	2022	1	1
11		11	GRIHA	Inde	Durabilité de l'environnement bâti	Actif	2007	2019	1	1
12		12	HK BEAM	Hong Kong	Durabilité de l'environnement bâti	Actif	2010	2021	1	1
13		13	OGNB	Autriche	Durabilité de l'environnement bâti	Actif	2003	2009	1	1
14		14	Green Globes	Canada/États-Unis	Durabilité de l'environnement bâti	Actif	2000	2021	1	1
15		15	Lider A	Portugal	Durabilité de l'environnement bâti	Actif	2005	2019	1	1
16		16	WELL	États-Unis	Santé et bien-être dans l'environnement bâti	Actif	2014	2022	1	1

3.3.4.1 Catégories de la MCD

Cette sous-section présente les 15 différentes catégories de durabilité telles que définies dans la MCD. Chaque catégorie englobe un aspect unique de la durabilité, offrant une approche structurée pour évaluer divers aspects de la durabilité dans les projets de construction.

Tableau 3.8 Introduction aux catégories de la MCD

No.	Catégorie	Brève description
01	Énergie	La catégorie Énergie vise à identifier les méthodes, contrôles et politiques de gestion qui réduisent la consommation totale d'énergie d'un actif. Cette catégorie comprend 20 indicateurs.
02	Émissions	La catégorie Émissions vise à évaluer dans quelle mesure les activités et processus réalisés sur une propriété causent un dommage limité à l'environnement par la génération de polluants, qui ont généralement des impacts directs sur la santé humaine. Cette catégorie contient 8 indicateurs.
03	Changement climatique	Le changement climatique est une modification à long terme des modèles météorologiques moyens qui définissent les climats locaux, régionaux et mondiaux de la Terre. La construction durable, qui utilise des pratiques et des matériaux respectueux de l'environnement, peut aider à atténuer l'impact du changement climatique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre et l'utilisation des ressources. Cette catégorie contient 6 indicateurs.
04	Déchets	La catégorie Déchets vise à reconnaître la mise en œuvre de politiques et de systèmes qui entendent réduire la production de déchets, ainsi qu'à améliorer les niveaux de tri et de recyclage dans l'industrie des actifs bâties. Cette catégorie contient 7 indicateurs.
05	Utilisation du site et emplacement	L'utilisation et la modification des zones naturelles ou des zones sauvages par les humains sont connues sous le terme d'utilisation des terres ou du site. L'objectif de cette catégorie est de mesurer l'impact sur l'environnement environnant des activités ayant lieu sur une propriété. L'intention est de s'assurer que les effets de l'utilisation des terres sont minimisés. Cette catégorie comprend 14 indicateurs.

Tableau 3.8 Introduction aux catégories de la MCD (suite)

No.	Catégorie	Brève description
06	Écologie	L'écologie est l'étude scientifique des relations entre les organismes vivants et leur environnement. Elle englobe les interactions des organismes entre eux et avec leur environnement physique et biologique, y compris le flux d'énergie et de nutriments à travers les écosystèmes, et les impacts des activités humaines sur le monde naturel. Cette catégorie comprend 5 indicateurs.
07	Mobilité	L'objectif de cette catégorie est de reconnaître l'adoption de politiques qui surveillent et améliorent les effets liés au transport, la capacité des parties prenantes à utiliser des modes de transport alternatifs, et la disponibilité des installations à proximité. Cette catégorie comprend 10 indicateurs.
08	Eau	Le développement durable dépend fortement de l'eau, qui est vitale pour la survie humaine, les écosystèmes sains et le progrès socio-économique. Cette catégorie évalue dans quelle mesure une propriété réduit la consommation et la demande en eau et évalue d'autres indicateurs liés à la santé de l'eau. Cette catégorie comprend 14 indicateurs.
09	Effluents	Les effluents artificiels sont couramment perçus comme une pollution de l'eau, résultant du rejet d'eaux usées traitées ou d'eaux usées industrielles. Elle se classe dans une catégorie avec 7 indicateurs qui évaluent l'impact des effluents sur les actifs bâtis durables.
10	Matériaux et produits	La durabilité est un facteur clé à considérer lors de la sélection des matériaux, en plus de leurs propriétés, de leur coût et de la facilité de fabrication pour des applications spécifiques. Cette catégorie comprend 19 indicateurs et vise à aborder l'effet des matériaux sur le développement durable dans l'industrie des actifs bâtis.
11	Gestion	La catégorie Gestion évalue dans quelle mesure les politiques et systèmes de gestion abordent les impacts environnementaux et la sensibilisation des parties prenantes. Cette catégorie comprend 19 indicateurs.
12	Confort des occupants	Le confort des occupants désigne la capacité d'un bâtiment à fournir un environnement sain qui favorise la performance et la productivité. L'objectif de cette catégorie est de mesurer dans quelle mesure les activités et les espaces à l'intérieur et autour d'une propriété soutiennent un cadre sain et confortable pour ses occupants. Cette catégorie comprend 14 indicateurs.

Tableau 3.8 Introduction aux catégories de la MCD (suite)

No.	Catégorie	Brève description
13	Santé et sécurité des occupants	La santé et la sécurité des occupants se réfèrent aux efforts effectués pour promouvoir et maintenir le bien-être physique et mental des personnes qui résident ou travaillent dans un bâtiment ou un espace en s'assurant que l'environnement est exempt de dangers et favorise une bonne santé. Cette catégorie comprend 12 indicateurs.
14	Conception	La conception durable implique la création de bâtiments et de produits ayant un impact minimal sur l'environnement, visant à promouvoir le bien-être des occupants et à réduire les effets négatifs des actifs bâties sur le monde naturel. Cette catégorie comprend 15 indicateurs.
15	Social et économique	La perspective sociale sur la durabilité met l'accent sur le bien-être des personnes et des communautés, en promouvant l'équité et la justice sociale. La perspective économique se concentre sur l'équilibre entre la croissance économique et le développement avec la protection de l'environnement et la conservation des ressources, assurant une prospérité à long terme pour les générations actuelles et futures. Cette catégorie comprend 19 indicateurs.

3.3.4.2 Indicateurs de la MCD

Dans la formation de la MCD, un ensemble d'indicateurs de durabilité a été sélectionné à travers une revue approfondie de littérature, des discussions avec des experts de l'industrie et l'analyse des certifications et normes de durabilité établies. Ce processus a conduit à l'identification de 189 indicateurs couvrant diverses dimensions de la durabilité. Une partie de ces indicateurs, présentée ci-dessous, illustre l'étendue considérée pour atteindre la durabilité dans le secteur de la construction. La liste complète des indicateurs suivie de leurs descriptions se trouve à l'Annexe 2.

Tableau 3.9 Une partie des indicateurs de la MCD

Catégorie	NO	Code	Indicateurs
Énergie	1	EN01	Demande en énergie primaire
	2	EN02	Réponse flexible à la demande
	3	EN03	Efficacité /Performance énergétique
	4	EN04	Surveillance énergétique
	5	EN05	Quantification de l'énergie
	6	EN06	Isolation
	7	EN07	Prévisions de consommation
	8	EN08	Étanchéité de l'enveloppe du bâtiment / Pont thermique
	9	EN09	Énergie renouvelable
	10	EN10	Mise en service améliorée
	11	EN11	Harmonisation du réseau
	12	EN12	Économie d'énergie / réduction
	13	EN13	Sous-comptage pour les locataires
	14	EN14	Densité de puissance / Intensité énergétique
	15	EN15	Consommation d'énergie décentralisée
	16	EN16	Sources alternatives non renouvelables
	17	EN17	Gestion du carburant des véhicules
	18	EN18	Génération de gaz de décharge
	19	EN19	Matériaux pour la récupération d'énergie
	20	EN20	Énergie exportée
Émissions	21	EM01	Émissions de NOx/SOx
	22	EM02	Matières particulières
	23	EM03	Composés organiques volatils (COV)
	24	EM04	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)
	25	EM05	Polluants atmosphériques dangereux (PAD)
	26	EM06	Ventilation
	27	EM07	Qualité de l'air intérieur
	28	EM08	Installations de traitement des déchets à proximité de zones à forte densité de population

3.4 Intégration des capacités du BIM et des jumeaux numériques

L'intégration du BIM et des DT au sein de la MCD, comme détaillé dans le chapitre méthodologique, est un élément crucial de cette recherche, axé sur la manière dont ces technologies numériques peuvent soutenir la durabilité dans l'environnement bâti. Ce processus, guidé par les informations issues de la revue de littérature, examine les applications potentielles du BIM et des DT à travers les 15 catégories de durabilité identifiées dans la MCD. Il souligne les diverses fonctionnalités que ces technologies apportent aux efforts de durabilité, de l'efficacité énergétique et de la gestion des ressources à la conception durable et au confort des occupants.

Cette cartographie détaillée des capacités du BIM et des DT dans le cadre de durabilité, illustrée dans le Tableau 3.10, est essentielle pour le développement de l'artefact et sera examinée plus en détail lors de la phase d'évaluation de l'artefact. Plus précisément, lors de l'étape des entretiens avec des experts, les capacités du BIM et des DT pour chaque indicateur de durabilité dans chaque catégorie seront évaluées individuellement.

Tableau 3.10 Cartographie des capacités BIM et DT dans les catégories de développement durable

Capacités BIM et DT	Exemple d'implémentation BIM/DT	Référence
Catégorie 01 - Énergie		
Simulation de la performance énergétique	Analyse la performance environnementale des bâtiments multi-étages pour identifier la forme et l'orientation optimales pour l'efficacité énergétique en utilisant le BIM et la simulation, en se concentrant sur la minimisation de la consommation d'énergie et la maximisation des bénéfices environnementaux et économiques.	(Sabah Haseeb et al., 2023)
Gestion des énergies renouvelables	Définit un workflow collaboratif Heritage Building Information Modelling (HBIM) pour intégrer des systèmes photovoltaïques avancés dans les bâtiments historiques, abordant des défis tels que l'acceptabilité sociale et l'impact esthétique.	(Lucchi & Agliata, 2023)
Surveillance énergétique en temps réel	Introduit une méthode basée sur le BIM pour la surveillance en temps réel de la consommation d'énergie dans les constructions résidentielles en hauteur, couvrant les étapes du cycle de vie, de la préparation à la démolition.	(S. Liu, 2021)
Analyse des charges thermiques	Utilise le BIM et la dynamique des fluides computationnelle (CFD) pour l'analyse thermique des bâtiments situés sur le pergélisol, en se concentrant sur la quantification de l'impact de l'infrastructure sur la fonte du pergélisol et en recommandant des adaptations de conception pour la stabilisation des sols et la réduction du stress thermique.	(Younis et al., 2023)
Gestion de la réponse à la demande	Propose un cadre d'ordonnancement optimal pour les appareils ménagers intégrant des systèmes solaires sur les toits, en se concentrant sur la réduction des coûts d'électricité, la réponse à la demande de tarification en temps réel et le confort des utilisateurs. Utilise la technologie des jumeaux numériques pour la surveillance en temps réel et l'interaction utilisateur afin d'optimiser l'ordonnancement des appareils pour l'efficacité et la rentabilité.	(Almutairi et al., 2023)

Tableau 3.10 Cartographie des capacités BIM et DT dans les catégories de développement durable (suite)

Capacités BIM et DT	Exemple d'implémentation BIM/DT	Référence
Interaction et harmonisation avec le réseau	Applications des jumeaux numériques dans les réseaux intelligents, mettant en évidence leur rôle dans la gestion des actifs, la maintenance prédictive, l'optimisation énergétique et la réponse à la demande, en se concentrant sur la gestion des données et la prise de décision améliorée par l'IA.	(Djebali et al., 2024)
optimisation de la consommation d'énergie	Se concentre sur l'intégration du BIM et de la modélisation énergétique des bâtiments (BEM) pour optimiser la conception des fenêtres et la performance de l'enveloppe pour l'efficacité énergétique, en utilisant des simulations énergétiques et des modèles d'optimisation pour réduire l'intensité de l'utilisation de l'énergie (EUI) et les coûts.	(Truong et al., 2024)
Analyse énergétique du cycle de vie	Présente un cadre intégrant l'optimisation, le BIM 6D et l'analyse du cycle de vie (ACV) pour les rénovations d'efficacité énergétique dans les bâtiments, en mettant l'accent sur le coût du cycle de vie, les impacts environnementaux et l'identification d'alternatives de rénovation efficaces. Démontre des économies d'énergie significatives et des réductions de l'impact sur le réchauffement climatique grâce à des mesures de rénovation et à des choix de matériaux.	(Motalebi et al., 2022)
Mise en service améliorée des bâtiments	Explore l'utilisation du BIM pour faciliter le processus de mise en service des bâtiments, détaillant le développement et la mise en œuvre d'un protocole de mise en service activé par le BIM dans des projets pilotes.	(Frommweiler & Poirier, 2023)
Mesurage et sous-mesurage énergétique	Utilisation des données des compteurs intelligents pour développer des benchmarks énergétiques quotidiens des bâtiments, permettant la gestion énergétique urbaine en temps réel grâce à la technologie des jumeaux numériques.	(Francisco et al., 2020)
Analyse des données en temps réel pour les systèmes énergétiques	Explore l'intégration de la technologie des jumeaux numériques (DT) pour le stockage thermique sûr et efficace dans les bâtiments intelligents, en se concentrant sur l'utilisation de matériaux à changement de phase (PCM) et des modèles DT pour l'analyse et l'optimisation en temps réel du stockage et de la distribution de l'énergie.	(Lv et al., 2023)
Catégorie 02 - Émissions		
Suivi et analyse des émissions	Présente un workflow BIM intégré pour contrôler les émissions de COV et prédire la qualité de l'air intérieur (IAQ), en se concentrant sur l'importance de l'IAQ dans la conception de bâtiments sains et en fournissant des outils pour la vérification rapide des performances à travers les différentes phases de conception.	(D'Amico et al., 2020)

Tableau 3.10 Cartographie des capacités BIM et DT dans les catégories de développement durable (suite)

Capacités BIM et DT	Capacités BIM et DT	Capacités BIM et DT
Simulation de la qualité de l'air intérieur	Développe un cadre de prédition et d'optimisation rapide intégrant le BIM et les simulations CFD avec un modèle de prédition hybride pour équilibrer l'IAQ, le confort thermique et la consommation d'énergie dans les pièces climatisées, réalisant des économies d'énergie significatives tout en maintenant le confort et la qualité de l'air.	(Hou et al., 2022)
Optimisation du système de ventilation	Présente le système d'alerte précoce de ventilation (VEWS) développé pour optimiser les systèmes CVC afin d'améliorer la ventilation en réponse à la COVID-19, en utilisant un cadre Smart Campus Digital Twin intégrant l'IoT, le BIM et l'IA pour prévoir et gérer la qualité de l'air intérieur dans les espaces de travail.	(Costa et al., 2023)
Gestion de la qualité de l'air	Développe un système intégré de surveillance des polluants atmosphériques pour les chantiers de construction, combinant le BIM, l'informatique en périphérie et un réseau de capteurs distribués pour améliorer la visualisation, la prédition et la gestion de la qualité de l'air, démontrant des améliorations significatives dans la détection de la pollution et les capacités de réponse d'urgence.	(Z. Xu et al., 2022)
Catégorie 03 – Changement climatique		
Analyse de la réduction des émissions de GES	Utilise le BIM et le SIG intégrés avec l'ACV pour analyser les émissions de GES de la construction préfabriquée, soulignant la réduction significative des émissions par rapport à la construction traditionnelle et mettant l'accent sur la phase de production comme principale source d'émissions. Offre une méthode complète pour l'analyse des émissions de GES dans la préfabrication, soutenant les objectifs de construction verte et à faible émission de carbone.	(Gao et al., 2024)
Modélisation de l'impact écosystémique	Introduit le cadre Green Urban Scenarios (GUS) pour la représentation en jumeau numérique et la simulation des forêts urbaines, utilisant la modélisation basée sur les agents pour intégrer l'infrastructure verte dans les contextes urbains pour prévoir les impacts, y compris la biodiversité, les services écosystémiques et la séquestration du carbone, basé sur l'intégration complète des données et les modèles d'apprentissage automatique.	(Ozel & Petrovic, 2024)

Tableau 3.10 Cartographie des capacités BIM et DT dans les catégories de développement durable (suite)

Capacités BIM et DT	Capacités BIM et DT	Capacités BIM et DT
Catégorie 04 - Déchets		
Analyse des flux de déchets	Démontre l'intégration des technologies de réalité virtuelle (RV) et de jumeaux numériques dans les pratiques d'économie circulaire, en se concentrant sur un cas de simulation d'une usine de démontage des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), montrant comment les technologies de l'industrie 4.0 peuvent améliorer la gestion durable des déchets et l'efficacité des ressources.	(Rocca et al., 2020)
Gestion des déchets de construction et de démolition	Introduit un système basé sur le BIM pour la planification visuelle de la gestion des déchets de démolition, incorporant une analyse d'inventaire et des algorithmes MCDA pour soutenir la prise de décision durable, améliorant les taux de recyclage et réduisant les émissions de carbone et les coûts d'élimination des déchets dans les projets de démolition.	(Han et al., 2024)
Modélisation des systèmes de valorisation énergétique des déchets	Enquête sur la capacité des déchets et l'impact environnemental d'un quartier résidentiel utilisant la méthodologie ACV, en analysant les types de déchets incluant les déchets solides municipaux (MSW), liquides et de démolition dans une perspective « du portail à la tombe ». Utilise le BIM et les modèles énergétiques pour évaluer les potentiels de récupération d'énergie et la demande énergétique opérationnelle, trouvant une compensation énergétique limitée des processus de recyclage des déchets et soulignant les conséquences environnementales des systèmes de gestion des déchets.	(Sözer & Sözen, 2020)
Catégorie 05 - Utilisation du site et emplacement		
Analyse de sélection de site	Utilise l'acquisition de données géospatiales et l'intégration Civil-BIM pour la modélisation topographique et la sélection de sites, en se concentrant sur l'optimisation de l'utilisation des terres autour de la rivière Tamjin en évaluant les volumes de coupe et de remplissage, démontrant une méthode pour améliorer la précision de la sélection des sites grâce à des technologies de mesure avancées et la visualisation 3D.	(Moon et al., 2010)
Réduction de l'effet îlot de chaleur	Utilise les jumeaux numériques pour analyser l'impact de la couverture végétale sur les effets d'îlot de chaleur urbain dans une ville côtière, mettant en évidence l'importance de la végétation dans la régulation du microclimat et la planification urbaine pour atténuer les phénomènes d'îlot de chaleur.	(Qi et al., 2022)

Tableau 3.10 Cartographie des capacités BIM et DT dans les catégories de développement durable (suite)

Capacités BIM et DT	Capacités BIM et DT	Capacités BIM et DT
Planification de la réhabilitation des friches industrielles	Explore l'application du BIM pour aborder les défis associés aux zones sous-utilisées, notamment les friches industrielles, grâce à des représentations numériques现实的 pour les processus de prise de décision et de régénération, incluant des simulations d'impacts environnementaux tels que les conditions du vent ou la propagation de la pollution.	(Faltejsek et al., 2018)
Catégorie 06 - Écologie		
Évaluation de l'impact sur la biodiversité	Introduit une approche novatrice appelée « Interspecies Money » pour la conservation de la biodiversité, utilisant des jumeaux numériques et l'apprentissage profond avec des pièges photographiques pour autonomiser les gardiens de la faune.	(Fergus et al., 2023)
Cartographie de la valeur écologique	Développe un cadre utilisant le balayage laser aéroporté et les mesures au sol pour créer des cartes structurées des arbres, facilitant la cartographie à grande échelle des attributs forestiers tels que la densité des arbres, la distribution en hauteur et les modèles spatiaux.	(Kostensalo et al., 2023)
Catégorie 07 - Mobilité		
Analyse de l'accessibilité	Explore un processus de sélection de site paramétré pour une entrée de parc en utilisant la plateforme Rhino + Grasshopper, intégrant la modélisation de l'information sur le paysage (LIM) avec une simulation de foule pour optimiser le placement de l'entrée basé sur l'accessibilité, la densité de foule et les exigences de conception, démontrant une méthode pour améliorer la conception du paysage grâce à une analyse quantitative basée sur les données.	(Wu et al., 2023)
Intégration du système de transport	Introduit un modèle de système de conduite de véhicules intelligents et connectés (ICV) utilisant la technologie des jumeaux numériques pour aborder les complexités des véhicules intelligents et connectés, en se concentrant sur les éléments de modèle, les mécanismes opérationnels et l'architecture du système DT pour les ICV.	(H. Zhang et al., 2024)
Catégorie 08 - Eau		
Optimisation de l'utilisation de l'eau	Développement d'un cadre d'irrigation intelligent utilisant les DT et la technologie Internet des objets (IoT) pour optimiser l'utilisation de l'eau dans l'agriculture. Le cadre vise à simuler et évaluer différentes stratégies d'irrigation pour réduire la consommation d'eau tout en maintenant ou en augmentant la productivité agricole.	(Manocha et al., 2024)

Tableau 3.10 Cartographie des capacités BIM et DT dans les catégories de développement durable (suite)

Capacités BIM et DT	Capacités BIM et DT	Capacités BIM et DT
Surveillance du système d'eau	Introduit un cadre de jumeaux numériques combiné à la modélisation basée sur les agents (ABM) pour prévoir la consommation d'eau des ménages. Cette approche intègre des modèles physiques, des capteurs et des analyses de données pour optimiser la gestion des ressources en eau et soutenir les processus de prise de décision, en abordant la rareté de l'eau urbaine par une gestion améliorée de la demande.	(Alamri et al., 2024)
Intégration du système de détection de fuites	Utilisation d'un jumeau numérique combiné à des techniques d'apprentissage automatique, spécifiquement des réseaux de convolution graphiques (GCN), pour localiser avec précision les fuites dans les tuyaux des systèmes de distribution d'eau, traitant directement l'intégration des technologies avancées de détection de fuites.	(Brahmbhatt et al., 2023)
Analyse des systèmes de traitement et de recyclage de l'eau	L'examen des systèmes alternatifs utilisant l'eau de pluie récoltée et l'eau traitée reflète la capacité liée à l'analyse des méthodes de traitement et de recyclage de l'eau pour améliorer l'efficacité de l'eau dans les bâtiments.	(Cortez-Lara & Sanchez, 2023)
Catégorie 09 – Effluents		
Surveillance du rejet d'effluents	Introduit Pipedream-WQ, un modèle de jumeau numérique pour le suivi en temps réel des contaminants dans les réseaux de drainage urbains et naturels, utilisant un solveur avancé pour l'équation advection-réaction-diffusion et le filtrage de Kalman pour l'assimilation des données, améliorant la gestion de la qualité de l'eau grâce à un suivi amélioré des polluants et au contrôle des infrastructures.	(Kim & Bartos, 2024)
Planification de la gestion des eaux pluviales	Utilise le BIM, le SIG et les DCE pour une évaluation détaillée de la vulnérabilité des systèmes de drainage des eaux pluviales pendant les inondations urbaines, améliorant la prise de décision et la planification.	(Yang et al., 2021)
Catégorie 10 – Matériaux et produits		
Intégration de l'évaluation du cycle de vie	Intègre l'ACV dynamique dans le BIM pour évaluer l'impact des changements climatiques et des mélanges de réseaux électriques sur la consommation d'énergie des bâtiments, soutenant la conception de bâtiments énergétiquement efficaces en se concentrant sur les considérations environnementales à long terme.	(Jalaei et al., 2020)
Gestion des déclarations environnementales des produits (EPD)	Présente une méthode permettant d'obtenir des impacts environnementaux précis dès les premières étapes de conception BIM à l'aide de déclarations environnementales des produits (EPD), en répondant à des défis tels que la cohérence des données et les limites du système dans l'analyse du cycle de vie (ACV), et en soutenant la prise de décision dans la sélection des produits et des matériaux de construction.	(Palumbo et al., 2020)

Tableau 3.10 Cartographie des capacités BIM et DT dans les catégories de développement durable (suite)

Capacités BIM et DT	Capacités BIM et DT	Capacités BIM et DT
Planification de la construction préfabriquée et modulaire	Utilise l'algorithme P-ISOMAP et la technologie BIM pour visualiser les informations architecturales, structurelles et relatives au modèle, facilitant l'assemblage des composants préfabriqués, la fabrication, la gestion de la qualité et le signalement d'achèvement.	(Ouyang et al., 2023)
Suivi des matériaux durables	Développe un système de surveillance du carbone incorporé (EC) intégrant l'IoT et le BIM pour le suivi en temps réel et la visualisation du carbone incorporé dans les bâtiments préfabriqués, permettant des mesures de contrôle du carbone rapide et une analyse complète du carbone.	(J. Xu et al., 2023)
Catégorie 11 - Gestion		
Analyse des coûts du cycle de vie	Optimise l'approvisionnement et le stockage des barres d'acier sur les chantiers de construction avec un espace limité en intégrant le BIM 4D et la modélisation mathématique, réduisant les coûts et respectant les directives de stockage.	(Khondoker et al., 2024)
Gestion numérique des installations	Introduit une chaîne d'outils automatisée pour générer et simuler des modèles détaillés de systèmes HVAC en langage Modelica, tirant parti d'un environnement de données commun basé sur le web pour une interopérabilité accrue et des études de simulation basées sur le cloud, démontrant un potentiel dans l'analyse des systèmes HVAC.	(Visby Fjerbæk et al., 2023)
Gestion des risques et planification de la sécurité	Propose un cadre intégrant les données visuelles collectives dans les villes numériques pour mettre à jour les modèles virtuels 3D des villes afin d'améliorer la prise de décision informée par les risques, notamment dans la gestion des vulnérabilités des infrastructures et les réponses aux événements météorologiques extrêmes.	(Ham & Kim, 2020)
Intégration du processus d'assurance qualité	Met en œuvre une méthode de détection des écarts pour les composants de bâtiment en utilisant des nuages de points synthétiques et des modèles de segmentation sémantique, permettant une assurance qualité automatisée en comparant les nuages de points réels collectés sur le site avec ceux générés synthétiquement à partir du BIM pour identifier les disparités entre les structures conçues et construites, réduisant ainsi la charge de travail de l'inspection manuelle et améliorant l'efficacité.	(H. X. Zhang & Zou, 2023)
Planification et surveillance de la maintenance	Introduit une approche de jumeau numérique intégrant le BIM, les données de capteurs en temps réel et l'apprentissage automatique pour la maintenance prédictive et l'optimisation du confort des occupants dans les systèmes HVAC, mettant en évidence l'efficacité de l'algorithme Extreme Gradient Boosting (XGB) pour la prédiction des problèmes et proposant un cadre pour une gestion complète des bâtiments.	(Hosamo et al., 2023)

Tableau 3.10 Cartographie des capacités BIM et DT dans les catégories de développement durable (suite)

Capacités BIM et DT	Capacités BIM et DT	Capacités BIM et DT
Catégorie 12 - Confort des occupants		
Simulation des paramètres de confort	Développe une méthodologie soutenue par le BIM utilisant des algorithmes génétiques pour optimiser le placement des capteurs dans les environnements multizones pour la surveillance du confort thermique et de la qualité de l'air intérieur, en considérant différentes conditions météorologiques, réglages de ventilation et scénarios d'occupation.	(Cheng et al., 2022)
Surveillance de la qualité environnementale	Traite de la mise en œuvre des jumeaux numériques dans les établissements de santé pour la maintenance des installations et la gestion des espaces, présentant un prototype dans une salle d'opération intégrant des données de capteurs de qualité de l'air en temps réel avec le BIM, utilisant des services cloud et des outils de visualisation pour améliorer la gestion des installations et la surveillance environnementale.	(Harode et al., 2023)
Intégration de l'interaction utilisateur et de l'interface	Introduit les diagrammes de description de la conscience (ADD) comme technique de modélisation des exigences de l'interaction humain-jumeau numérique, facilitant la conception des interfaces utilisateur pour les jumeaux numériques en fournissant des informations sur l'état des entités physiques, telles que les espaces partagés où les agents humains et artificiels interagissent, améliorant ainsi la conscience et l'utilisabilité dans divers contextes comme les villes intelligentes et la fabrication.	(Duque et al., 2024)
Catégorie 13 – Santé et sécurité		
Suivi des incidents de sécurité	Utilise une intégration du BIM et de la simulation dynamique des incendies pour analyser le comportement du feu et les stratégies d'évacuation dans les tunnels d'échange souterrains, en se concentrant sur l'amélioration des protocoles de sécurité et de l'efficacité des échappées lors des incidents d'incendie.	(Z. Liu, Gu, et al., 2023)
Intégration de la formation à la santé et à la sécurité au travail	Présente un cadre pour développer une formation à la sécurité contextuelle pour les opérateurs de grue à tour dans la construction hors site, utilisant des modèles d'information sur le bâtiment (BIM) et la réalité virtuelle (RV) pour simuler les opérations de levage par grue. Le cadre vise à améliorer la conscience situationnelle, à anticiper les risques et à réduire les incidents de sécurité et les blessures avec perte de temps (LTIs) en fournissant des scénarios de formation réalistes adaptés à l'environnement de construction.	(Shringi et al., 2023)

Tableau 3.10 Cartographie des capacités BIM et DT dans les catégories de développement durable (suite)

Capacités BIM et DT	Capacités BIM et DT	Capacités BIM et DT
Catégorie 14 - Conception		
Analyse de l'utilisation de l'espace	Introduit une approche basée sur le BIM pour évaluer la flexibilité fonctionnelle des conceptions de bâtiments, utilisant des critères mis en œuvre par l'intégration du BIM et des outils de langage de programmation visuelle, visant à guider les concepteurs vers des choix de conception durables en permettant le calcul automatique de la flexibilité de conception au cours du processus de conception.	(Cavalliere et al., 2019)
Simulation de la résilience structurelle	Utilise le BIM et l'apprentissage automatique pour prédire les états de dommages possibles des murs non structurels de remplissage extérieurs (EIW) lors des événements sismiques, visant à améliorer la résilience sismique des bâtiments.	(Mousavi et al., 2022)
Application des principes de conception universelle	Automatise les évaluations de conception universelle pour les bâtiments publics en analysant les données architecturales 3D, améliorant la précision et l'efficacité, et promouvant l'utilisation du BIM en architecture.	(Yu & Choi, 2023)
Planification de la préservation historique	Explore l'intégration de la modélisation paramétrique et de l'Heritage Building Information Modeling (HBIM) pour la restauration durable des bâtiments historiques, en se concentrant sur la modélisation précise des voûtes en maçonnerie.	(Liberotti & Gusella, 2023)
Catégorie 15 – Social et économique		
Facilitation de l'engagement communautaire	Le rôle du BIM dans la promotion du tourisme et de la conservation du patrimoine culturel durable. Exposant comment le BIM facilite l'urbanisation inclusive et durable (ODD 11.3) en engageant les parties prenantes, les experts en conservation du patrimoine et le public dans la gestion et la préservation des sites du patrimoine culturel.	(Z. Liu, Zhang, et al., 2023)
Surveillance de la conformité aux politiques	Une approche sémantique pour le contrôle automatique de la conformité (ACC) dans l'industrie de la construction. En utilisant le traitement du langage naturel (NLP) pour extraire les termes de règle des documents réglementaires, l'approche automatise le processus de vérification si les conceptions de bâtiments sont conformes aux lois, politiques et règlements pertinents.	(Guo et al., 2021)
Modélisation de la transparence et de l'anti-corruption	En préconisant un protocole basé sur la transparence dans les projets de réhabilitation sismique, cette étude met en évidence l'utilisation du BIM pour augmenter l'auditabilité et l'implication des parties prenantes. Cette capacité est cruciale pour combattre la corruption et prendre des décisions informées et transparentes dans les projets de bâtiments publics, reflétant le potentiel du BIM pour soutenir les efforts anticorruptions dans le secteur de la construction.	(Santa-Cruz et al., 2021)

3.5 Résultats de l'analyse de la MCD

Cette section présente les résultats de l'analyse de la MCD décrite dans le chapitre de la méthodologie, dans le cadre de l'étude publiée dans le European Journal of Sustainable Development (Jaberi & Poirier, 2024). L'analyse fournit un aperçu de la distribution et de la classification des indicateurs de durabilité à travers divers schémas de certification et de normes. Les résultats sont divisés en quatre domaines clés.

3.5.1 Distribution des indicateurs dans les schémas de certification et de normes

Notre enquête a évalué la présence et la répartition des indicateurs de durabilité dans deux grandes catégories : les certifications et les normes. Cette évaluation détaillée a catalogué un total de 2 056 instances où les indicateurs apparaissaient dans les 51 documents analysés. Ces données ont révélé que les schémas de normes représentaient environ 34 % (699 instances) de ces indicateurs, tandis que les schémas de certification en représentaient environ 66 % (1 357 instances). Cette répartition suggère une utilisation plus étendue des indicateurs dans les certifications que dans les normes. Néanmoins, il est important de reconnaître que ces chiffres indiquent le volume des indicateurs plutôt que la portée ou la profondeur des mesures de durabilité au sein de chaque classification.

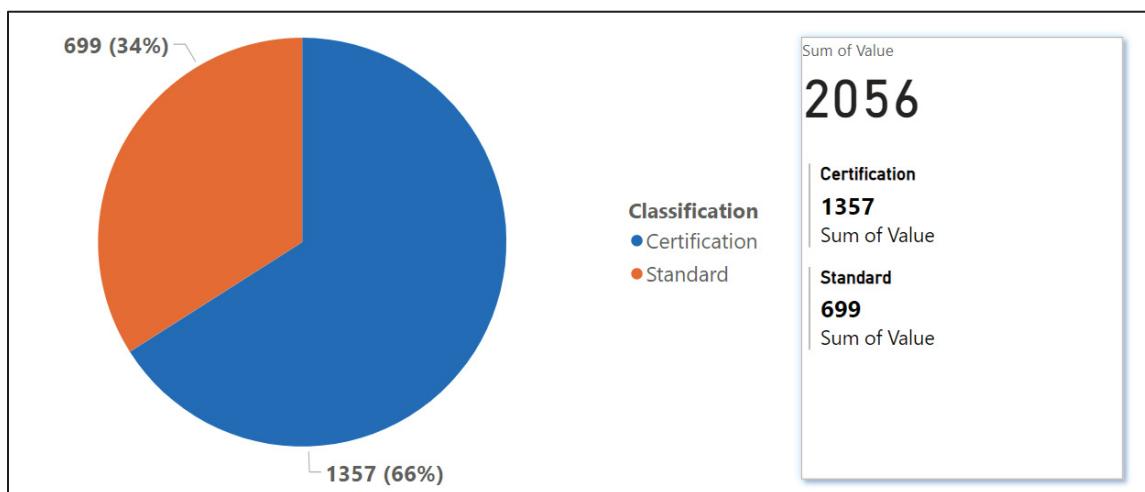


Figure 3.5 Répartition des indicateurs sur deux classifications de certifications et de normes

La représentation graphique ci-dessous fournit une ventilation détaillée de ces instances, chaque schéma étant distinctement cartographié et classifié.

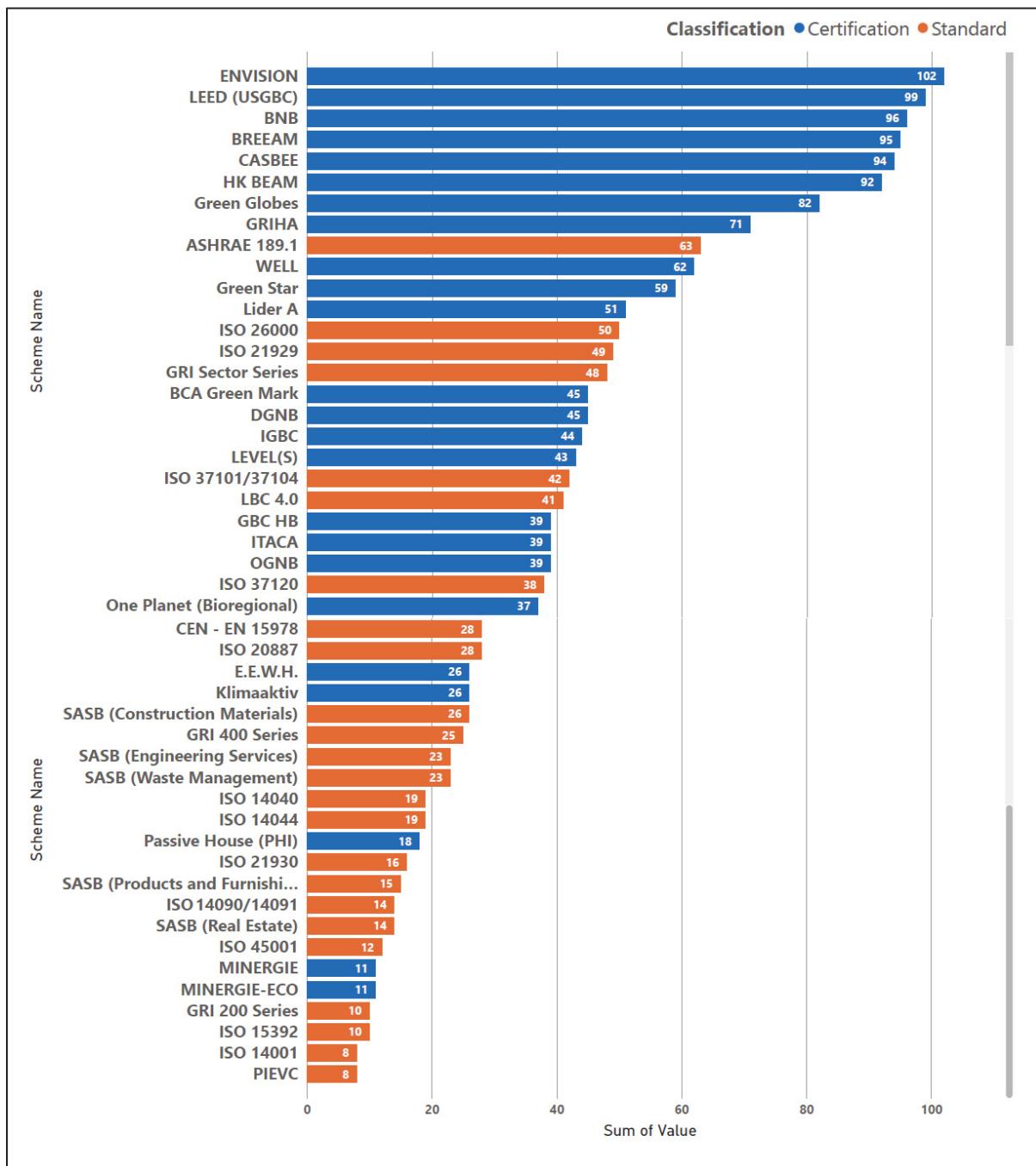


Figure 3.6 Répartition des indicateurs dans chaque schéma

3.5.2 Répartition des indicateurs par catégorie et classification

En approfondissant, l'analyse a segmenté ces indicateurs en 15 catégories pour examiner leur répartition par classification et catégorie. Cette segmentation a révélé des priorités distinctes au sein de l'industrie : tandis que les « Matériaux et Produits » dominaient parmi les certifications, reflétant un effort concentré vers l'utilisation de matériaux durables, les indicateurs « Sociaux et Économiques » prévalaient dans les normes, indiquant une conceptualisation plus large de la durabilité. Cette répartition par catégorie et classification, comme illustré dans la Figure 3.7, met en lumière les différentes approches de durabilité dans les divers schémas et souligne la nature multifacette des objectifs de durabilité de l'industrie.

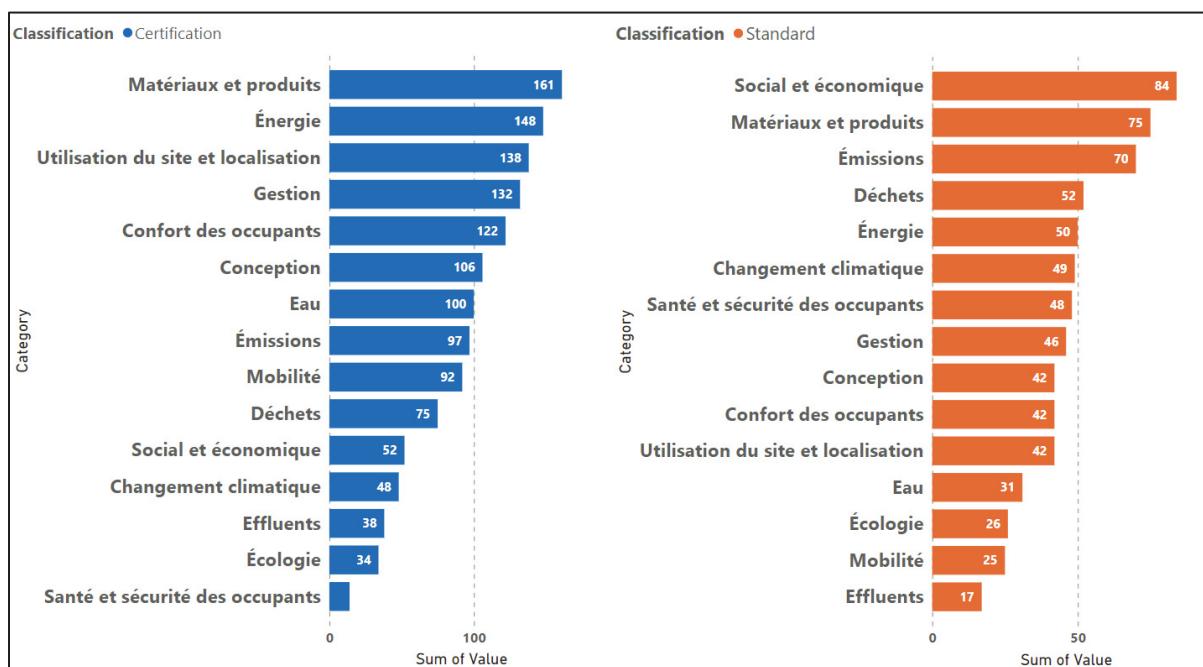


Figure 3.7 Répartition des indicateurs pour chaque catégorie dans chaque classification

3.5.3 Analyse des indicateurs dominants

L'analyse transversale de la « Réduction des émissions de gaz à effet de serre » dans les certifications et les normes capture l'urgence universelle de cette question, se manifestant comme l'indicateur le plus saturé parmi les critères évalués (Voir Figure 3.8).

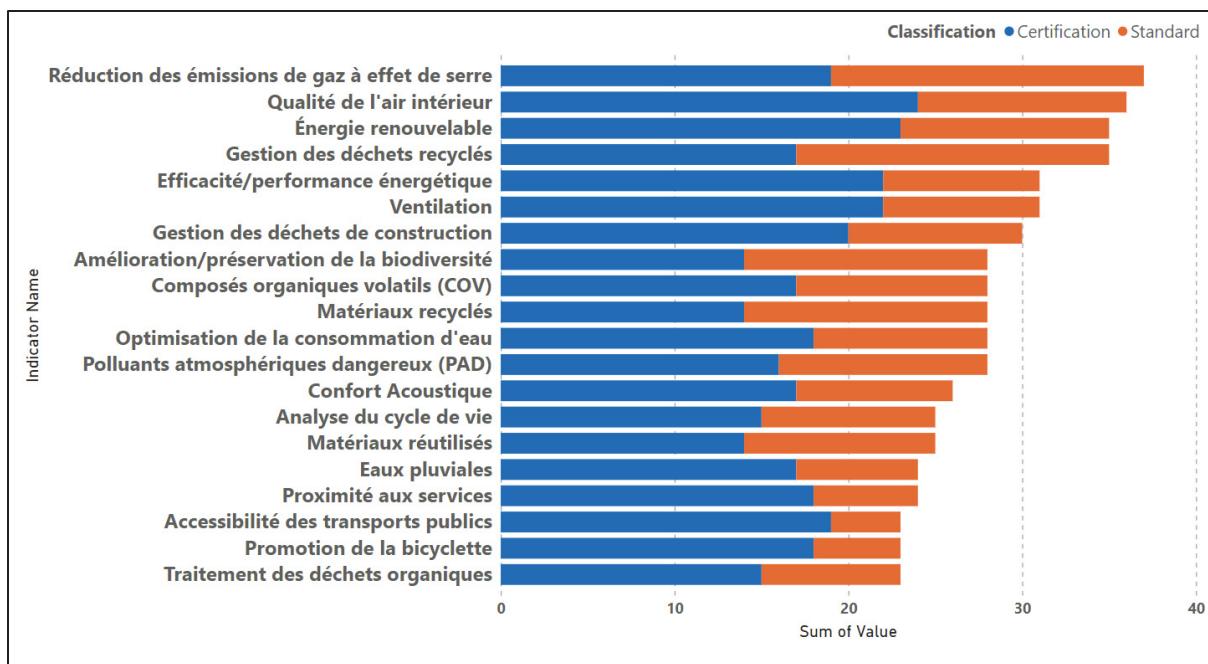


Figure 3.8 Indicateurs dominants dans les deux classifications

En regardant de plus près, il apparaît que les certifications ont tendance à se concentrer fortement sur la « Qualité de l'air intérieur », signifiant un engagement envers les environnements internes dans lesquels vivent les occupants. En revanche, la « Gestion des déchets recyclés » émerge comme un étalon dans les normes, suggérant une orientation stratégique vers la récupération des ressources et une économie circulaire (voir Figure 3.9).

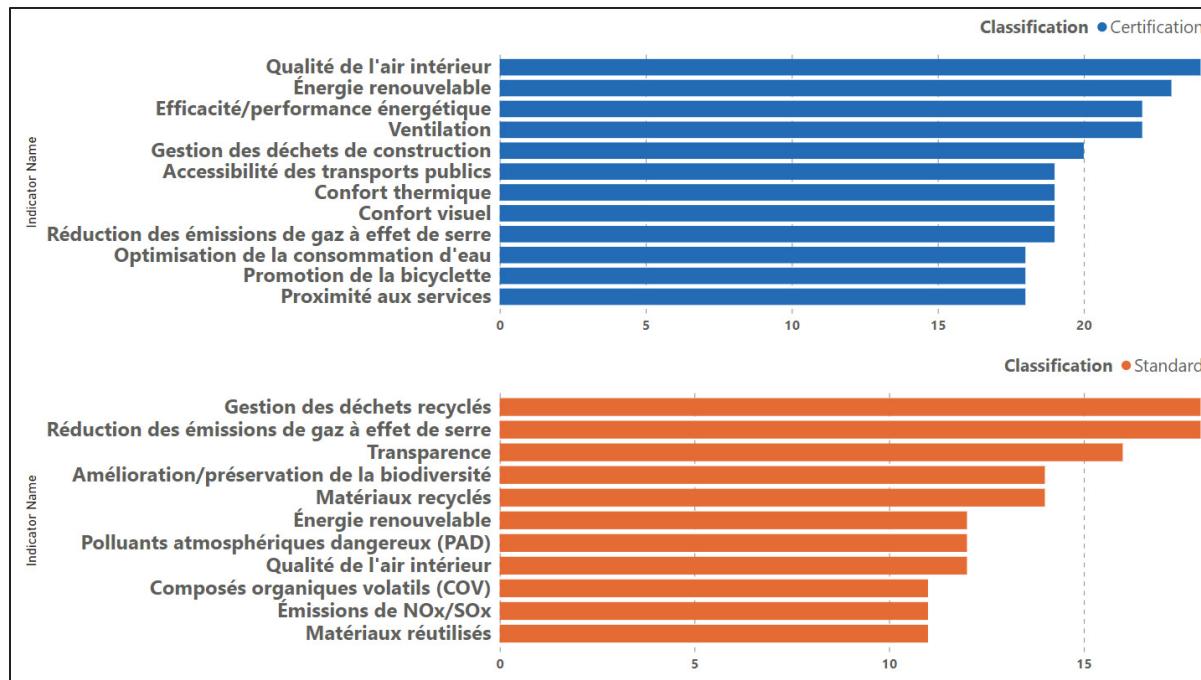


Figure 3.9 Indicateurs dominants séparés par chaque classification

L’analyse de la MCD présentée ici fournit un aperçu approfondi de la répartition et de la catégorisation des indicateurs de durabilité dans l’industrie des actifs bâtis. Cet examen, dérivé de l’approche détaillée dans le chapitre Méthodologie, met en lumière la vaste portée des pratiques de durabilité et identifie des domaines pour une exploration plus approfondie.

3.6 Résultats de l’évaluation de l’artefact

3.6.1 Résultats de l’atelier

Les résultats de l’atelier de GRID à l’ÉTS montrent comment les groupes de participants ont évalué la pertinence des différentes capacités BIM à travers 181 indicateurs de durabilité. Les chiffres associés à chaque niveau de capacité représentent le nombre total d’indicateurs pour lesquels cette approche BIM a été sélectionnée. Par exemple, « Données de capteur + Données liées » a été choisi pour le plus grand nombre d’indicateurs, indiquant une forte préférence pour cette approche parmi les participants à l’atelier. D’autres niveaux comme « Jumeau numérique complet » ou « Collaboration de modèle partagé » montrent également des chiffres

significatifs, tandis que « Modèle numérique mis à jour » est le plus faible, ce qui indique sa sélection plus limitée à travers les indicateurs. Ces résultats sont résumés graphiquement dans le diagramme à barres de la Figure 3.10.

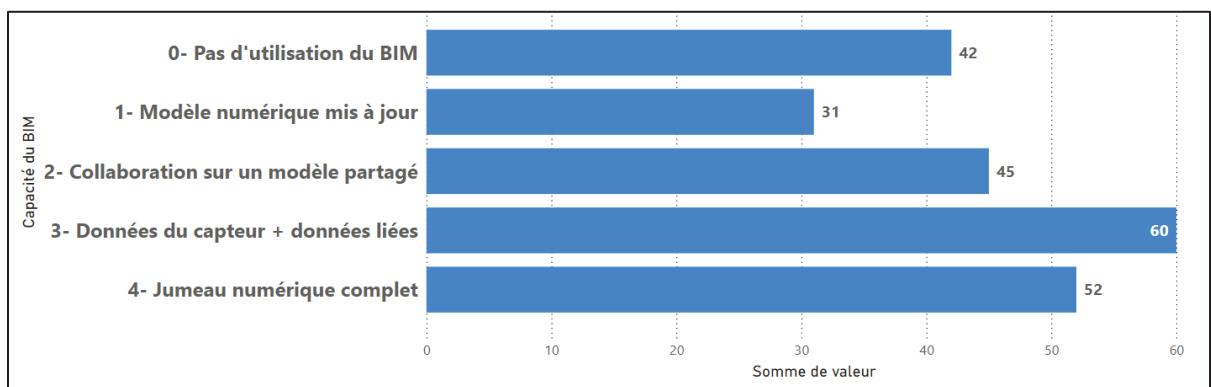


Figure 3.10 Fréquence des niveaux de capacité BIM sélectionnés pour les indicateurs de durabilité lors de l'atelier GRIDD

Ce qui suit offre une ventilation de la manière dont les participants à l'atelier ont classé les indicateurs de durabilité à travers différents niveaux de capacité BIM, visualisés dans les diagrammes à barres fournis. Ces diagrammes catégorisent les indicateurs aux côtés de leur niveau d'intégration BIM associé, reflétant les évaluations des participants quant à leur applicabilité.

Les figures illustrent la distribution des indicateurs classés d'« Aucune utilisation du BIM » à « Jumeau numérique complet ». Dans le contexte d'« Aucune utilisation du BIM », des indicateurs tels que « Plan des arts et de la culture » et « Justice sociale et équité » sont représentés avec moins de pertinence pour les capacités BIM, suggérant qu'ils sont perçus comme indépendants de l'intégration BIM. À l'autre extrémité, « Après-soins » et « Coûts du cycle de vie » détiennent la fréquence de sélection la plus élevée pour « Jumeau numérique complet », soulignant leur importance perçue pour les applications BIM les plus avancées. Les chiffres à côté de chaque indicateur indiquent combien de fois ils ont été sélectionnés, par chaque groupe lors de l'atelier, pour leur niveau de capacité BIM correspondant.

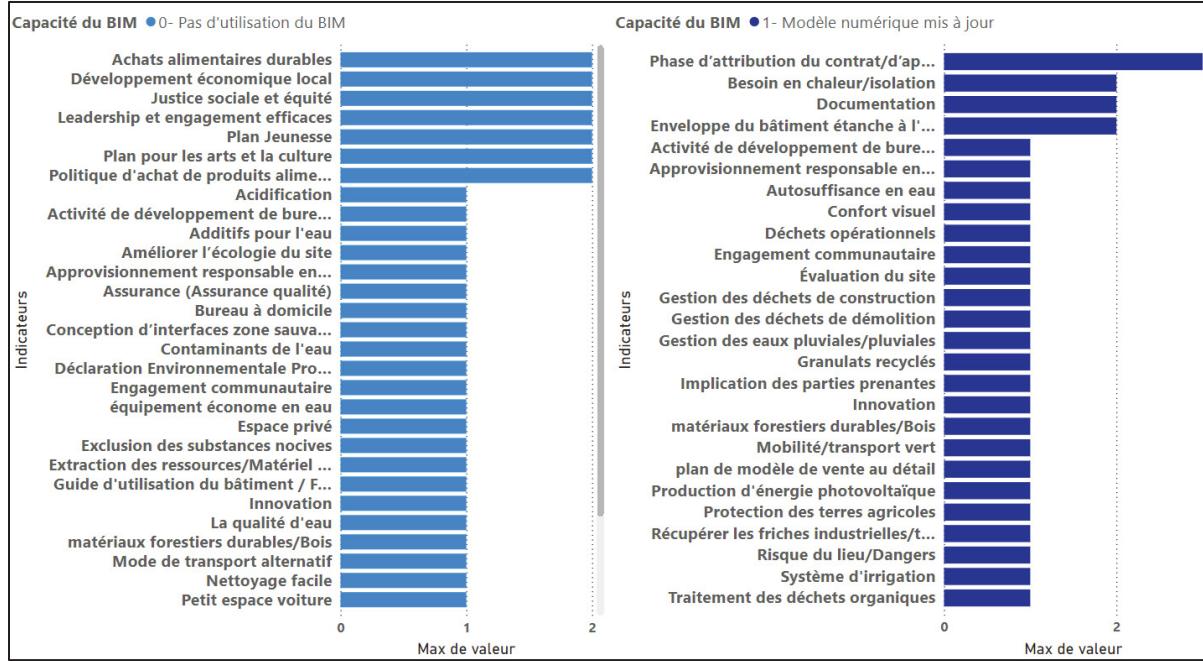


Figure 3.11 Évaluation en atelier des indicateurs de durabilité à travers différents niveaux de capacité BIM : À GAUCHE : Aucune utilisation du BIM. À DROITE : Modèle numérique mis à jour

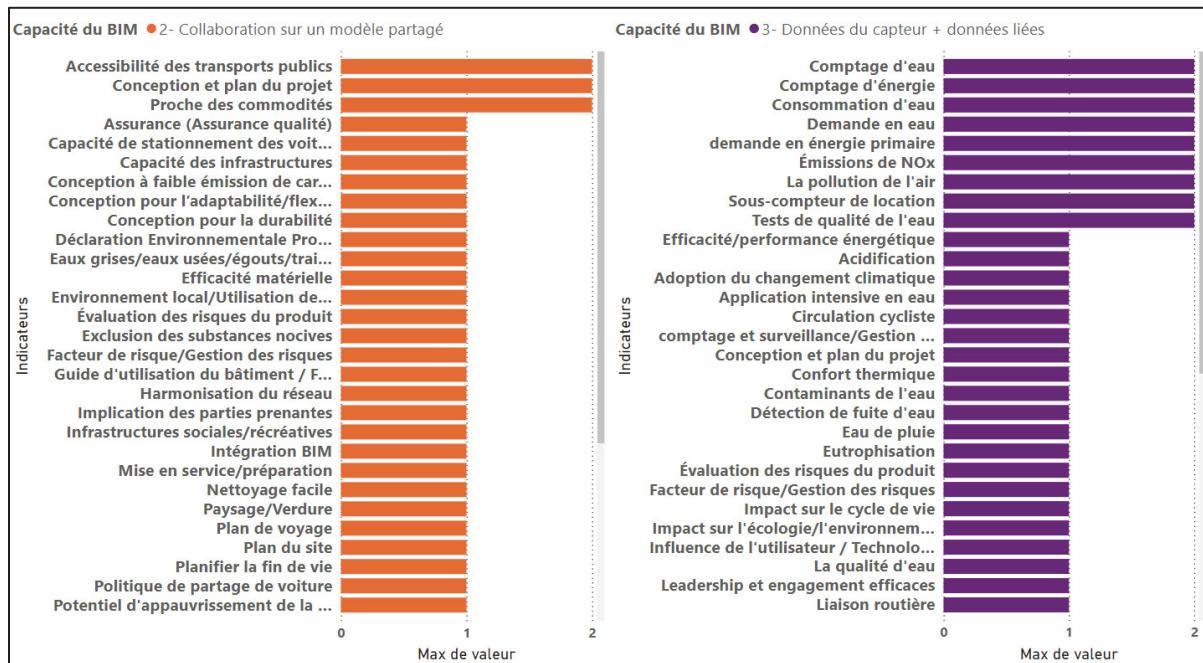


Figure 3.12 Évaluation en atelier des indicateurs de durabilité à travers différents niveaux de capacité BIM : À GAUCHE : Collaboration de modèle partagé. À DROITE : Données de capteur + Données liées

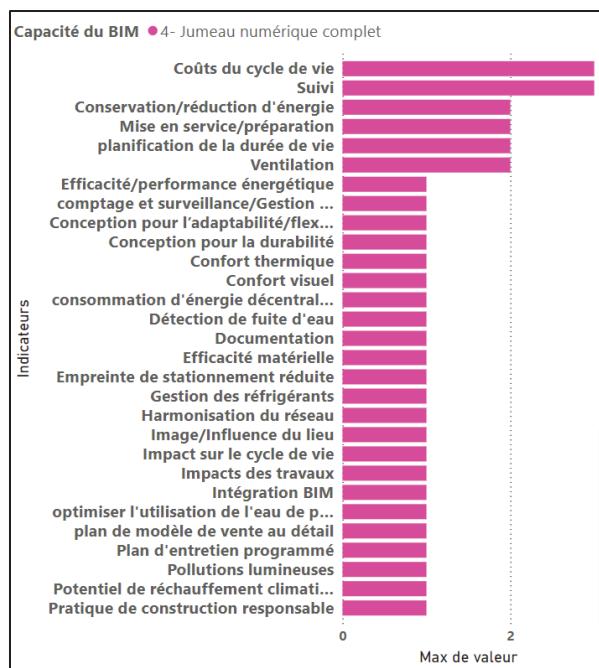


Figure 3.13 Évaluation en atelier des indicateurs de durabilité à travers différents niveaux de capacité BIM : Jumeau numérique complet

La liste initiale de 181 indicateurs évalués lors de l'atelier a été mise à jour en fonction des retours des participants. Des suggestions pour fusionner, affiner ou redéfinir certains indicateurs ont été intégrées afin d'améliorer leur clarté et leur applicabilité. Par exemple, l'indicateur « Optimisation de la consommation d'eau » a été affiné en consolidant des indicateurs similaires issus de diverses certifications et normes. Cela inclut la fusion des indicateurs tels que « Consommation d'eau », « Équipements économies en eau » et « Optimisation de l'eau de procédé / Économie d'eau » des certifications avec « Utilisation responsable de l'eau » et « Eau nette positive » des normes. La description actualisée de cet indicateur met l'accent sur la minimisation de la consommation d'eau grâce à des pratiques et des technologies durables, reflétant à la fois son intention initiale et les insights des participants.

3.6.2 Résultats de l'enquête

3.6.2.1 Informations démographiques des répondants à l'enquête

Les informations démographiques des 41 répondants à l'enquête présentent une gamme de professionnels, y compris des gestionnaires BIM, des consultants, des ingénieurs, des architectes, des gestionnaires, des directeurs, des coordinateurs de projets, des étudiants et du personnel de soutien. La majorité des participants ont entre un et cinq ans d'expérience, avec une représentation notable à des niveaux d'expérience plus larges allant jusqu'à plus de trente ans.

Le niveau d'expertise BIM parmi les répondants est varié, avec un nombre égal de débutants et d'experts, et une proportion plus réduite d'utilisateurs intermédiaires et non utilisateurs. La familiarité avec les concepts de durabilité est généralement élevée, la plupart des répondants se considérant au moins quelque peu familiers, et un nombre significatif se considérant très familiers avec la durabilité. Les données démographiques détaillées sont présentées dans le Tableau 3.11.

Tableau 3.11 Informations démographiques des participants à l'étape de l'enquête

Catégorie	Sous-catégorie	Fréquence (N)	Pourcentage (%)
Fonction dans l'entreprise	Gestionnaire BIM ou coordinateur BIM	5	12%
	Consultant	4	10%
	Ingénieur/architecte (ou autre professionnel)	12	29%
	Gestionnaire ou directeur	4	10%
	Autre	3	7%
	Chef de projet ou coordinateur de projet	1	2%
	Étudiant (stage, etc.)	11	27%
Années d'expérience	Support (administration, comptabilité, etc.)	1	3%
	Total général	41	100.00%
	1 - 5 ans	13	32%
	11- 20 ans	9	22%
	21 - 30 ans	5	12%
	6 - 10 ans	8	20%
	Moins d'1 an	5	12%
Type d'entreprise	Plus de 30 ans	1	2%
	Total général	41	100.00%
	Architecture	3	7%
	Client/Propriétaire-opérateur	7	17%
	Ingénierie	10	24%
	Entreprise générale	1	3%
	Autre	19	46%
Localisation	Commerce spécialisé	1	3%
	Total général	41	100.00%
	Au Canada	32	78%
	Hors Canada	9	22%
	Total général	41	100.00%
Province	Total général	41	100.00%
	Ontario	1	2%
	Québec	31	76%
	Autre	9	22%
	Total général	41	100.00%
Niveau d'expertise BIM	Débutant	12	29%
	Expert	12	29%
	Intermédiaire	9	23%
	Aucun	8	19%
	Total général	41	100.00%
Familiarité avec la durabilité	Suffisamment familier	13	32%
	Pas du tout familier	2	5%
	Pas très familier	7	17%
	Quelque peu familier	8	19%
	Très familier	11	27%
	Total général	41	100.00%

3.6.2.2 Fréquence des catégories de durabilité sélectionnées par les répondants

Le graphique à barres ci-dessous illustre la fréquence de sélection des catégories de durabilité par les répondants à l'enquête. La catégorie « Conception » est la plus sélectionnée, suivie de près par « Énergie » et « Gestion ». Les catégories les moins sélectionnées sont « Eau » et « Effluents ». Cela indique des niveaux d'intérêt ou d'expertise variables parmi les répondants dans différents domaines de durabilité.

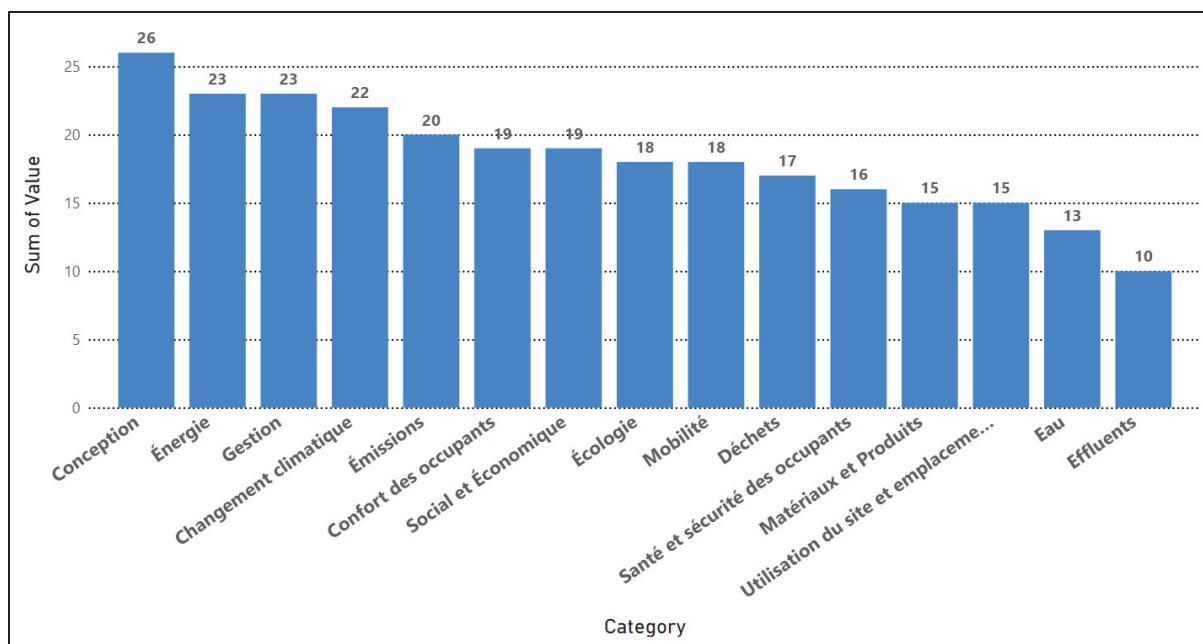


Figure 3.14 Fréquence des catégories de durabilité sélectionnées par les répondants

3.6.2.3 Perspectives des participants: Potentiels de numérisation pour les indicateurs de durabilité

Les données de l'enquête offrent une vue d'ensemble des perspectives des participants sur le potentiel de numérisation utilisant le BIM et les DT dans les efforts de durabilité. L'option « Modèle partagé » a été identifiée comme la plus répandue, indiquant une vue collective de sa large applicabilité et de son utilité. Les options « Jumeau numérique complet » et « Modèle partagé avec données de capteur intégrées » sont également très appréciées, suggérant une tendance de l'industrie à adopter des technologies BIM plus sophistiquées. En revanche, des

options telles que « Pas d'utilisation du BIM » et « Modèles numériques mis à jour » ont reçu moins de poids, reflétant un consensus selon lequel ces approches peuvent offrir moins de potentiel dans l'avancement de l'intégration de la durabilité.

Il est important de noter que les préférences indiquées ici ne représentent pas seulement un choix favori, mais une reconnaissance générale du potentiel de numérisation pour chaque niveau d'intégration du BIM. Les chiffres illustrés dans la Figure 3.15 représentent un total cumulatif, dérivé de la somme des poids individuels de tous les répondants ayant sélectionné chaque option, en tenant compte de leurs années d'expérience, de leur expertise en BIM et de leur familiarité avec la durabilité, comme décrit dans la section Méthodologie.

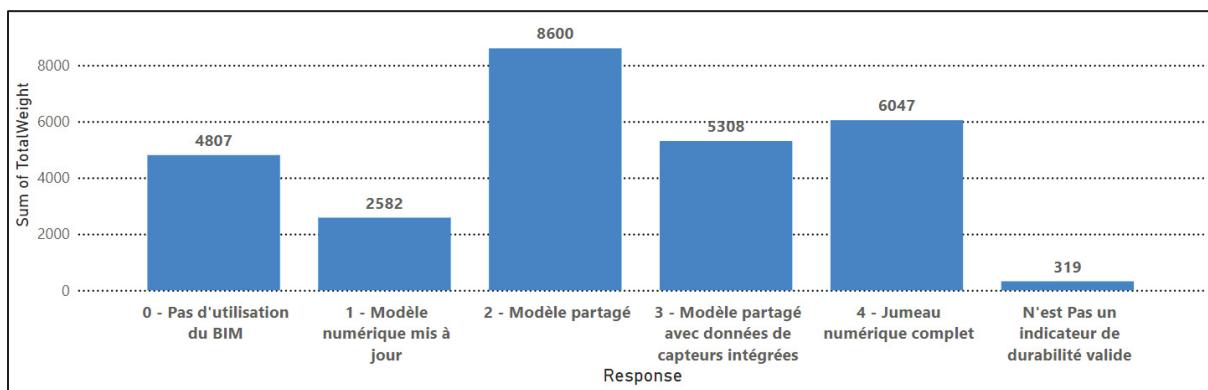


Figure 3.15 Fréquence des niveaux de capacité BIM/DT sélectionnés pour les indicateurs de durabilité dans l'enquête

3.6.2.4 Répartition des préférences d'utilisation du BIM par catégorie

Le diagramme analytique affiche l'analyse des réponses spécifiques à chaque catégorie, montrant la répartition des réponses pour chaque option d'utilisation du BIM dans différents domaines de durabilité. Chaque catégorie est représentée par des barres de différentes couleurs, correspondant aux options allant de « Pas d'utilisation du BIM » à « Jumeau numérique complet » (voir Figure 3.16).

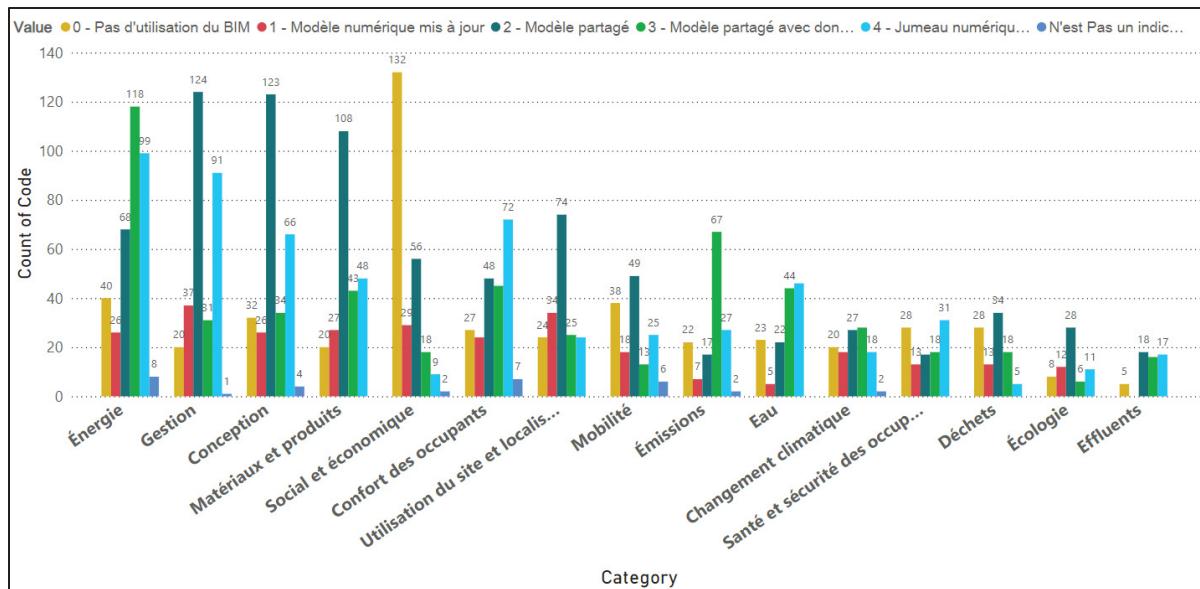


Figure 3.16 Répartition des préférences d'utilisation du BIM par catégorie

Dans les catégories « Énergie » et « Émissions », les répondants ont montré une forte préférence pour le « Modèle partagé avec données de capteur intégrées », suivi de près par le « Jumeau numérique complet ». Cela suggère un consensus sur l'importance de l'intégration des données de capteurs et le potentiel d'un jumeau numérique complet dans ces domaines. À l'inverse, dans la catégorie « Social et Économique », une majorité significative préfère « Pas d'utilisation du BIM », indiquant une position claire sur la pertinence limitée des méthodologies BIM dans ce contexte. Dans les catégories « Gestion », « Conception » et « Matériaux et Produits », le choix le plus en vue est le « Modèle partagé », soulignant l'importance de la collaboration améliorée et des mises à jour périodiques facilitées par le BIM.

De plus, des catégories telles que « Confort des occupants », « Eau » et « Santé et sécurité des occupants » se distinguent par une inclination notable vers le « Jumeau numérique complet ». Cette préférence suggère que les répondants reconnaissent le potentiel des données en temps réel et de l'interaction dynamique pour optimiser ces aspects de la durabilité. Il est à noter que certaines catégories, comme « Eau » et « Effluents », ont reçu moins de réponses comparativement à des catégories comme « Conception », indiquant des niveaux d'intérêt et d'engagement variables parmi les répondants.

3.6.2.5 Classement des indicateurs de durabilité par niveau d'intégration du BIM

Cette section offre un examen détaillé de la perception des participants à l'enquête sur l'intégration des indicateurs de durabilité avec différents niveaux de technologie BIM. Les graphiques à barres présentés catégorisent les indicateurs selon leur niveau d'intégration BIM associé, fournissant une représentation visuelle de leur importance telle que jugée par les participants à l'enquête.

Les figures 3.17, 3.18 et 3.19 montrent les indicateurs classés selon les options d'intégration BIM allant de « Pas d'utilisation du BIM » à « Jumeau numérique complet ». Par exemple, au niveau « Pas d'utilisation du BIM », des indicateurs tels que « Travail forcé ou obligatoire » et « Politique de covoiturage » sont considérés comme moins pertinents pour la technologie BIM, tandis que « Surveillance et gestion de l'air » et « Conservation/Réduction de l'énergie » sont identifiés comme des priorités principales pour l'intégration du « Jumeau numérique complet », soulignant leur adéquation perçue pour les applications numériques avancées.

Les chiffres correspondant aux barres représentent le poids cumulé que chaque indicateur a reçu à partir de toutes les réponses à l'enquête, en tenant compte des facteurs démographiques. Une barre plus longue indique un consensus plus fort sur l'importance ou la pertinence de cet indicateur pour le niveau spécifié d'intégration du BIM. À l'inverse, une barre plus courte suggère moins d'accord parmi les participants quant à la pertinence de l'indicateur à ce niveau d'utilisation du BIM.

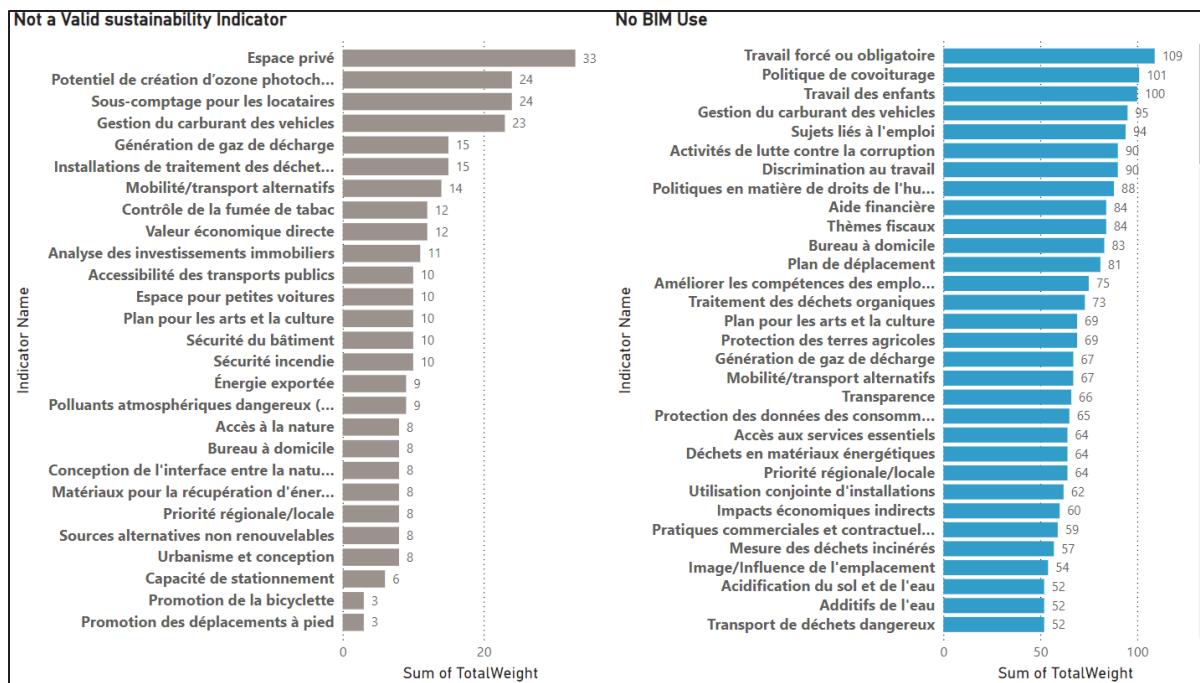


Figure 3.17 Principaux indicateurs de durabilité classés selon : À GAUCHE : Pas d'indicateur de durabilité valide. À DROITE : Pas d'utilisation du BIM

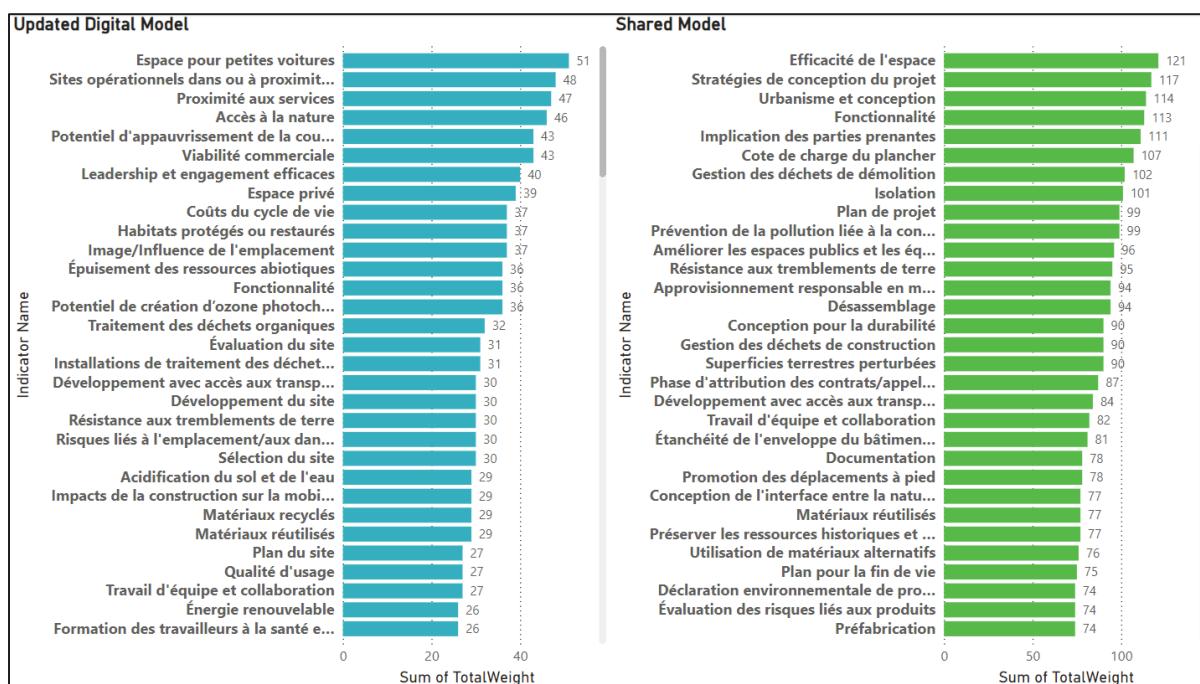


Figure 3.18 Principaux indicateurs de durabilité classés selon : À GAUCHE : Modèle numérique mis à jour. À DROITE : Modèle partagé

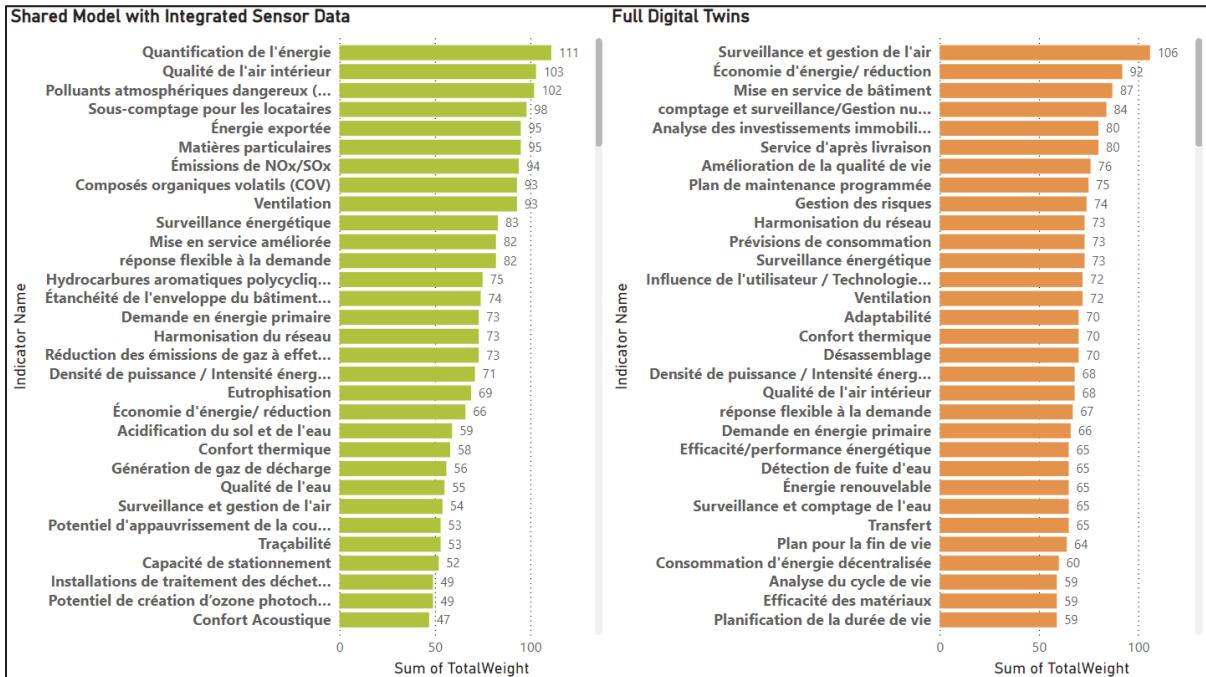


Figure 3.19 Principaux indicateurs de durabilité classés selon : À GAUCHE : Modèle partagé avec données de capteurs intégrées. À DROITE : Jumeaux numériques complets

3.6.2.6 Analyse du consensus sur les indicateurs de durabilité

Cette section de l'étude explore le consensus parmi les participants à l'enquête concernant le potentiel d'intégration du BIM et des DT pour les indicateurs de durabilité. L'objectif est de comprendre quels indicateurs voient le plus grand accord en termes de potentiel d'intégration du BIM et des DT et lesquels pourraient nécessiter une évaluation plus détaillée dans les phases de recherche ultérieures en raison d'un consensus plus faible. La phase de l'enquête a fourni une mesure quantitative du consensus - le Score d'Accord Pondéré. Cette mesure reflète le niveau de consensus parmi les répondants et incorpore la signification de leurs attributs démographiques. Le score est une réflexion nuancée du point de vue collectif, équilibrant la popularité d'un indicateur avec la crédibilité des opinions.

3.6.2.7 Analyse des diagrammes en boîte à moustaches

Le diagramme en boîte à moustaches, illustré dans la Figure 3.20, offre un résumé visuel et statistique des Scores d'Accord Pondérés pour les indicateurs de durabilité, dérivés des données de l'enquête. Ces statistiques, reflétant le consensus général, jouent un rôle vital dans la détermination des indicateurs qui peuvent nécessiter une discussion plus approfondie ou qui pourraient être réévalués pour un potentiel réalignement du consensus lors des phases de recherche ultérieures, telles que des entretiens avec des experts.

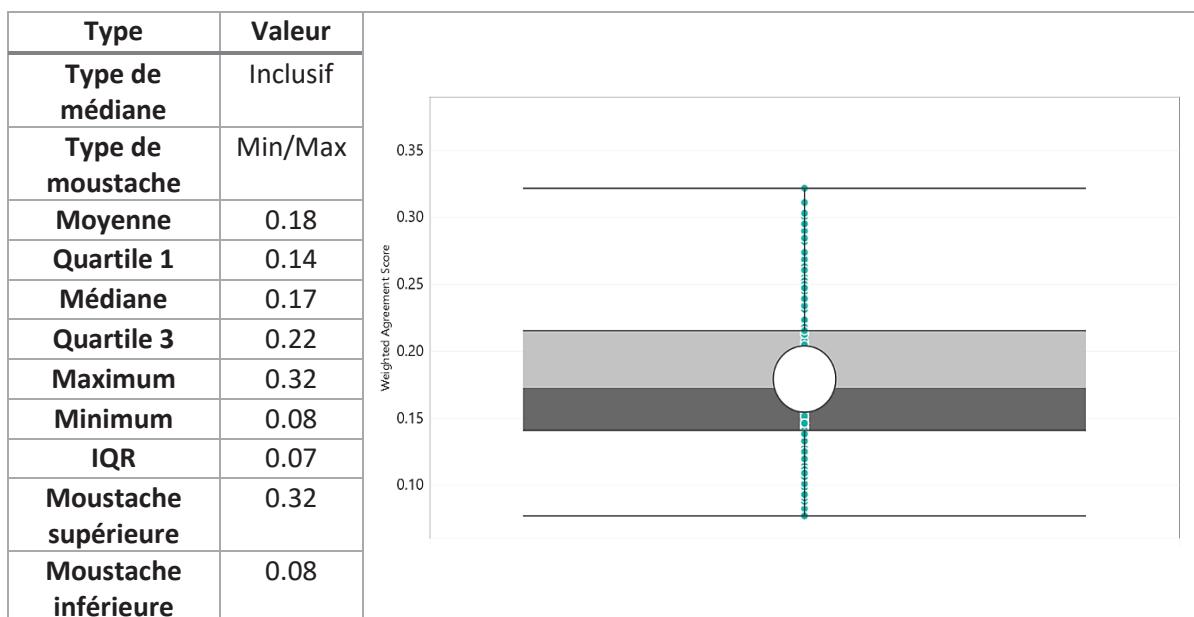


Figure 3.20 Visualisation du consensus pondéré sur les indicateurs de durabilité sous forme de diagramme en boîte à moustaches

Ce graphique sert de représentation du résumé en cinq nombres (Newbold et al., 2013), qui comprend les composants suivants :

Tableau 3.12 Résumé en cinq nombres du consensus des participants sur les indicateurs de durabilité

Minimum	0.08	La note la plus basse dans le jeu de données, signifiant l'indicateur avec le moins de consensus parmi les participants.
Quartile 1	0.14	Ce quartile inférieur est la marque où 25 % des indicateurs ont des scores inférieurs à ce seuil, mettant en évidence le bas de l'accord.
Médiane	0.17	Il s'agit du score médian, indiquant que la moitié des indicateurs ont un Score d'Accord Pondéré supérieur à cette valeur et l'autre moitié y est inférieure, et elle sert de référence pour la tendance centrale du consensus.
Quartile 3	0.22	À l'inverse, le quartile supérieur marque là où 75 % des indicateurs ont des scores inférieurs à ce point, indiquant le haut de l'accord.
Maximum	0.32	Le score le plus élevé dans le jeu de données, indiquant l'indicateur avec le plus de consensus.

L'Intervalle Interquartile (IQR - 0.07), la différence entre Q1 et Q3, offre une mesure de la dispersion de la moitié centrale des scores. La Moustache Inférieure (0.08) et la Moustache Supérieure (0.32) fournissent un indice visuel de la dispersion et des valeurs extrêmes, ou valeurs aberrantes, dans une plage de 1,5 fois l'IQR à partir des quartiles inférieur et supérieur, respectivement.

3.6.2.8 Indicateurs avec le score d'accord pondéré le plus élevé

Certains indicateurs se sont démarqués par leur haut niveau d'accord pondéré. Par exemple, « Efficacité de l'espace » (DS 01) et « Stratégies de conception de projet » (DS 02) ont obtenu certains des scores les plus élevés, indiquant un fort consensus sur leur importance dans les applications BIM et DT. Ces indicateurs à haut score suggèrent des sujets où les participants partagent une vision commune du rôle du BIM et des DT dans l'avancement de la durabilité comme illustré dans la Figure 3.21.

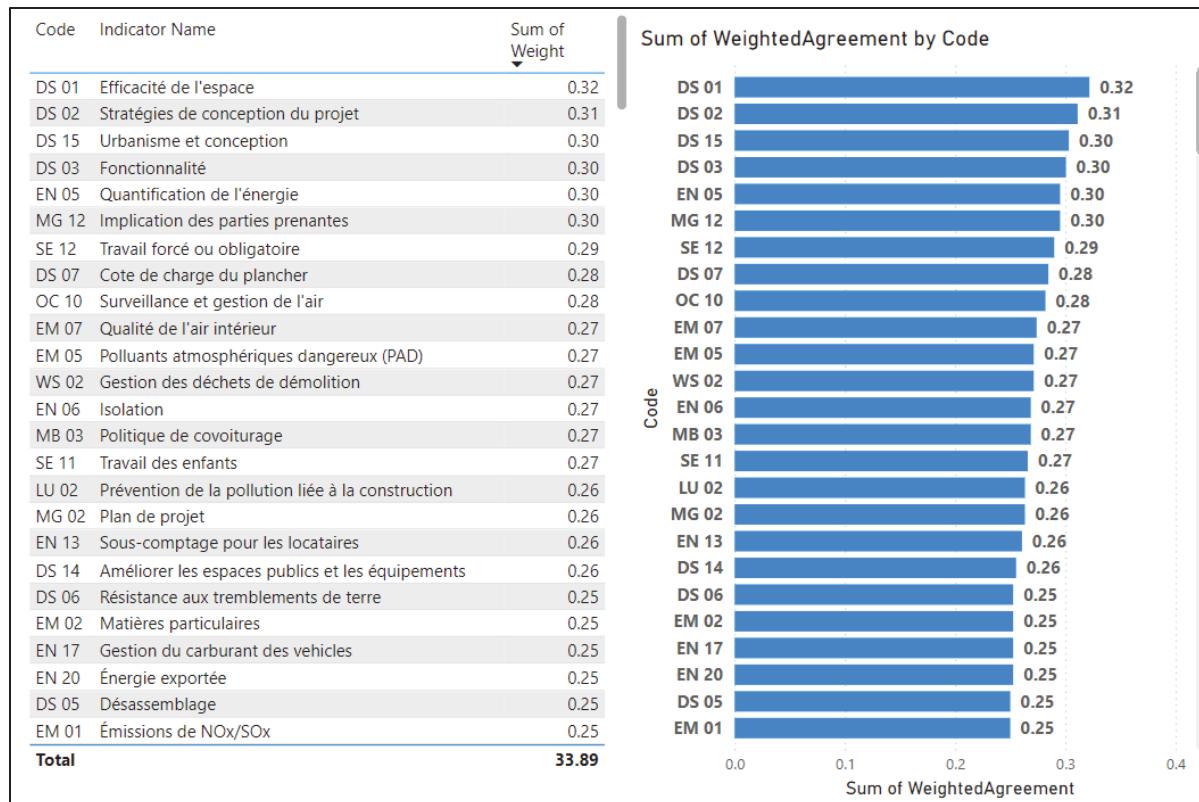


Figure 3.21 Indicateurs avec le score d'accord pondéré le plus élevé

3.6.2.9 Indicateurs avec le score d'accord pondéré le plus bas

À l'inverse, des indicateurs tels que « Gestion des ressources en eau » (WT 07) et « Gestion des eaux pluviales et des eaux de ruissellement » (EF 03) ont obtenu des scores plus bas, signalant la nécessité d'un examen plus approfondi. Ces indicateurs, dont une partie est illustrée dans la Figure 3.22, se situent en dessous du seuil du premier quartile, révélant des domaines de moindre consensus, incitant à une analyse et une discussion plus approfondie lors de la phase des entretiens avec des experts.

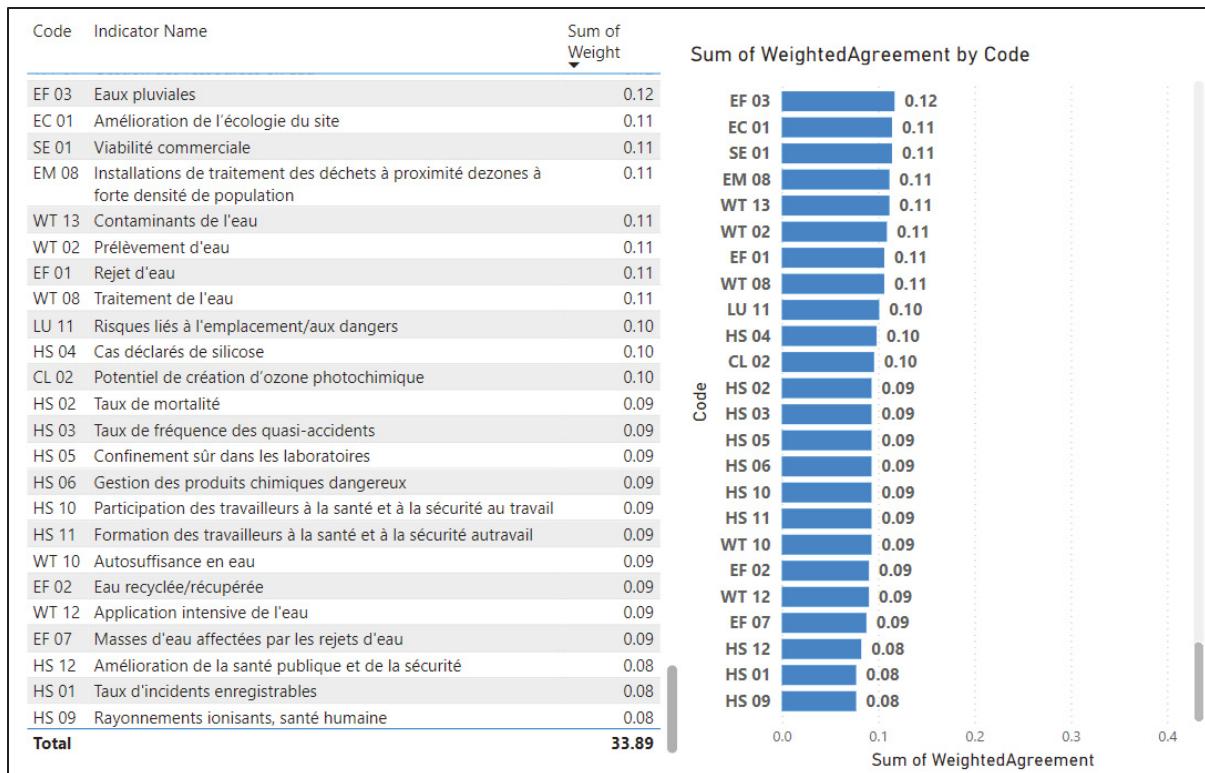


Figure 3.22 Indicateurs avec le score d'accord pondéré le plus bas

La liste complète des indicateurs, ainsi que leurs classements et scores d'accord pondérés, est incluse en Annexe 3. Cette liste exhaustive guidera les discussions futures et aidera à affiner la compréhension et l'application des capacités du BIM et des DT dans les évaluations de durabilité.

3.6.2.10 Discussion des scores d'accord

Le Score d'Accord Pondéré est une mesure calculée en incorporant les poids des répondants basés sur leurs attributs démographiques. Plus précisément, des poids sont attribués en fonction des années d'expérience, du niveau d'expertise en BIM et de la familiarité avec la durabilité. Ces scores sont utilisés pour comparer les indicateurs entre eux, aidant à identifier lesquels ont un consensus plus élevé et lesquels ont un consensus plus faible.

Les Scores d'Accord Pondérés fournissent une mesure relative du consensus parmi les répondants. Un score plus élevé indique un niveau plus élevé d'accord parmi les réponses pondérées, tandis qu'un score plus bas met en évidence des domaines avec moins de consensus. Cette mesure relative est cruciale pour identifier les indicateurs qui peuvent nécessiter plus d'attention et de discussion.

Les scores d'accord pondérés relativement plus bas peuvent être attribués aux divers horizons et expertises des répondants, ce qui conduit naturellement à une gamme d'opinions. Cette diversité est précieuse, car elle met en évidence la complexité des pratiques de durabilité et la nécessité d'efforts supplémentaires pour construire un consensus. En identifiant les indicateurs avec des scores de consensus plus bas, nous pouvons les prioriser pour une analyse et une discussion plus détaillée avec des experts dans la prochaine phase de l'évaluation.

En résumé, les Scores d'Accord Pondérés servent de mesure relative pour comparer le niveau de consensus selon différents indicateurs de durabilité. Cette comparaison aide à identifier les indicateurs nécessitant plus d'attention et à travailler vers la construction d'un plus grand consensus sur l'application du BIM et des DT pour la durabilité. Les scores guident les recherches et discussions futures, garantissant que les domaines avec un accord plus faible sont examinés de plus près pour atteindre une compréhension et un alignement plus complets sur les pratiques de durabilité clés.

3.6.3 Résultats des entretiens avec les experts

L'exploration des perspectives d'experts sur l'intégration du BIM et des DT dans le contexte de la durabilité a fourni des données précieuses. À travers une série d'entretiens semi-structurés, trois experts de l'industrie ont partagé leurs points de vue sur la catégorisation de la durabilité, ont réagi aux résultats de l'enquête et ont évalué la capacité du BIM et des DT à travers divers indicateurs de durabilité. Le Tableau 3.13 résume ces discussions, mettant en évidence la diversité des opinions et des perspectives parmi ces experts.

Tableau 3.13 Perspectives des experts sur l'intégration du BIM et des DT dans les pratiques de durabilité : Résumé des perspectives

Experts	Opinion sur les 15 catégories de durabilité	Avis sur l'alignement des résultats de l'enquête	Opinion sur la capacité du BIM et des DT dans les indicateurs
Expert 1	<p>Souligne que les impacts environnementaux de catégories comme le changement climatique, l'énergie et l'eau sont similaires, suggérant qu'une catégorisation plus consolidée pourrait être bénéfique. Reconnaît le changement climatique comme une catégorie distincte en raison de sa priorité dans les normes de durabilité.</p>	<p>Voit un potentiel pour le BIM au-delà de son utilisation actuelle, notamment dans le traitement des déchets organiques. Questionne le placement de certains indicateurs comme la mise en service des bâtiments en relation avec les DT, notant que certains sont plus adaptés au BIM en raison de leur focus sur l'analyse spatiale et des coûts. Mentionne le succès dans la mesure de l'adaptabilité via le BIM dans des projets passés.</p>	<p>Note un fort accord sur l'application du BIM dans la gestion des risques environnementaux, les commodités de localisation et l'amélioration écologique. Souligne la croyance unanime dans le rôle vital des DT pour assurer l'autosuffisance en eau, indiquant leur potentiel à optimiser les systèmes d'eau et à garantir la sécurité.</p>
Expert 2	<p>Met l'accent sur l'importance de comprendre comment les catégories de durabilité sont interconnectées, sans nécessairement se chevaucher. Suggère que des catégories comme la conception et les matériaux servent à différents niveaux conceptuels au sein de la durabilité. Estime qu'une ontologie claire des catégories et de leur relation avec les piliers de la durabilité est cruciale.</p>	<p>Réfléchit sur les résultats de l'enquête, suggérant que les répondants ont pu être influencés par leurs expériences actuelles plutôt que de considérer les changements futurs nécessaires dans les pratiques de durabilité. Plaide pour une plus grande sensibilisation des répondants, notamment concernant les indicateurs nouveaux ou moins familiers.</p>	<p>Est d'accord sur l'utilité reconnue du BIM pour la gestion environnementale, avec quelques désaccords mettant en lumière des domaines nécessitant une sensibilisation accrue et le développement de stratégies futures dans les pratiques de durabilité.</p>

Tableau 3.13 Perspectives des experts sur l'intégration du BIM et des DT dans les pratiques de durabilité : Résumé des perspectives (suite)

Experts	Opinion sur les 15 catégories de durabilité	Avis sur l'alignement des résultats de l'enquête	Opinion sur la capacité du BIM et des DT dans les indicateurs
Expert 3	Prône une approche de catégorisation nuancée, s'assurant que chaque catégorie est distincte tout en reflétant toujours la nature interconnectée des questions de durabilité. Recommande l'alignement des catégories avec les normes de durabilité mondiales.	Suggère que les résultats de l'enquête peuvent indiquer un besoin de progrès de l'industrie vers une utilisation plus intégrée du BIM et des DT, poussant vers des pratiques de durabilité aspirantes.	Considère le BIM comme un élément intégral de la planification détaillée de la gestion des actifs et les DT comme un outil puissant pour l'optimisation en temps réel des bâtiments, en particulier dans les systèmes liés à l'eau et les initiatives de sécurité.

3.6.3.1 Évaluation des capacités du BIM et des DT pour chaque indicateur

À la suite des perspectives qualitatives, les entretiens ont également produit des données quantitatives par l'évaluation des capacités du BIM et des DT selon divers indicateurs de durabilité. Ce processus a révélé des niveaux d'accord parmi les experts, montrant un consensus ou des divergences quant à l'applicabilité de ces technologies aux pratiques de durabilité. Le Tableau 3.14 ci-dessous affiche les indicateurs avec les scores d'accord les plus élevés, indiquant un consensus de 100 % parmi tous les experts concernant la capacité du BIM et des DT pour ces indicateurs spécifiques. Notamment, 19 des 40 indicateurs discutés ont reçu un accord unanime, soulignant une concordance significative sur le potentiel du BIM et des DT pour les indicateurs concernés.

Tableau 3.14 Consensus sur les capacités du BIM et des DT pour les indicateurs de durabilité: Scores d'accord les plus élevés

No	Code	Nom de l'indicateur	Capacités BIM/DT	Accord
1	EM 08	Installations de traitement des déchets à proximité des zones à forte densité de population	2 - Modèle partagé	100 %
2	LU 13	Proximité aux services	2 - Modèle partagé	100 %
3	LU 14	Développement du site	2 - Modèle partagé	100 %
4	EC 04	Sites opérationnels dans ou à proximité d'une zone protégée	2 - Modèle partagé	100 %
5	WT 07	Gestion des ressources en eau	3 - Modèle partagé avec données de capteur intégrées	100 %
6	WT 08	Traitements de l'eau	3 - Modèle partagé avec données de capteur intégrées	100 %
7	WT 11	Système à deux réservoirs	2 - Modèle partagé	100 %
8	WT 13	Contaminants de l'eau	3 - Modèle partagé avec données de capteur intégrées	100 %
9	EF 01	Rejet d'eau	3 - Modèle partagé avec données de capteur intégrées	100 %
10	EF 02	Eau recyclée/récupérée	3 - Modèle partagé avec données de capteur intégrées	100 %
11	EF 03	Eaux pluviales	3 - Modèle partagé avec données de capteur intégrées	100 %
12	EF 06	Déversements importants	3 - Modèle partagé avec données de capteur intégrées	100 %
13	EF 07	Masses d'eau affectées par les rejets d'eau	3 - Modèle partagé avec données de capteur intégrées	100 %
14	OC 09	Contrôle de la fumée de tabac	4 - Jumeau numérique complet	100 %
15	HS 01	Taux d'incidents enregistrables	2 - Modèle partagé	100 %
16	HS 04	Cas déclarés de silicose	2 - Modèle partagé	100 %
17	HS 09	Rayonnements ionisants, santé humaine	3 - Modèle partagé avec données de capteur intégrées	100 %
18	SE 01	Viabilité commerciale	2 - Modèle partagé	100 %
19	SE 13	Valeur économique directe	2 - Modèle partagé	100 %

Le Tableau 3.14 indique un fort consensus pour l'utilisation d'un modèle partagé dans des domaines tels que les sources alternatives non renouvelables et la gestion des déchets près des zones densément peuplées. De même, il y a un accord unanime sur l'importance des données de capteurs intégrées pour l'évaluation des risques et l'amélioration de l'écologie du site.

L'application d'un jumeau numérique complet pour l'autosuffisance en eau souligne le rôle crucial des DT dans l'optimisation de l'utilisation des ressources en eau.

3.6.3.2 Conclusion

Les entretiens avec les experts et l'analyse subséquente ont fourni une compréhension utile du paysage actuel et du potentiel futur des technologies BIM et DT pour promouvoir la durabilité dans l'industrie des actifs bâtis. Les perspectives recueillies soulignent le besoin critique d'une approche intégrée de la durabilité qui tire parti des capacités complètes du BIM et des DT, s'aligne avec les normes mondiales et aborde la nature interconnectée des problèmes de durabilité. Le fort consensus sur les capacités du BIM et des DT pour des indicateurs spécifiques sert de signal clair indiquant la voie à suivre, suggérant des domaines de recherche, de développement et de mise en œuvre pour atteindre des résultats durables transformateurs. Cette exploration jette les bases pour avancer dans l'intégration du BIM/DT aux objectifs de durabilité, contribuant ainsi au développement d'environnements construits plus durables, efficaces et résilients.

3.7 Résumé du chapitre

Le chapitre Résultats et Analyse de cette thèse présente une comparaison des résultats issus de diverses étapes d'évaluation – ateliers, enquêtes, entretiens avec des experts – et leur interrelation avec l'analyse de la Matrice Consolidée de Durabilité (MCD). Les résultats des ateliers reflètent principalement la perception des participants sur l'applicabilité des capacités du BIM aux indicateurs de durabilité, avec une préférence notable pour des niveaux BIM plus intégrés et enrichis en données comme le « Modèle Partagé avec Données de Capteur Intégrées » et le « Jumeau Numérique Complet ».

Les résultats de l'enquête ont fait écho à ces sentiments, révélant une tendance générale de l'industrie vers des technologies BIM et DT sophistiquées, le « Modèle Partagé » et le « Jumeau Numérique Complet » étant hautement appréciés par les participants. Les

conclusions ont mis en lumière une reconnaissance collective du potentiel des niveaux de numérisation plus avancés pour faire progresser les efforts de durabilité.

Les entretiens avec des experts ont ajouté de la profondeur à ces résultats en fournissant une critique professionnelle de la MCD et une mise en perspective des résultats de l'enquête. Les experts ont souvent contextualisé et nuancé les résultats des enquêtes et des ateliers, indiquant que bien qu'il y ait un enthousiasme pour les applications avancées du BIM, l'industrie pourrait avoir besoin de progresser davantage pour réaliser pleinement ce potentiel, notamment dans des domaines comme le traitement des déchets organiques qui voient actuellement moins d'application du BIM.

Les résultats de l'analyse de la MCD ont fourni une base solide pour ces évaluations, mettant en évidence la fréquence et la distribution des indicateurs de durabilité à travers les certifications et les normes, et montrant comment ces indicateurs s'alignent avec les 15 catégories de durabilité définies. Cette analyse s'est avérée être une pierre angulaire pour comprendre la distribution des indicateurs et identifier les domaines clés pour l'application du BIM et des DT.

CHAPITRE 4

DISCUSSION ET CONCLUSION

4.1 Introduction

Ce chapitre synthétise les résultats de la thèse, en réfléchissant à leur alignement avec la littérature existante et en répondant aux objectifs de recherche. Le chapitre commence par une discussion sur la conception de la recherche, suivie d'une réflexion détaillée sur les principales conclusions. Il identifie ensuite les limitations rencontrées au cours de l'étude et se termine par les contributions à la fois théoriques et pratiques, ainsi que par les orientations pour les recherches futures.

4.2 Discussion sur la conception de la recherche

La conception de cette étude repose sur la méthodologie de la recherche en sciences de la conception (DSR), une approche structurée qui a guidé le développement, la validation et l'évaluation de l'artefact principal : l'intégration de la Matrice Consolidée de Durabilité (MCD) aux capacités BIM et DT. Cette section discute de la conception de la recherche et des concepts clés, en se référant à diverses sections et figures de la thèse pour illustrer l'approche adoptée.

La méthodologie DSR a fourni un cadre pour aborder le problème complexe de l'intégration de diverses normes et certifications de durabilité en un système cohérent. Ce processus a débuté par une revue de littérature approfondie (Section 1.2), visant à capturer la diversité et la richesse des normes de durabilité et des systèmes de certification. L'objectif était de fournir une perspective large et détaillée sur la durabilité, en identifiant des indicateurs qui reflètent les multiples dimensions de la durabilité et leur pertinence tout au long du cycle de vie des actifs bâtis. Cette analyse a permis de mieux comprendre l'étendue des considérations liées à

la durabilité, informant ainsi les objectifs de recherche ultérieurs. Ces objectifs, détaillés dans la Section 2.5, consistaient à développer une liste consolidée d'indicateurs de durabilité reflétant l'étendue de la durabilité dans l'industrie des actifs bâtis et à évaluer les fonctionnalités et le potentiel du BIM et des DT pour opérationnaliser ces indicateurs. Ainsi, la recherche visait à explorer comment ces technologies numériques peuvent contribuer efficacement aux pratiques de durabilité, élargissant ainsi la notion de BIM 6D.

Le développement de la MCD a été une étape cruciale de cette recherche. La MCD a été créée par un processus d'extraction, d'agrégation et d'analyse des données, identifiant des indicateurs de durabilité provenant de 25 certifications et 26 normes. Ces indicateurs ont été classés en 15 dimensions de durabilité, fournissant une vue d'ensemble des mesures de durabilité applicables à l'industrie des actifs bâtis. La Figure 2.2 du Chapitre 2 illustre les étapes du développement de la MCD, y compris l'extraction et l'agrégation des indicateurs, l'analyse comparative et l'intégration finale de ces indicateurs en une matrice unifiée. Ce processus a permis d'obtenir une compréhension approfondie de la durabilité à travers divers systèmes et d'identifier à la fois des indicateurs largement utilisés et d'autres moins courants.

L'intégration des capacités BIM et DT à la MCD était un autre aspect de cette recherche. Ce processus d'intégration impliquait une analyse de la manière dont ces technologies numériques pouvaient soutenir et améliorer les objectifs de durabilité. La Section 3.4 présente la cartographie des capacités BIM et DT à travers les 15 catégories de durabilité, en mettant en évidence des fonctionnalités spécifiques qui peuvent améliorer les pratiques de durabilité. Cette cartographie illustre comment ces technologies permettent d'opérationnaliser les indicateurs de durabilité, étendant ainsi le concept de BIM 6D à des pratiques concrètes bénéficiant aux parties prenantes tout au long du cycle de vie des actifs bâtis.

La stratégie d'évaluation de l'artefact était multifacette, employant des ateliers, des enquêtes et des entretiens avec des experts pour recueillir des informations qualitatives et quantitatives. Cette approche mixte a fourni un cadre de validation robuste, garantissant l'applicabilité pratique et la pertinence de l'artefact. Les ateliers ont permis une évaluation pratique de la

MCD et de son intégration aux BIM et DT, fournissant des retours immédiats et facilitant un raffinement itératif. Les enquêtes ont capturé un spectre plus large de perspectives, tandis que les entretiens avec des experts ont offert une validation approfondie et une compréhension nuancée de l'impact potentiel de l'artefact. Ce cadre d'évaluation a renforcé les contributions pratiques de la MCD en alignant les indicateurs de durabilité avec des stratégies concrètes grâce au BIM et aux DT.

Tout au long de la recherche, des concepts clés tels que les indicateurs de durabilité, les capacités du BIM et des DT, et leur intégration dans un artefact unifié ont été centraux à l'étude. La MCD a opérationnalisé ces concepts, offrant une approche structurée pour évaluer et améliorer la durabilité dans l'industrie des actifs bâties. Les principes guidant la recherche comprenaient l'intégration des données, la collaboration entre les parties prenantes et le raffinement itératif pour assurer la pertinence et l'efficacité pratiques. Ces principes sont discutés en détail tout au long du Chapitre 2 et démontrés dans le processus de développement et d'évaluation itératif décrit dans le Chapitre 3.

L'approche adoptée dans cette recherche, soutenue par la méthodologie DSR, a assuré que le développement et la validation de l'artefact étaient à la fois rigoureux et pertinents pour des applications réelles. L'intégration de la MCD aux capacités du BIM et des DT représente une avancée dans les pratiques de durabilité, fournissant un outil pour les parties prenantes de l'industrie afin d'évaluer, de surveiller et d'améliorer les résultats en matière de durabilité. Cette section illustre comment chaque composante de l'étude a contribué aux objectifs globaux et au développement réussi de l'artefact, tout en posant les bases d'un BIM 6D élargi et opérationnel.

4.3 Réflexion sur les résultats

Cette section reflète les principales conclusions de la recherche, les comparant avec les travaux antérieurs, évaluant si les objectifs de recherche ont été atteints, et discutant des implications de ces résultats. La réflexion est structurée autour des principaux résultats : introduction d'une

liste consolidée de normes et certifications de durabilité, développement et validation de la MCD, incorporation des capacités BIM et DT, résultats de l'analyse de la MCD et évaluation de l'artefact.

4.3.1 Développement et validation de la Matrice Consolidée de Durabilité (MCD)

L'un des principaux résultats de cette recherche a été la création d'une liste consolidée de normes et de certifications de durabilité, dérivée d'un examen approfondi de 25 certifications et 26 normes. Cet examen visait à fournir une perspective détaillée et holistique de la durabilité, capturant un large éventail d'indicateurs reflétant le cycle de vie complet des actifs bâti et les multiples dimensions de la durabilité. Cette liste répond à la fragmentation des métriques de durabilité identifiée dans la littérature, s'alignant avec les conclusions de Bruckner et Strohmeier (2018) et de Çetin et al. (2021), qui ont mis en lumière les défis posés par les critères divers et souvent contradictoires entre différents cadres de durabilité. Cette liste consolidée fournit un point de référence pour les parties prenantes de l'industrie, facilitant une approche plus cohérente et standardisée de l'évaluation de la durabilité.

En s'appuyant sur cette base, le développement et la validation de la MCD, comprenant 15 catégories et 189 indicateurs, constituent une autre contribution significative. Cette matrice s'appuie sur la complexité et la diversité des indicateurs de durabilité discutées par des chercheurs comme Bruckner et Strohmeier (2018), Giama et Papadopoulos (2012), et Sánchez Cordero et al. (2019), qui se sont concentrés sur l'harmonisation des certifications de durabilité des bâtiments à travers l'Union européenne. De même, Oviir (2016) a souligné l'importance d'intégrer les méthodologies d'évaluation du cycle de vie dans les certifications de durabilité. Cependant, la MCD va plus loin en intégrant ces divers indicateurs dans une structure cohérente, facilitant ainsi la comparaison et l'application. Ce cadre unifié fait écho aux efforts d'Assefa et Frostell (2007), qui ont exploré des modèles d'évaluation environnementale complète, et de Jaberí et Poirier (2024), qui ont souligné la nécessité de cadres de durabilité consolidés dans l'environnement bâti.

4.3.2 Incorporation des capacités BIM et DT

L'incorporation des capacités du BIM et des jumeaux numériques (DT) dans le cadre de la durabilité constitue une autre découverte clé. Des études antérieures d'Assefa et Frostell (2007) et d'Oviir (2016) ont exploré l'intégration des technologies numériques dans les évaluations de durabilité, mais cette recherche va plus loin en cartographiant spécifiquement les capacités du BIM et des DT aux indicateurs de durabilité identifiés. Cette cartographie met en évidence la polyvalence et le potentiel de ces technologies dans l'opérationnalisation d'indicateurs de durabilité variés, allant de l'efficacité énergétique à l'équité sociale.

Par exemple, les technologies BIM et DT ont démontré des promesses significatives dans la simulation des performances énergétiques, permettant l'analyse de la performance environnementale et l'optimisation de l'efficacité énergétique dans les bâtiments (Sabah Haseeb et al., 2023). Elles facilitent également la gestion des énergies renouvelables grâce à l'intégration de systèmes photovoltaïques dans les bâtiments historiques, en relevant des défis tels que l'acceptabilité sociale et l'impact esthétique (Lucchi & Agliata, 2023). Ces capacités reflètent le potentiel du BIM et des DT à contribuer aux objectifs de durabilité à la fois opérationnels et liés à l'impact environnemental intégré.

Au-delà de l'énergie, ces technologies soutiennent également le suivi des émissions et la simulation de la qualité de l'air intérieur. Par exemple, des workflows BIM ont été utilisés pour contrôler les émissions de COV et prédire la qualité de l'air intérieur, garantissant des conceptions de bâtiments sains (D'Amico et al., 2020). De plus, les capacités du BIM et des DT s'étendent à la gestion des déchets, avec des applications dans la gestion visuelle des déchets de démolition et la modélisation des systèmes de valorisation énergétique des déchets (Han et al., 2024; Sözer & Sözen, 2020). En reliant ces capacités aux indicateurs de la MCD, la recherche a démontré comment le BIM 6D peut être renforcé pour intégrer la surveillance en temps réel et les analyses avancées pour améliorer les performances en matière de durabilité.

L'intégration s'étend également à l'utilisation et à la localisation des sites, comme l'optimisation de l'utilisation des terres grâce aux données géospatiales et à l'intégration Civil-BIM pour la sélection des sites (Moon et al., 2010), et la réduction des effets d'îlot de chaleur grâce aux analyses des jumeaux numériques de la couverture végétale (Qi et al., 2022). Pour les préoccupations écologiques, les technologies BIM et DT permettent des évaluations de l'impact sur la biodiversité et la cartographie de la valeur écologique, améliorant la durabilité de l'urbanisme et des efforts de conservation (Fergus et al., 2023; Kostensalo et al., 2023).

Ces exemples illustrent la large applicabilité et le potentiel du BIM et des DT dans diverses catégories de durabilité. Pour une cartographie détaillée de ces capacités, reportez-vous au Tableau 3.10, qui fournit un aperçu complet de la manière dont le BIM et les DT peuvent soutenir et améliorer différents indicateurs de durabilité dans de multiples catégories.

4.3.3 Résultats de l'analyse de la MCD

L'analyse de la MCD a fourni plusieurs éclairages sur la distribution et la classification des indicateurs de durabilité à travers divers systèmes de certification et normes. Il a été observé que certaines catégories, telles que « Matériaux et Produits » et « Social et Économique », étaient plus présentes dans les certifications et les normes, respectivement. Cette distribution met en évidence les différentes priorités et domaines d'intérêt au sein de l'industrie et souligne la nécessité d'une approche équilibrée de la durabilité qui englobe un large éventail d'indicateurs.

Nos résultats ont également révélé des indicateurs dominants, tels que la « Réduction des Émissions de Gaz à Effet de Serre » et la « Qualité de l'Air Intérieur », qui étaient courants dans de nombreux schémas. Ces indicateurs reflètent les priorités urgentes de l'industrie et les domaines où le BIM et les DT peuvent avoir l'impact le plus significatif. Des études de Giama et Papadopoulos (2012) et Assefa et al. (2017) ont également souligné l'importance critique de ces indicateurs dans les pratiques de construction durable. Giama et Papadopoulos (2012) ont mis en avant le rôle des certifications comme BREEAM et LEED dans la promotion de ces

mesures clés de durabilité, tandis qu'Assefa et al. (2017) ont discuté des impacts environnementaux et sanitaires plus larges de la qualité de l'air intérieur.

4.3.4 Évaluation de l'artefact

L'évaluation de l'artefact à travers des ateliers, des enquêtes et des entretiens avec des experts a fourni des retours précieux sur la praticabilité et la pertinence de la MCD et de son intégration aux BIM et DT. Les participants aux ateliers et aux enquêtes ont souligné l'importance des capacités BIM avancées, telles que le « Modèle Partagé avec Données de Capteurs Intégrées » et le « Jumeau Numérique Complet », pour atteindre les objectifs de durabilité. Les entretiens avec des experts ont offert des perspectives plus profondes sur les défis pratiques et les solutions potentielles pour intégrer ces technologies dans les pratiques de l'industrie.

Les retours ont mis en évidence la nécessité d'un raffinement et d'une adaptation continus de la MCD et des technologies intégrées pour garantir leur pertinence et leur efficacité continues. Ces perspectives ont confirmé l'utilité de la MCD, non seulement comme un cadre théorique, mais également comme un outil pratique pouvant être appliqué aux défis réels de la durabilité.

4.3.5 Analyse comparative avec les travaux antérieurs

Comparer nos conclusions avec des recherches antérieures révèle à la fois des alignements et des avancées. Bien que des études précédentes aient reconnu le potentiel du BIM et des DT pour améliorer la durabilité (Ahmad & Thaheem, 2018; Deng et al., 2021), notre recherche fournit un cadre plus détaillé pour intégrer ces technologies à un ensemble d'indicateurs de durabilité. De plus, le développement de la MCD offre un outil pratique qui peut être facilement adopté par les parties prenantes de l'industrie, répondant au besoin identifié par Bruckner et Strohmeier (2018) et Çetin et al. (2021) pour une approche unifiée de l'évaluation de la durabilité.

4.3.6 Réalisation des objectifs de recherche

La recherche a atteint avec succès ses deux principaux objectifs. Premièrement, elle a identifié et catalogué des indicateurs de durabilité provenant de diverses certifications et normes, établissant un contexte clair pour le déploiement du BIM et des DT. Ce catalogage fournit une base pour une intégration plus poussée des technologies numériques aux objectifs de durabilité.

Deuxièmement, la recherche a évalué les fonctionnalités et le potentiel du BIM et des DT pour opérationnaliser ces indicateurs de durabilité. À travers des ateliers, des enquêtes et des entretiens avec des experts, elle a démontré l'applicabilité pratique et les avantages de ces technologies pour améliorer les pratiques durables tout au long du cycle de vie des actifs bâtis.

En conclusion, la réflexion sur les résultats met en évidence l'alignement de notre recherche avec les travaux antérieurs, la réalisation des objectifs de recherche et les contributions significatives à la fois théoriques et pratiques. La MCD, soutenue par les capacités du BIM et des DT, représente une avancée importante pour opérationnaliser la durabilité, offrant des outils et des perspectives actionnables pour les parties prenantes de l'industrie.

4.4 Discussion des limitations

4.4.1 Portée géographique limitée

Les normes et certifications de durabilité examinées dans cette étude proviennent principalement de régions ayant des pratiques de durabilité bien établies, telles que l'Europe, l'Amérique du Nord et certaines parties de l'Asie. Cette sélection pourrait limiter l'applicabilité des conclusions à des régions ayant des environnements réglementaires, des défis de durabilité et des pratiques industrielles différents. Par exemple, les régions d'Afrique et d'Amérique du Sud, qui peuvent avoir des contextes environnementaux et économiques différents, sont sous-représentées. Les recherches futures devraient viser à inclure une portée géographique plus large pour améliorer la pertinence globale des résultats. La Figure 4.1

illustre la distribution géographique des normes et certifications sélectionnées, mettant en évidence la concentration dans certaines régions et la relative rareté dans d'autres.

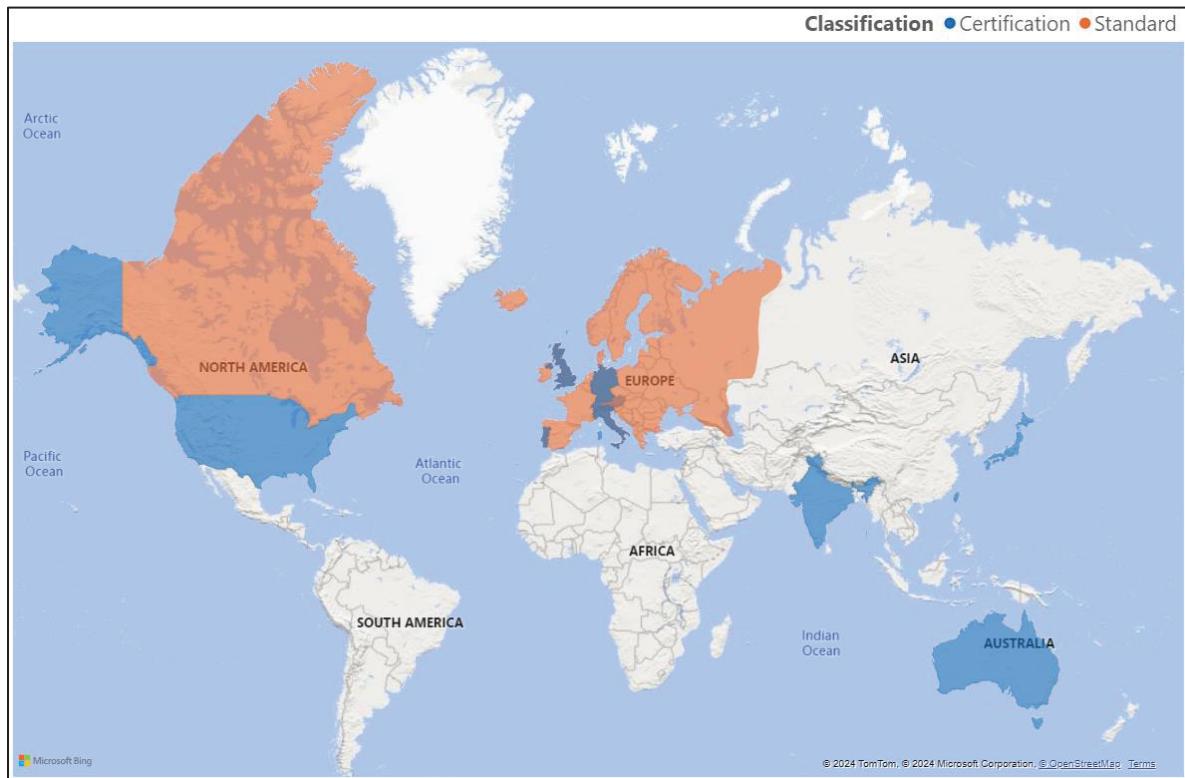


Figure 4.1 Distribution géographique des normes et certifications sélectionnées

4.4.2 Étendue des indicateurs de durabilité

Bien que la MCD inclue 189 indicateurs répartis en 15 catégories, cette sélection peut ne pas englober tous les indicateurs de durabilité potentiels pertinents pour des projets spécifiques ou des contextes régionaux. Les indicateurs ont été choisis en fonction de leur prévalence et de leur importance dans les certifications et normes existantes, mais les problèmes de durabilité émergents et les nouveaux indicateurs peuvent ne pas être pleinement représentés. Des mises à jour continues de la MCD seront nécessaires pour suivre l'évolution des priorités et des innovations en matière de durabilité.

4.4.3 Généralisation des résultats

Les résultats de l'évaluation de l'artefact, en particulier des ateliers et des enquêtes, sont basés sur les réponses d'un groupe spécifique de parties prenantes, principalement parce qu'elles ont des antécédents en BIM, DT et durabilité. Ce groupe cible pourrait ne pas représenter pleinement le large éventail des parties prenantes de l'industrie, y compris celles ayant moins de familiarité ou d'expertise avec ces technologies. De plus, l'analyse n'a pas explicitement pris en compte la diversité de genre parmi les répondants, ce qui pourrait influencer l'auto-évaluation de leur expertise. La généralisation des résultats pourrait être améliorée en impliquant un éventail plus diversifié de participants afin d'inclure différents secteurs, niveaux d'adoption technologique et contextes démographiques.

4.4.4 Méthodes d'évaluation

L'évaluation de l'artefact a été réalisée à travers des ateliers, des enquêtes et des entretiens avec des experts, qui, bien que robustes, présentent des limites inhérentes. Les ateliers et les enquêtes peuvent être sujets à des biais tels que le biais de sélection et le biais de réponse, où les participants peuvent ne pas représenter pleinement la population cible. Les entretiens avec des experts, bien qu'apportant des perspectives approfondies, sont également limités par les perspectives et expériences des experts sélectionnés. Les recherches futures devraient envisager d'utiliser des méthodes d'évaluation supplémentaires, telles que des études longitudinales et des projets pilotes en conditions réelles, pour valider plus exhaustivement les résultats.

4.4.5 Limitations technologiques

Le rythme rapide des avancées technologiques dans le BIM et les DT signifie que les outils et méthodes discutés dans cette recherche peuvent rapidement devenir obsolètes. L'étude repose sur l'état actuel de la technologie, qui évolue continuellement. Les recherches futures devraient prendre en compte la nature dynamique de ces technologies et explorer des moyens d'intégrer les nouveaux développements et innovations dans le cadre de l'évaluation de la durabilité.

4.4.6 Focus sur les certifications et les normes

Cette étude s'est principalement concentrée sur les certifications de bâtiments et les normes de durabilité liées à l'environnement bâti. Bien que l'accent ait été mis sur les certifications liées aux bâtiments, la recherche a également inclus des normes et certifications applicables aux infrastructures et autres secteurs. Cette inclusion plus large était particulièrement évidente dans les normes, qui traitent souvent d'un éventail plus large de problèmes de durabilité au-delà des seuls bâtiments.

Malgré cette portée plus large, l'accent principal s'est maintenu sur les certifications de bâtiments, reflétant leur importance et leurs critères détaillés pour évaluer la durabilité. Cet accent peut négliger certains des défis et des exigences spécifiques uniques à la durabilité des infrastructures et d'autres secteurs. Les recherches futures pourraient élargir la portée pour inclure une représentation plus équilibrée des certifications à travers différents secteurs, garantissant une vue d'ensemble complète des pratiques de durabilité. De plus, l'incorporation de cadres réglementaires aux côtés des certifications et des normes pourrait offrir une compréhension plus holistique de la durabilité dans l'environnement bâti.

Reconnaître ces limitations permet de mieux comprendre les limites de la recherche et les domaines potentiels pour une exploration plus approfondie. Aborder ces limitations dans les études futures améliorera la robustesse, l'applicabilité et l'impact de la recherche sur l'intégration des capacités du BIM et des DT aux normes et certifications de durabilité. Ce faisant, l'industrie des actifs bâtis pourra se rapprocher de la réalisation du plein potentiel des technologies numériques pour promouvoir le développement durable.

4.5 Contributions et implications

Cette recherche apporte des contributions à la fois à la compréhension théorique et aux applications pratiques dans l'industrie des actifs bâtis, en particulier en ce qui concerne

l'intégration du BIM et des DT aux normes et certifications de durabilité. De plus, elle présente les implications pour les pratiques industrielles et le développement des politiques.

4.5.1 Avancement du concept du BIM 6D

Cette recherche fait progresser le concept du BIM 6D en synthétisant diverses normes et certifications de durabilité dans la MCD, un cadre permettant d'évaluer et de gérer la durabilité dans l'environnement bâti. Le développement et la validation de la MCD, qui comprend 15 catégories et 189 indicateurs, offrent une vue structurée et détaillée des métriques de durabilité. Ce travail clarifie la nature multifacette de la durabilité dans l'industrie des actifs bâties, allant au-delà des domaines traditionnellement mis en avant tels que l'énergie, les émissions et la gestion des déchets, pour inclure des dimensions moins fréquemment considérées comme l'équité sociale, le développement économique et le bien-être communautaire.

Par exemple, des indicateurs tels que "Politiques relatives aux droits humains" et "Accès aux services essentiels" soulignent les aspects sociaux importants de la durabilité, tandis que "Coûts du cycle de vie" et "Stratégies de gestion des risques" mettent l'accent sur des considérations économiques. Ces aspects étaient rarement intégrés dans les évaluations de durabilité traditionnelles, qui se concentraient principalement sur les impacts environnementaux. Avec la MCD, une compréhension plus holistique de la durabilité émerge, capturant des dimensions variées essentielles pour des évaluations complètes.

En intégrant les capacités du BIM dans ce cadre, l'étude ne se limite pas à identifier des indicateurs de durabilité, mais démontre également leur potentiel d'opérationnalisation grâce aux technologies numériques avancées. La cartographie des capacités du BIM avec ces catégories et indicateurs de durabilité fournit une vision explicite des domaines où le BIM peut avoir le plus grand impact pour atteindre les objectifs de durabilité.

Cette intégration permet des analyses en temps réel, des simulations dynamiques et une modélisation prédictive, permettant aux parties prenantes de prendre des décisions éclairées

alignées sur les objectifs de durabilité à toutes les étapes du cycle de vie d'un bâtiment. En reliant explicitement les fonctionnalités du BIM à des indicateurs spécifiques, la recherche met en évidence le potentiel du BIM à répondre non seulement aux défis de durabilité bien connus, mais également aux dimensions émergentes et sous-représentées.

Cette approche garantit que les considérations de durabilité sont intégrées tout au long du cycle de vie des actifs bâtis, de la conception et la construction à l'exploitation, l'entretien et la désaffectation. Le développement de la MCD, combiné à son intégration avec les capacités du BIM, positionne le BIM 6D comme un outil transformateur pour atteindre un développement durable complet dans l'industrie des actifs bâtis.

4.5.2 Intégration de la technologie des jumeaux numériques

L'incorporation des capacités des DT dans le cadre d'évaluation de la durabilité représente une contribution novatrice. Cette intégration met en lumière le potentiel des DT à améliorer la surveillance en temps réel, les analyses prédictives et la gestion du cycle de vie des actifs bâtis, élargissant ainsi les limites de l'application de la technologie DT dans les contextes de construction et de durabilité.

4.5.3 Amélioration des outils d'évaluation de la durabilité

La mise en œuvre pratique de la MCD fournit aux professionnels de l'industrie un outil pour évaluer et gérer la performance de durabilité dans les projets de construction. En offrant un ensemble consolidé d'indicateurs et en les cartographiant aux capacités du BIM et des DT, la recherche équipe les praticiens avec des connaissances exploitables et des méthodologies pour améliorer les pratiques de durabilité.

4.5.4 Implications pour la théorie et la pratique

La recherche améliore la compréhension théorique de la manière dont les technologies numériques comme le BIM et les DT peuvent être intégrées dans les pratiques de durabilité.

Cette compréhension peut informer les futures études académiques, aidant à explorer et affiner le rôle des technologies numériques dans l'atteinte des objectifs de durabilité.

L’artefact développé fournit un outil pratique pour les professionnels de l’industrie, leur permettant d’évaluer systématiquement et d’améliorer la performance de durabilité en utilisant des technologies numériques avancées. Cet outil peut être adopté et adapté par les praticiens pour répondre aux besoins de divers projets, améliorant ainsi les pratiques de l’industrie dans l’ensemble.

Les résultats ont des implications notables pour le développement des politiques, notamment en plaidant pour des directives standardisées et des incitations à l’adoption du BIM et des DT dans les pratiques de durabilité. Les décideurs politiques peuvent utiliser ces informations pour élaborer des réglementations soutenant l’intégration des technologies numériques, poussant l’industrie vers des pratiques plus durables et plus efficaces.

4.6 Directions pour les futures recherches

Une direction principale pour les futures recherches devrait être de raffiner la portée des indicateurs de durabilité, en fusionnant potentiellement certains indicateurs ou catégories en fonction des avis d’experts ou en élargissant la portée pour inclure des préoccupations de durabilité émergentes. De plus, élargir la portée géographique pour inclure un éventail plus large de pays et de régions peut fournir des informations sur les pratiques de durabilité diverses et les meilleures pratiques mondiales. L’incorporation de l’analyse avancée, de l’apprentissage automatique et des technologies émergentes comme la blockchain, l’intelligence artificielle et l’IoT dans le cadre du BIM 6D pourrait offrir des perspectives plus approfondies, optimiser l’utilisation des ressources et automatiser les processus de prise de décision.

Appliquer le cadre du BIM 6D à des secteurs au-delà de l’industrie des actifs bâtis, comme les infrastructures et les installations industrielles, pourrait révéler des avantages et des défis supplémentaires. Les études longitudinales suivant les impacts à long terme du BIM 6D sur les

résultats de durabilité fourniraient des preuves empiriques de ses avantages et mettraient en évidence les domaines nécessitant une amélioration continue. La recherche sur les implications politiques et réglementaires de l'adoption des technologies BIM et DT peut guider le développement de cadres de soutien, assurant une mise en œuvre généralisée de ces technologies. Aborder ces domaines fera avancer les capacités et les applications du BIM 6D, contribuant davantage à la durabilité de l'environnement bâti.

4.7 Conclusion

Cette thèse a examiné le potentiel d'intégration des technologies BIM 6D et Jumeau Numérique à la durabilité dans l'industrie des actifs bâtis. Le développement et la validation de la Matrice Consolidée de Durabilité (MCD), englobant 15 catégories et 189 indicateurs, ont fourni un cadre pour évaluer et gérer la durabilité dans l'environnement bâti. Ce cadre clarifie la nature multifacette de la durabilité, en allant au-delà des domaines traditionnels tels que l'énergie, les émissions et la gestion des déchets pour inclure des dimensions essentielles mais moins fréquemment abordées, comme l'équité sociale, le développement économique, la santé et la sécurité des occupants, leur confort et la mobilité. En intégrant les capacités du BIM et des DT, cette recherche a élargi la notion du BIM 6D, démontrant son potentiel significatif pour promouvoir des pratiques durables à travers les diverses étapes du cycle de vie des actifs bâtis. La cartographie explicite des capacités du BIM à ces indicateurs variés de durabilité fournit des informations exploitables sur les domaines où et comment le BIM et les DT peuvent contribuer de manière optimale aux objectifs de durabilité. Cet effort illustre non seulement la polyvalence de ces technologies, mais les positionne également comme des outils clés pour relever à la fois des défis de durabilité bien établis et des dimensions émergentes et sous-représentées.

Les résultats de l'étude mettent également en lumière la nécessité d'une approche plus standardisée, inclusive et intégrée de l'évaluation de la durabilité, capable de relever les défis divers et complexes auxquels est confrontée l'industrie. Malgré les limitations identifiées, telles que géographiques et technologiques, cette recherche a apporté des contributions

substantielles à la fois à la théorie et à la pratique. Elle a offert des perspectives précieuses pour les parties prenantes, y compris les décideurs politiques, les professionnels de l'industrie et les universitaires, et a ouvert la voie à de futurs progrès dans l'intégration du BIM 6D et de la durabilité.

En conclusion, cette thèse plaide pour l'exploration continue et la mise en œuvre des technologies BIM 6D et DT, en mettant l'accent sur leur potentiel transformateur pour atteindre les objectifs de durabilité. En s'appuyant sur le cadre et les résultats présentés, les recherches futures pourront affiner et étendre davantage les applications de ces technologies, explorant leur rôle dans le traitement des aspects sous-représentés de la durabilité et l'intégration des innovations numériques émergentes. Ultimement, ces efforts contribueront à un environnement bâti plus durable et résilient, favorisant un équilibre entre les objectifs environnementaux, sociaux et économiques.

ANNEXE I

MATRICE CONSOLIDÉE DE DURABILITÉ (MCD)

Critères comparables (certifications et normes du bâtiment)		Nom du schéma	Classification	Utilisation du site																																													
Énergie	Changement climatique			Déchets	Émissions				Gesamt				Produktion				Transport																																
EN 01	Demande en énergie primaire	BNB		LU 01	Selection du site	LU 02	Prévention de la pollution liée à la construction	LU 03	Evaluation du site	LU 04	Plan du site	LU 05	Passage / Espaces Verts	LU 06	Réduction des îlots de chaleur	LU 07	Réduction de la pollution lumineuse																																
EN 02	Propriétés flexibles à la demande	BREA		WS 01	Gestion des déchets de construction	WS 02	Gestion des déchets de démolition	WS 03	Traitement des déchets organiques	WS 04	Gestion des déchets recyclés	WS 05	Mesure des déchets miniers	WS 06	Déchets en matériau énergie/déchets	WS 07	Transport des déchets dangereux																																
EN 03	Efficacité/Performance énergétique	DGNB		CL 01	Réduction des émissions de gaz à effet de serre	CL 02	Potentiel d'appauvrissement de l'ozone photochimique	CL 03	Acidification du sol et de l'eau	CL 04	Potentiel de création d'ozone photochimique	CL 05	Éutrophisation	CL 06	Épuisement des ressources biodégradées	CL 07	Réduction des déchets de construction																																
EN 04	Surchargures aromatiques polycycliques (HAP)	Klimaaktiv		EM 01	Intégration des déchets à prox	EM 02	Intégration des émissions de gaz à effet de serre	EM 03	Intégration des émissions volatils (COV)	EM 04	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	EM 05	Polluants atmosphériques dangereux (PAD)	EM 06	Véritalation	EM 07	Qualité de l'air intérieur																																
EN 05	Économie d'énergie/reduction	LEED (USGBC)		EN 18	Génération de gaz de décharge	EN 19	Méthane pour la récupération d'énergie	EN 20	Énergie exportée	EN 21	Sources alternatives non renouvelables	EN 22	Consommation d'énergie décentralisée	EN 23	Densité de puissance / intensité énergétique	EN 24	Émissions NOx/SOx																																
EN 06	Isolation	CASBEE		EN 25	Gestion du carburant des véhicules	EN 26	Génération pour la captation des émissions	EN 27	Demande en service primaire	EN 28	Émissions particulières	EN 29	Composés organiques volatils (COV)	EN 30	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	EN 31	Qualité de l'air intérieur																																
EN 07	Prévisions de consommation	ENVISION		EN 32	Économie d'énergie/reduction	EN 33	Sous-compage pour les locataires	EN 34	Densité de puissance / intensité énergétique	EN 35	Conso/méthane pour les locataires	EN 36	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	EN 37	Qualité de l'air intérieur	EN 38	Émissions NOx/SOx																																
EN 08	Étalement de l'enveloppe du bâtiment / Pont	BCA Green Mark		EN 39	Énergie renouvelable	EN 40	Énergie renouvelable	EN 41	Harmonisation du réseau	EN 42	Économie d'énergie/reduction	EN 43	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	EN 44	Qualification de l'énergie	EN 45	Émissions NOx/SOx																																
EN 09	Énergie renouvelable	E.E.W.H.		EN 46	Isolation	EN 47	Énergie renouvelable	EN 48	Étalement de l'enveloppe du bâtiment / Pont	EN 49	Étalement de l'enveloppe du bâtiment / Pont	EN 50	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	EN 51	Qualification de l'énergie	EN 52	Émissions NOx/SOx																																
EN 10	Mise en service rapide	GREEN STAR		EN 53	Émissions particulières	EN 54	Émissions particulières	EN 55	Étalement de l'enveloppe du bâtiment / Pont	EN 56	Émissions particulières	EN 57	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	EN 58	Qualification de l'énergie	EN 59	Émissions NOx/SOx																																
EN 11	Harmonisation du réseau	GRHA		EN 60	Émissions particulières	EN 61	Émissions particulières	EN 62	Étalement de l'enveloppe du bâtiment / Pont	EN 63	Émissions particulières	EN 64	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	EN 65	Qualification de l'énergie	EN 66	Émissions NOx/SOx																																
EN 12	Économie d'énergie/reduction	HK BEAM		EN 67	Émissions particulières	EN 68	Émissions particulières	EN 69	Étalement de l'enveloppe du bâtiment / Pont	EN 70	Émissions particulières	EN 71	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	EN 72	Qualification de l'énergie	EN 73	Émissions NOx/SOx																																
EN 13	OGNB	LEVEL(S)		EN 74	Émissions particulières	EN 75	Émissions particulières	EN 76	Étalement de l'enveloppe du bâtiment / Pont	EN 77	Émissions particulières	EN 78	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	EN 79	Qualification de l'énergie	EN 80	Émissions NOx/SOx																																
EN 14	Green Globes	NABERS		EN 81	Émissions particulières	EN 82	Émissions particulières	EN 83	Étalement de l'enveloppe du bâtiment / Pont	EN 84	Émissions particulières	EN 85	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	EN 86	Qualification de l'énergie	EN 87	Émissions NOx/SOx																																
EN 15	Lider A	ITACA		EN 88	Émissions particulières	EN 89	Émissions particulières	EN 90	Étalement de l'enveloppe du bâtiment / Pont	EN 91	Émissions particulières	EN 92	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	EN 93	Qualification de l'énergie	EN 94	Émissions NOx/SOx																																
EN 16	WELL	MINERGIE		EN 95	Émissions particulières	EN 96	Émissions particulières	EN 97	Étalement de l'enveloppe du bâtiment / Pont	EN 98	Émissions particulières	EN 99	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	EN 100	Qualification de l'énergie	EN 101	Émissions NOx/SOx																																
EN 17	LEVEL(S)	MINERGIE		EN 102	Émissions particulières	EN 103	Émissions particulières	EN 104	Étalement de l'enveloppe du bâtiment / Pont	EN 105	Émissions particulières	EN 106	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	EN 107	Qualification de l'énergie	EN 108	Émissions NOx/SOx																																
EN 18	NABERS	MINERGIE		EN 109	Émissions particulières	EN 110	Émissions particulières	EN 111	Étalement de l'enveloppe du bâtiment / Pont	EN 112	Émissions particulières	EN 113	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	EN 114	Qualification de l'énergie	EN 115	Émissions NOx/SOx																																
EN 19	MINERGIE	MINERGIE-ECO		EN 116	Émissions particulières	EN 117	Émissions particulières	EN 118	Étalement de l'enveloppe du bâtiment / Pont	EN 119	Émissions particulières	EN 120	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	EN 121	Qualification de l'énergie	EN 122	Émissions NOx/SOx																																
EN 20	MINERGIE-ECO	GBC HB		EN 123	Émissions particulières	EN 124	Émissions particulières	EN 125	Étalement de l'enveloppe du bâtiment / Pont	EN 126	Émissions particulières	EN 127	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	EN 128	Qualification de l'énergie	EN 129	Émissions NOx/SOx																																
EN 21	GBC HB	Passive House (PH)		EN 130	Émissions particulières	EN 131	Émissions particulières	EN 132	Étalement de l'enveloppe du bâtiment / Pont	EN 133	Émissions particulières	EN 134	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	EN 135	Qualification de l'énergie	EN 136	Émissions NOx/SOx																																
EN 22	Passive House (PH)	One Planet (Bioregional)		EN 137	Émissions particulières	EN 138	Émissions particulières	EN 139	Étalement de l'enveloppe du bâtiment / Pont	EN 140	Émissions particulières	EN 141	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	EN 142	Qualification de l'énergie	EN 143	Émissions NOx/SOx																																
EN 23	One Planet (Bioregional)	IGBC		EN 144	Émissions particulières	EN 145	Émissions particulières	EN 146	Étalement de l'enveloppe du bâtiment / Pont	EN 147	Émissions particulières	EN 148	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	EN 149	Qualification de l'énergie	EN 150	Émissions NOx/SOx																																
EN 24	IGBC	ITACA		EN 151	Émissions particulières	EN 152	Émissions particulières	EN 153	Étalement de l'enveloppe du bâtiment / Pont	EN 154	Émissions particulières	EN 155	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	EN 156	Qualification de l'énergie	EN 157	Émissions NOx/SOx																																
EN 25	ITACA	SOMME	10	3	22	12	13	16	6	9	23	5	3	14	1	4	3	2	1	1	0	0	7	9	17	2	16	22	40	19	1	12	8	6	2	20	13	15	17	5	5	0	9	10	9	11	16	14	16

Figure A.I.1 Matrice Consolidée de Durabilité (MCD)

Figure A I.1 Matrice Consolidée de Durabilité (MCD) (suite)

Figure A I.1 Matrice Consolidée de Durabilité (MCD) (suite)

Classification	No.	Nom du schéma	SOMME																																																											
			BNB	BREAM	DGNB	Klimaaktiv	LEED (USGBC)	CASBEE	ENVISION	E.E.W.H.	Green Star	GRIHA	HK BREAM	OGNB	Green Globes	Lider A	WELL	LEVEL(S)	NABERS	MINERGIE	MINERGIE-ECO	GBC HB	Passive House (PH)	One Planet (Biorégional)	IGBC	ITACA	SOMME																																			
anté et sécurité des occupants	HS 02	Taux de mortalité	HS 03	Taux de fréquence des quasi-accidents	HS 04	Cas déclarés de silicose	HS 05	Confinement sur bancs les laboratoires	HS 06	Gestion des produits chimiques dangereux	HS 07	Système de mesure de la sécurité pour la construction	HS 08	Meilleure des accidents de la route	HS 09	Rayonnements ionisants, santé humaine	HS 10	Participation des travailleurs à la santé et à la sécurité	HS 11	Formation des travailleurs à la santé et à la sécurité	HS 12	Amélioration de la santé publique et de la sécurité	DS 01	Efficacité de l'espace	DS 02	Stratégies de conception du projet	DS 03	Discontinuité au travail	DS 04	Politiques en matière de droits de l'humain	DS 05	Engagement communautaire	DS 06	Plan pour les arts et la culture	DS 07	Améliorer les compétences des employés (éducatif)	DS 08	Pratiques commerciales et contractuelles équitables	DS 09	Protection des domaines essentiels	SE 10	Accès aux services des consommateurs	SE 11	Travail des enfants	SE 12	Travail forcé ou obligatoire	SE 13	Valeur économique directe	SE 14	Impacts économiques indirects	SE 15	Aide financière	SE 16	Transparence	SE 17	Activités de lutte contre la corruption	SE 18	Thèmes fiscaux	SE 19	Sujets liés à l'emploi	SOMME	96
Conception	DS 01	Vérabilité commerciale	DS 02	Accès universel / Accès équitable	DS 03	Discontinuité au travail	DS 04	Politiques en matière de droits de l'humain	DS 05	Engagement communautaire	DS 06	Plan pour les arts et la culture	DS 07	Améliorer les compétences des employés (éducatif)	DS 08	Pratiques commerciales et contractuelles équitables	DS 09	Protection des domaines essentiels	SE 10	Accès aux services des consommateurs	SE 11	Travail des enfants	SE 12	Travail forcé ou obligatoire	SE 13	Valeur économique directe	SE 14	Impacts économiques indirects	SE 15	Aide financière	SE 16	Transparence	SE 17	Activités de lutte contre la corruption	SE 18	Thèmes fiscaux	SE 19	Sujets liés à l'emploi	SOMME	96																						
Social et économique	SE 01	Prévention des maladies et des accidents	SE 02	Accès aux services / Accès équitable	SE 03	Discontinuité au travail	SE 04	Politiques en matière de droits de l'humain	SE 05	Engagement communautaire	SE 06	Plan pour les arts et la culture	SE 07	Améliorer les compétences des employés (éducatif)	SE 08	Pratiques commerciales et contractuelles équitables	SE 09	Protection des domaines essentiels	SE 10	Accès aux services des consommateurs	SE 11	Travail des enfants	SE 12	Travail forcé ou obligatoire	SE 13	Valeur économique directe	SE 14	Impacts économiques indirects	SE 15	Aide financière	SE 16	Transparence	SE 17	Activités de lutte contre la corruption	SE 18	Thèmes fiscaux	SE 19	Sujets liés à l'emploi	SOMME	96																						

Figure A.I.1 Matrice Consolidée de Durabilité (MCD) (suite)

Critères comparables (certifications et normes du bâtiment)		Classification	Normes	Utilisation du site												
				Déchets			Changement climatique			Émissions			Énergie			
1	Série GRI 200	LU 07	Réduction de la pollution lumineuse													
2	Série GRI 300	LU 06	Réduction des îlots de chaleur													
3	Série GRI 400	LU 05	Passage / Espaces Verts													
4	Série sectorielle GRI	LU 04	Plan du site													
5	SASB (Matériaux de Construction)	LU 03	Évaluation du site													
6	SASB (Produits et Mobilier)	LU 02	Prévention de la pollution liée à la construction													
7	SASB (Services d'ingénierie)	LU 01	Selection du site													
8	SASB (Immobilier)	WS 07	Transport de déchets dangereux													
9	SASB (Gestion des Déchets)	WS 06	Déchets en matériau énergétiques													
10	PIEVC	WS 05	Mesure des déchets recyclés													
11	LBC 4.0	WS 04	Gestion des déchets organiques													
12	CEN/EN 15978	WS 03	Gestion des déchets de démolition													
13	CEN/EN 15804	WS 02	Gestion des déchets de construction													
14	ASHRAE 189.1	CL 04	Accident de gaz à effet de serre													
15	ISO 14001	CL 03	Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone photochimique													
16	ISO 14040	CL 02	Réduction des émissions de gaz à effet de serre													
17	ISO 14044	CL 01	Réduction des émissions de gaz à effet de serre													
18	ISO 14090/14091	EM 08	Instillations de gaz à effet de serre													
19	ISO 26000	EM 07	Qualité de l'air intérieur													
20	ISO 45001	EM 06	Ventilation													
21	ISO 37101/37104	EM 05	Polluants atmosphériques dangereux (PA)													
22	ISO 20887	EM 04	Hydrocarbures aromatiques polycycliques													
23	ISO 15392	EM 03	Composés organiques volatils (COV)													
24	ISO 37120	EM 02	Matéries particulières													
25	ISO 21930	EM 01	Emissions de NOx/SOx													
26	ISO 21929	SOMME	2 0 9 1 3 3 1 1 12 0 0 5 0 2 0 4 2 1 2 11 10 11 3 12 9 12 18 3 7 9 8 4 10 5 8 18 8 2 1 2 2 0 0 5 4 3													

Figure A.I.1 Matrice Consolidée de Durabilité (MCD) (suite)

Figure A I.1 Matrice Consolidée de Durabilité (MCD) (suite)

Figure A I.1 Matrice Consolidée de Durabilité (MCD) (suite)

Figure A I.1 Matrice Consolidée de Durabilité (MCD) (suite)

ANNEXE II

DESCRIPTIONS DES INDICATEURS DE LA MCD

Tableau A II.1 Descriptions des indicateurs de la MCD

Catégorie	NO	Code	Indicateurs	Description
Energie	1	EN01	Demande en énergie primaire	L'énergie totale nécessaire pour répondre aux besoins annuels en chauffage et en eau chaude d'un bâtiment, y compris les pertes d'énergie qui se produisent lors de la production, de la conversion et de la distribution des combustibles utilisés pour produire cette énergie.
	2	EN02	Réponse flexible à la demande	La réponse flexible à la demande (DSR) fait référence à la capacité d'un bâtiment ou d'un système à ajuster sa consommation d'électricité en réponse aux changements de la demande, de l'offre et du prix de l'énergie.
	3	EN03	Efficacité / Performance énergétique	Pratique consistant à concevoir et à construire des bâtiments qui utilisent l'énergie de la manière la plus efficace possible. Cela inclut la réduction de la quantité d'énergie nécessaire pour alimenter et faire fonctionner le bâtiment, ainsi que l'augmentation de l'utilisation des sources d'énergie renouvelables.
	4	EN04	Surveillance énergétique	La surveillance énergétique fait référence au processus d'observation et de suivi des schémas d'utilisation de l'énergie dans les bâtiments. Le contrôle de l'énergie peut impliquer l'utilisation de divers capteurs, compteurs et outils d'analyse de données pour collecter et analyser les données relatives à l'utilisation de l'énergie.
	5	EN05	Quantification de l'énergie	Le comptage de l'énergie se réfère spécifiquement au processus de mesure et de quantification de la consommation d'énergie à l'aide d'appareils spécialisés appelés compteurs d'énergie.
	6	EN06	Isolation	Utilisation de matériaux qui réduisent le flux de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment, y compris les murs, les toits, les sols et les fenêtres. Les bâtiments ayant un niveau d'isolation élevé ont généralement des besoins en chaleur plus faibles.
	7	EN07	Prévisions de consommation	Estimation de l'utilisation prévue de l'énergie ou des ressources d'un bâtiment sur une certaine période
	8	EN08	Étanchéité de l'enveloppe du bâtiment / Pont thermique	Capacité d'un bâtiment à limiter les fuites d'air ou de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur ou de l'enveloppe
	9	EN09	Énergie renouvelable	L'énergie renouvelable est dérivée de ressources naturelles qui peuvent être reconstituées et maintenues dans le temps, telles que l'énergie solaire, éolienne, géothermique, hydraulique et la biomasse
	10	EN10	Mise en service améliorée	Processus systématique de vérification que les systèmes et équipements d'un bâtiment sont conçus, installés et fonctionnent comme prévu, afin d'atteindre une efficacité énergétique optimale
	11	EN11	Harmonisation du réseau	Processus visant à garantir que les systèmes et équipements énergétiques d'un bâtiment sont synchronisés et conformes aux exigences et normes du réseau électrique

Tableau A II.1 Descriptions des indicateurs de la MCD (suite)

Catégorie	NO	Code	Indicateurs	Description
	12	EN12	Économie d'énergie / Réduction	Combinaison d'une variété de méthodes pour réduire la consommation d'énergie et augmenter l'efficacité énergétique au sein d'un bâtiment
	13	EN13	Sous-comptage pour les locataires	Installation de compteurs d'énergie séparés pour les différents locataires d'un bâtiment à locataires multiples
	14	EN14	Densité de puissance / Intensité énergétique	Quantité d'énergie électrique consommée par unité d'espace du bâtiment. Identifier les zones où la consommation d'énergie est excessive ou celles où des technologies et des stratégies de conception efficaces sur le plan énergétique pourraient être mises en œuvre pour réduire la consommation d'énergie
	15	EN15	Consommation d'énergie décentralisée	Produire et utiliser l'énergie sur place, au sein d'un bâtiment ou d'une communauté locale, plutôt que de dépendre des systèmes centralisés de production et de distribution d'énergie
	16	EN16	Sources alternatives non renouvelables	Englobe un éventail plus large de sources d'énergie qui ne sont pas dérivées des combustibles fossiles traditionnels, y compris les sources renouvelables, mais aussi l'énergie nucléaire, l'hydrogène ou d'autres formes d'énergie à faible teneur en carbone
	17	EN17	Gestion du carburant des véhicules	Mise à niveau des parcs de véhicules dans l'industrie de la construction vers des parcs plus économies en carburant ou passage à des véhicules au gaz naturel
	18	EN18	Génération de gaz de décharge	Processus de capture et d'utilisation du méthane produit par la décomposition des déchets dans les décharges pour générer de l'énergie
	19	EN19	Matériaux pour la récupération d'énergie	Utilisation de matériaux qui peuvent être recyclés ou traités pour produire de l'énergie, tels que les processus de transformation des déchets en énergie ou l'utilisation de matériaux ayant un taux d'efficacité énergétique élevé
	20	EN20	Énergie exportée	Production d'énergie sur site par un bâtiment qui est excédentaire par rapport à ses propres besoins énergétiques et qui est exportée vers le réseau pour être utilisée par d'autres bâtiments ou installations
Émissions	21	EM01	Émissions de NOx/SOx	Les NOx et les SOx sont principalement produits par la combustion de combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz de différentes manières, comme les générateurs diesel, le chauffage des locaux, l'eau chaude, etc.
	22	EM02	Matières particulières	Désigne les minuscules particules en suspension dans l'air, souvent composées de poussière, de suie, de fumée ou d'autres polluants, qui peuvent être nocives pour la santé humaine et l'environnement
	23	EM03	Composés organiques volatils (COV)	Désigne un large éventail de produits chimiques organiques qui s'évaporent facilement à température ambiante et peuvent contribuer à la pollution de l'air et aux problèmes de santé humaine. Les peintures et les produits de nettoyage sont des exemples de sources de COV
	24	EM04	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	Classe de produits chimiques naturellement présents dans le charbon, le pétrole brut et l'essence. Ils résultent de la combustion du charbon, du pétrole, du gaz, du bois, des déchets, etc.
	25	EM05	Polluants atmosphériques dangereux (PAD)	Polluants dont on sait ou dont on soupçonne qu'ils ont des effets graves sur la santé, tels que le cancer, les anomalies congénitales et les maladies respiratoires. Le benzène, le mercure, les dioxynes et l'amiant sont des exemples de polluants atmosphériques dangereux
	26	EM06	Ventilation	Apport d'air frais dans les espaces intérieurs, soit naturellement, soit mécaniquement
	27	EM07	Qualité de l'air intérieur	Englobe de multiples stratégies telles qu'une ventilation adéquate, le contrôle des sources de polluants et l'utilisation de matériaux à faible émission pour maintenir des environnements intérieurs sains

Tableau A II.1 Descriptions des indicateurs de la MCD (suite)

Catégorie	NO	Code	Indicateurs	Description
	28	EM08	Installations de traitement des déchets à proximité de zones à forte densité de population	La divulgation du nombre d'installations comprend, sans s'y limiter, les décharges (actives et fermées) et les installations de valorisation énergétique des déchets détenus ou exploitées par l'entité, dans des zones à forte densité de population ou à proximité de celles-ci
Changements climatiques	29	CL01	Réduction des émissions de gaz à effet de serre	Minimiser ou éliminer les émissions de gaz contribuant au changement climatique, tels que le dioxyde de carbone, le méthane et l'oxyde nitreux, grâce à l'utilisation de pratiques et de technologies durables
	30	CL02	Potentiel de création d'ozone photochimique	Le potentiel de création d'ozone photochimique (POCP), ou smog photochimique, est généralement exprimé par rapport aux facteurs de classification POCP de l'éthylène
	31	CL03	Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP)	Indique le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone des émissions de chlorofluorocarbones (CFC) et d'hydrocarbures chlorés (HC)
	32	CL04	Acidification du sol et de l'eau	Impact négatif que certains polluants, tels que le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote, peuvent avoir sur les écosystèmes du sol et de l'eau en augmentant leur niveau d'acidité
	33	CL05	Eutrophisation	Le eutrophisation désigne l'enrichissement excessif en nutriments d'une masse d'eau, généralement causé par des activités humaines telles que le rejet d'eaux usées, entraînant la prolifération d'algues et d'autres plantes aquatiques qui peuvent réduire les niveaux d'oxygène et nuire à la vie aquatique
	34	CL06	Épuisement des ressources abiotiques	Épuisement des ressources non renouvelables, c'est-à-dire des combustibles fossiles, des métaux et des minéraux extraits de la terre et utilisés dans la construction ou l'exploitation des bâtiments
Déchets	35	WS01	Gestion des déchets de construction	Mise en œuvre de stratégies et de pratiques visant à minimiser la quantité de déchets générés pendant le processus de construction et à détourner les déchets des décharges grâce au recyclage, à la réutilisation ou à d'autres méthodes d'élimination durables
	36	WS02	Gestion des déchets de démolition	Minimiser la quantité de déchets générés lors de la démolition d'un bâtiment ou d'une structure
	37	WS03	Traitements des déchets organiques	Gestion des déchets biodégradables, tels que les déchets de jardin, par des procédés tels que le compostage ou la digestion anaérobie, afin de réduire la quantité de déchets organiques mis en décharge et de produire des sous-produits utiles tels que des engrains ou du biogaz.
	38	WS04	Gestion des déchets recyclés	Processus et stratégies utilisés pour traiter et réutiliser les déchets tels que le papier, le plastique, le verre et le métal, afin de réduire les déchets et de préserver les ressources.
	39	WS05	Mesure des déchets incinérés	Pratique consistant à mesurer et à déclarer la quantité de déchets incinérés dans le cadre de la gestion des déchets et de la récupération d'énergie
	40	WS06	Déchets en matériaux énergétiques	Détourner les déchets potentiels des décharges. La valorisation énergétique des déchets est définie comme la conversion de déchets non recyclables en chaleur, électricité ou combustible utilisable par le biais de divers procédés, notamment la combustion, la gazéification, la pyrolyse, la digestion anaérobie et la récupération des gaz de décharge
	41	WS07	Transport de déchets dangereux	Gestion et transport de déchets jugés dangereux pour la santé humaine et l'environnement
	42	LU01	Sélection du site	Processus de sélection d'un emplacement pour un projet de construction qui prend en compte les facteurs environnementaux, sociaux et économiques

Tableau A II.1 Descriptions des indicateurs de la MCD (suite)

Catégorie	NO	Code	Indicateurs	Description
Utilisation du site et localisation	43	LU02	Prévention de la pollution liée à la construction	Minimiser les impacts négatifs du processus de construction sur l'environnement local et l'utilisation des sols
	44	LU03	Évaluation du site	Évaluation du site spécifique où le bâtiment sera construit afin d'identifier les risques potentiels pour l'environnement, la santé et la sécurité. Il peut s'agir de tester la qualité du sol et de l'eau, etc
	45	LU04	Plan du site	Plan du site décrivant les limites du projet, l'emprise du/des bâtiment(s), la/les zone(s) verte(s) préservée(s) (le cas échéant), la zone précédemment perturbée, la zone d'habitat restaurée, la végétation indigène et adaptée, et le jardin de pollinisateurs désigné
	46	LU05	Paysage / Espaces Verts	Conception et gestion des espaces extérieurs autour d'un bâtiment ou d'un projet, en mettant l'accent sur l'amélioration de la durabilité environnementale, sociale et économique du site.
	47	LU06	Réduction des îlots de chaleur	Réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbain causé par l'absorption du rayonnement solaire par les surfaces dures du bâtiment. Ceci peut être réalisé par l'utilisation de toits verts, d'arbres d'ombrage, de trottoirs frais, etc.
	48	LU07	Réduction de la pollution lumineuse	Se réfère aux efforts déployés lors de la conception et de l'exploitation des bâtiments pour minimiser l'impact négatif de la lumière artificielle sur l'environnement naturel et la santé humaine, par exemple en réduisant au minimum les intrusions lumineuses, l'éclat du ciel et l'éblouissement
	49	LU08	Protection des terres agricoles	Préservation et protection des terres agricoles contre la conversion à des utilisations non agricoles
	50	LU09	Protection des sols	Préserver la santé et la qualité des sols à l'intérieur et autour des bâtiments, tout en minimisant les impacts négatifs causés par les activités de construction, tels que le compactage et l'érosion des sols. Il peut s'agir de mesures telles que la minimisation des perturbations du site, l'utilisation de techniques de contrôle de l'érosion et la mise en œuvre de pratiques appropriées de gestion des sols.
	51	LU10	Réhabiliter les friches industrielles et les terrains contaminés	Se réfère au processus de restauration et de réutilisation de sites industriels contaminés ou abandonnés ou de terrains pour de nouveaux développements, afin de réduire la pression sur les terrains vierges.
	52	LU11	Risques liés à l'emplacement / Aux dangers	Risques naturels potentiels tels que les inondations, les tremblements de terre, etc. associés à l'emplacement d'un projet de construction.
	53	LU12	Image / Influence de l'emplacement	Se réfère à l'impact qu'un bâtiment ou un projet de développement peut avoir sur la perception publique d'une zone ou d'un quartier spécifique.
	54	LU13	Proximité aux services	Proximité du bâtiment par rapport aux ressources et services communautaires tels que les parcs, les écoles, les épiceries et autres services essentiels qui favorisent un mode de vie durable.
	55	LU14	Développement du site	Équilibrer le développement avec la conservation de l'environnement en préservant les zones naturelles existantes et en restaurant celles qui ont été endommagées afin de promouvoir la biodiversité et de fournir un habitat.
Écologie	56	EC01	Amélioration de l'écologie du site	Comprend un large éventail d'actions telles que la préservation ou la restauration des habitats naturels, la plantation de végétation indigène, la minimisation des surfaces imperméables pour réduire le ruissellement des eaux de pluie, et la mise en œuvre de mesures de contrôle de l'érosion et des sédiments pour créer un site de construction et des zones environnantes qui soit écologiquement sain, résilient et capable de soutenir la biodiversité locale.

Tableau A II.1 Descriptions des indicateurs de la MCD (suite)

Catégorie	NO	Code	Indicateurs	Description
	57	EC02	Amélioration / Préservation de la biodiversité	Se concentrer sur la protection et la promotion de la biodiversité par des actions telles que la préservation ou la restauration des habitats naturels, la fourniture de nourriture et d'abris pour la faune, la plantation de végétation indigène et la minimisation des perturbations pour la faune.
	58	EC03	Superficies terrestres perturbées	Réfère à la quantité de terre sur un site de projet qui a été affectée par des activités humaines telles que l'excavation du sol et l'installation d'infrastructures telles que des routes et des parkings pendant la construction et le développement.
	59	EC04	Sites opérationnels dans ou à proximité d'une zone protégée	Mesure du nombre et du pourcentage de sites opérationnels situés dans ou à proximité de zones protégées telles que les parcs nationaux, les refuges pour animaux sauvages, etc. afin d'évaluer leur impact sur l'environnement.
	60	EC05	Habitats protégés ou restaurés	Indique la superficie des terres sur lesquelles des mesures ont été prises, telles que la mise en œuvre de projets de conservation, la restauration de terres dégradées ou la création de nouveaux habitats par le biais du reboisement ou de la restauration de zones humides, afin de protéger ou de restaurer les habitats.
Mobilité	61	MB01	Accessibilité des transports publics	Accès facile des résidents ou des occupants d'un bâtiment aux systèmes de transport public tels que les bus, les trains, les tramways et les métros.
	62	MB02	Capacité de stationnement	Nombre de places de stationnement disponibles pour les voitures dans un bâtiment ou un lotissement.
	63	MB03	Politique de covoiturage	Encourage ou exige la mise en place de services de covoiturage pour les occupants du bâtiment ou les visiteurs afin de réduire la dépendance à l'égard des véhicules personnels.
	64	MB04	Espace pour petites voitures	Espace de stationnement désigné plus petit qu'un espace de stationnement standard pour accueillir des véhicules plus petits et plus efficaces tels que les voitures compactes et les véhicules électriques.
	65	MB05	Plan de déplacement	Comprend une série de mesures visant à encourager les occupants du bâtiment et les visiteurs à utiliser des moyens de transport durables, tels que la marche, le vélo, les transports en commun ou le covoiturage.
	66	MB06	Mobilité / Transport alternatifs	Réfère spécifiquement aux méthodes de transport qui ont un impact environnemental réduit, telles que les véhicules électriques ou hybrides.
	67	MB07	Promotion de la bicyclette	Promouvoir l'utilisation des bicyclettes comme moyen de transport en fourrissant des infrastructures telles que des supports à bicyclettes, des vestiaires, etc. pour les navetteurs cyclistes.
	68	MB08	Promotion des déplacements à pied	Priorité à la marche comme moyen de transport en préparant des aménagements tels que des trottoirs, des passages pour piétons, des passerelles pour piétons, etc. afin d'encourager une marche sûre et efficace.
	69	MB09	Développement avec accès aux transports	La construction a lieu sur un site qui a déjà été développé et qui a accès à une infrastructure de transport établie.
	70	MB10	Impacts de la construction sur la mobilité	Impacts potentiels de la construction d'un bâtiment sur la mobilité des personnes et des biens dans la zone environnante, y compris l'évaluation des impacts potentiels sur les systèmes de transport, la circulation et l'accès des piétons et des cyclistes pendant le processus de construction. Cela inclut l'évaluation des impacts potentiels sur les systèmes de transport, la circulation et l'accès des piétons et des cyclistes pendant le processus de construction.

Tableau A II.1 Descriptions des indicateurs de la MCD (suite)

Catégorie	NO	Code	Indicateurs	Description
Eau	71	WT01	Optimisation de la consommation d'eau	Stratégies et technologies utilisées pour réduire la quantité d'eau consommée par l'actif bâti, y compris l'utilisation d'équipements économies en eau.
	72	WT02	Prélèvement d'eau	Quantité d'eau prélevée dans une source naturelle, telle qu'une rivière, un lac ou un aquifère, pour alimenter un bâtiment ou une installation en eau.
	73	WT03	Surveillance et comptage de l'eau	Suivi et analyse des données relatives à l'utilisation de l'eau afin d'identifier les domaines d'inefficacité et de gaspillage. La surveillance de l'eau englobe différentes actions telles que le comptage de l'eau, la collecte de données, l'analyse, la planification d'actions et l'établissement de rapports.
	74	WT04	Détection de fuite d'eau	Processus d'identification et de traitement des fuites dans le système d'alimentation en eau d'un bâtiment, tel que les tuyaux, les appareils sanitaires ou d'autres composants.
	75	WT05	Demande en eau	Mesure de la quantité d'eau nécessaire pour répondre aux besoins des occupants et des activités d'un bâtiment. Cela peut inclure l'eau utilisée pour boire, se laver, cuisiner et d'autres activités, ainsi que l'eau utilisée pour l'irrigation, le refroidissement et d'autres systèmes du bâtiment.
	76	WT06	Système d'irrigation	Fournir de l'eau pour les plantes et les aménagements paysagers de manière efficace, par exemple en utilisant les technologies appropriées, en optimisant l'utilisation de l'eau de pluie, en utilisant un système d'irrigation correctement réparti, etc.
	77	WT07	Gestion des ressources en eau	Gestion et conservation de l'eau dans un bâtiment et son environnement.
	78	WT08	Traitement de l'eau	Processus d'élimination des impuretés et des contaminants de l'eau brute pour la rendre propre à la consommation ou à d'autres usages.
	79	WT09	Qualité de l'eau	Mesure et évaluation des caractéristiques chimiques, physiques et biologiques de l'eau.
	80	WT10	Autosuffisance en eau	Capacité d'un bâtiment à répondre à ses propres besoins en eau grâce à des sources d'eau et des systèmes de traitement sur place, sans dépendre de sources externes telles que l'approvisionnement en eau municipale.
	81	WT11	Système à deux réservoirs	Fourniture d'un double réservoir pour le système d'alimentation en eau potable et le système d'alimentation en eau de rinçage.
	82	WT12	Application intensive de l'eau	Identification et gestion des applications à forte consommation d'eau dans un bâtiment, telles que les systèmes d'irrigation, les tours de refroidissement, etc.
	83	WT13	Contaminants de l'eau	Analyse et réduction de substances ou de composés spécifiques réglementés par des normes de qualité de l'eau locales ou nationales et susceptibles d'avoir un impact négatif sur la santé humaine.
	84	WT14	Additifs de l'eau	Tester et contrôler l'approvisionnement en eau du bâtiment pour détecter la présence d'additifs de l'eau tels que le chlore ou la chlormine, et fournir aux occupants du bâtiment des informations sur les types et les niveaux d'additifs présents dans l'eau.
Effluents	85	EF01	Rejet d'eau	Rejet d'eau d'un bâtiment, y compris les eaux usées provenant des éviers, des toilettes et des douches, ainsi que les eaux de ruissellement provenant des toits et des zones extérieures, dans l'environnement ou dans les systèmes d'eau locaux.
	86	EF02	Eau recyclée / Récupérée	L'eau recyclée est une eau usée (y compris les eaux grises et les eaux noires) qui a subi des processus de traitement avancés pour répondre à des normes spécifiques de qualité de l'eau et qui convient à une série d'utilisations non potables telles que l'irrigation des espaces verts, la chasse d'eau des toilettes, etc.

Tableau A II.1 Descriptions des indicateurs de la MCD (suite)

Catégorie	NO	Code	Indicateurs	Description
	87	EF03	Eaux pluviales	Gestion des eaux non traitées provenant de précipitations naturelles recueillies sur les toits, dans les rues ou sur d'autres surfaces qui n'ont pas été contaminées par l'utilisation.
	88	EF04	Système d'égouts	Conformité aux réglementations locales en matière d'égouts pour le transport des eaux usées des bâtiments vers les stations d'épuration par le biais de canalisations et d'infrastructures souterraines.
	89	EF05	Mesures correctives pour les rejets des décharges	Les mesures correctives pour les rejets des décharges consistent à contrôler et à nettoyer les substances nocives afin de protéger les eaux souterraines contre les niveaux dangereux de polluants, conformément aux normes de protection des eaux souterraines.
	90	EF06	Déversements importants	Identifier et fournir des rapports sur les rejets involontaires ou accidentels de substances dangereuses susceptibles de nuire à la santé humaine et à l'environnement. Le rapport peut inclure les types de substances dangereuses rejetées, le lieu et l'étendue du déversement, ainsi que les mesures prises pour prévenir le déversement et y remédier.
	91	EF07	Masses d'eau affectées par les rejets d'eau	Communiquer les informations relatives aux rejets d'eau et à leur impact sur les masses d'eau voisines telles que les rivieres, les lacs et les océans.
Matériaux et produits	92	MT01	Analyse du cycle de vie	Évaluation d'un produit en termes d'impact environnemental tout au long de son cycle de vie (de l'extraction et de la transformation des matières premières à l'élimination ou au recyclage des déchets)
	93	MT02	Approvisionnement responsable en matériaux	"Approvisionnement responsable" désigne le processus de sélection et d'utilisation, dans un projet de construction, de matériaux provenant d'une source éthique et durable, en tenant compte des impacts environnementaux, sociaux et économiques tout au long de la chaîne d'approvisionnement. Il s'agit de veiller au respect des réglementations, d'utiliser des matériaux.
	94	MT03	Conception pour la durabilité	Processus de sélection et d'utilisation, dans les projets de construction, de matériaux destinés à être durables.
	95	MT04	Conception pour la flexibilité	Utilisation de matériaux et de stratégies de conception qui permettent de modifier ou d'altérer facilement l'agencement, les systèmes ou les composants d'un bâtiment sans nécessiter de travaux de rénovation ou de démolition importants.
	96	MT05	Efficacité des matériaux	Utilisation efficace des matériaux tout au long du cycle de vie du bâtiment, ce qui implique la réduction du nombre de matériaux utilisés, la sélection de matériaux ayant un impact moindre sur l'environnement et l'augmentation de la réutilisation et du recyclage des matériaux.
	97	MT06	Résilience des matériaux	Capacité des matériaux et produits de construction à résister et à se remettre de divers facteurs de stress tels que les phénomènes météorologiques extrêmes, les catastrophes naturelles et l'usure à long terme.
	98	MT07	Extraction des ressources / Matériel régional	Utilisation de matériaux de construction extraits, transformés et fabriqués à une certaine distance du site de construction.
	99	MT08	Nettoyage facile	Utilisation de matériaux conçus pour être nettoyés et entretenus facilement et efficacement, avec une utilisation minimale d'eau, d'énergie et de produits de nettoyage. Exemples : sols à surface lisse, revêtements résistants aux taches et comptoirs non poreux.
	100	MT09	Recyclage facile	Utilisation de matériaux ayant un taux de recyclage élevé et pouvant être facilement séparés et recyclés à la fin de leur vie utile, tels que le verre, le métal, le papier, le carton, etc.
	101	MT10	Exclusion des substances nocives	Utilisation dans les bâtiments de matériaux ne contenant pas de substances nocives ou de produits chimiques pouvant avoir un impact négatif sur la santé humaine ou l'environnement.

Tableau A II.1 Descriptions des indicateurs de la MCD (suite)

Catégorie	NO	Code	Indicateurs	Description
	102	MT11	Déclaration environnementale de produit (DEP)	Conformité avec les détenteurs de DEP. La DEP est un document vérifié et normalisé qui fournit des informations transparentes sur l'impact environnemental d'un produit ou d'un matériau tout au long de son cycle de vie.
	103	MT12	Utilisation de produits verts / Produits à faibles émissions	Se réfère aux produits et matériaux de construction qui ont un impact réduit sur l'environnement et favorisent la durabilité tout au long de leur cycle de vie. Les matériaux écologiques sont évalués sur la base de facteurs tels que l'efficacité des ressources, le contenu recyclé et l'utilisation de matériaux préférables pour l'environnement.
	104	MT13	Utilisation de matériaux alternatifs	Minimiser l'utilisation de matériaux vierges et détourner les déchets utilisables des décharges vers l'industrie de la construction.
	105	MT14	Prefabrication	Fabrication hors site, sur mesure, d'éléments de construction importants dans des installations spécialisées, dans lesquelles divers matériaux sont assemblés pour former un élément constitutif de l'installation finale. Les exemples incluent les fermes, les poutrelles, les fabrications en acier de construction, la menuiserie architecturale, le mur-rideau et le béton préfabriqué.
	106	MT15	Matériaux forestiers durables / Bois	Utilisation de matériaux forestiers tels que le bois, les panneaux à base de bois et les produits en papier certifiés par des systèmes de certification tiers reconnus, tels que le Forest Stewardship Council (FSC).
	107	MT16	Traçabilité	Capacité de retracer l'historique, l'application ou la localisation d'une entité au moyen d'identifications enregistrées.
	108	MT17	Matériaux réutilisés	Se réfère aux matériaux qui sont réutilisés dans un nouveau projet de construction après leur utilisation initiale, tels que le bois, les briques et le métal récupérés dans des bâtiments démolis, ou les matériaux excédentaires provenant de projets de construction antérieurs.
	109	MT18	Matériaux recyclés	Se réfère aux matériaux qui ont été traités ou transformés en nouveaux matériaux ou produits après leur utilisation initiale, tels que le verre, l'acier, le plastique et le caoutchouc recyclés.
	110	MT19	Évaluation des risques liés aux produits	Utilisation de produits ayant fait l'objet d'un rapport d'examen préalable de l'exposition des occupants (OESR). L'OESR est un document qui évalue l'exposition potentielle des occupants d'un bâtiment à des produits chimiques dangereux et à d'autres polluants.
Gestion	111	MG01	Coûts du cycle de vie	Évaluation des coûts totaux associés à un projet de construction sur l'ensemble de son cycle de vie, y compris la construction initiale, l'entretien, l'exploitation et l'élimination ou le recyclage en fin de vie du bâtiment et de ses composants.
	112	MG02	Plan de projet	Document détaillé décrivant les étapes et les mesures qui seront prises tout au long du processus de construction pour parvenir à une conception et à une exploitation durable du bâtiment.
	113	MG03	Planification de la durée de vie	Processus de planification de la performance à long terme, de la maintenance et du remplacement des composants et des systèmes du bâtiment afin de s'assurer que la conception et l'exploitation du bâtiment restent durables tout au long de son cycle de vie.
	114	MG04	Pratique de construction responsable	Ensemble de pratiques éthiques, environnementales et sociales visant à minimiser l'impact négatif des activités de construction sur l'environnement, la société et l'économie.
	115	MG05	Mise en service de bâtiment	Amélioration de la livraison du projet en évaluant et en documentant si l'installation, les systèmes et/ou les assemblages sont planifiés, conçus, installés, testés et peuvent être exploités et entretenus conformément aux exigences du projet du maître d'ouvrage.

Tableau A II.1 Descriptions des indicateurs de la MCD (suite)

Catégorie	NO	Code	Indicateurs	Description
	116	MG06	Service d'après livraison	Surveillance, entretien et gestion continu d'un bâtiment ou d'une infrastructure après son achèvement et sa remise au propriétaire ou à l'opérateur.
	117	MG07	Transfert	Veiller à ce que le bâtiment atteigne ses objectifs de durabilité au cours du processus de transfert d'un bâtiment ou d'un projet d'infrastructure achevé de l'équipe de construction au propriétaire ou à l'exploitant.
	118	MG08	Phase d'attribution des contrats / Appels d'offres	Considérer le développement durable comme un facteur d'évaluation des propositions et de choix de l'offre gagnante lors de la phase d'attribution des contrats/appels d'offres.
	119	MG09	Documentation	Désigne les enregistrements écrits et/ou électroniques, les rapports et autres documents utilisés pour démontrer la conformité aux normes et exigences de durabilité. Ils doivent être complets, précis, à jour et facilement accessibles aux parties prenantes, telles que les exploitants de bâtiments, les occupants et les évaluateurs de certification.
	120	MG10	Leadership et engagement efficaces	Évaluer le niveau de leadership et d'engagement envers les objectifs de développement durable en évaluant les engagements et les politiques de développement durable du maître d'œuvre et de l'équipe du projet.
	121	MG11	Travail d'équipe et collaboration	L'étendue de la collaboration entre différentes disciplines et sa contribution à l'amélioration des performances en matière de développement durable.
	122	MG12	Implication des parties prenantes	Mise en œuvre de programmes complets visant à identifier les parties prenantes, à établir une communication précoce et cohérente avec elles et à les impliquer dans le processus décisionnel du projet afin de favoriser une participation significative.
	123	MG13	Plan pour la fin de vie	Encourager l'équipe de projet à prendre en compte les coûts et les impacts de la fin de vie, et à prolonger la durée de vie utile du projet. Il s'agit également de réduire les coûts de fin de vie en concevant des projets qui augmentent leur valeur et celle de leurs composants, par exemple par le désassemblage, le recyclage ou la réutilisation.
	124	MG14	Guide de l'utilisateur du bâtiment / Formation	Ensemble d'instructions et d'informations fournies aux occupants d'un bâtiment pour les aider à l'exploiter de manière efficace et durable.
	125	MG15	Comptage et surveillance / Gestion numérique des installations	Utilisation de la technologie numérique et des logiciels pour gérer et optimiser les opérations, la maintenance et les performances des bâtiments. Cela comprend divers outils numériques tels que les systèmes d'automatisation des bâtiments, les systèmes de gestion de l'énergie, les logiciels de gestion des installations assistée par ordinateur (CAFM), etc.
	126	MG16	Gestion des risques	Développer des stratégies et des plans pour atténuer ou éviter les risques potentiels et assurer la durabilité à long terme du bâtiment ou du projet de développement.
	127	MG17	Plan de maintenance programmée	Élaboration d'un plan global pour la maintenance et l'entretien réguliers des systèmes et composants du bâtiment.
	128	MG18	Assurance qualité	Mesures organisationnelles et techniques visant à garantir la qualité de la conception et de l'exécution conformément aux spécifications. L'assurance qualité englobe la planification de la qualité (sélection des caractéristiques de qualité d'un produit), la gestion de la qualité (spécification des exigences d'exécution prévues, suivi et ajustement si nécessaire) et le contrôle de la qualité.

Tableau A II.1 Descriptions des indicateurs de la MCD (suite)

Catégorie	NO	Code	Indicateurs	Description
	129	MG19	Analyse des investissements immobiliers	Intégration des considérations relatives à la gestion de l'énergie des bâtiments dans l'analyse des investissements immobiliers et la stratégie opérationnelle. En d'autres termes, il s'agit de la manière dont l'analyse de l'utilisation et de l'efficacité énergétique des bâtiments est prise en compte lors de la prise de décision concernant l'investissement dans un bien immobilier et l'élaboration d'un plan opérationnel pour la gestion de ce bien.
Confort des occupants	130	OC01	Confort visuel	Disponibilité et qualité de la lumière, évaluées sur la base des systèmes d'éclairage artificiel et de la quantité de lumière naturelle qui pénètre dans le bâtiment.
	131	OC02	Confort thermique	Condition de l'environnement intérieur d'un bâtiment qui est confortable pour les occupants du bâtiment en termes de température, d'humidité, de vitesse de l'air, etc.
	132	OC03	Confort Acoustique	Conception et mise en œuvre de mesures visant à réduire les bruits indésirables et à améliorer la qualité sonore à l'intérieur d'un bâtiment, créant ainsi un environnement confortable pour les occupants.
	133	OC04	Confort olfactif	Se réfère à la qualité de l'air intérieur d'un bâtiment et à l'absence d'odeurs désagréables ou nocives, ainsi qu'à la présence de senteurs agréables et saines.
	134	OC05	Espace privé	Attribution d'un espace qui n'est accessible qu'aux occupants d'une maison individuelle et qui est accessible directement depuis la maison, dans le but de donner un sentiment d'intimité et de sécurité.
	135	OC06	Sécurité du bâtiment	Protection du bâtiment et de ses occupants contre les accès non autorisés, les cambriolages, le vandalisme et autres risques de sécurité.
	136	OC07	Qualité d'usage	Évaluation de la manière dont la conception et la fonctionnalité d'un bâtiment répondent aux besoins de ses occupants en termes de facteurs tels que la qualité de l'air intérieur, l'éclairage, l'acoustique, le confort thermique et l'aménagement de l'espace.
	137	OC08	Influence de l'utilisateur / Technologies d'interface	prise en compte de l'impact que les occupants d'un bâtiment peuvent avoir sur sa performance en matière de durabilité. Elle comprend des facteurs tels que le comportement des utilisateurs, les pratiques d'entretien et la satisfaction des utilisateurs.
	138	OC09	Contrôle de la fumée de tabac	Mesures prises pour prévenir ou minimiser l'exposition des occupants d'un bâtiment, des surfaces intérieures et des systèmes de distribution d'air de ventilation à la fumée de tabac ambiant, également connue sous le nom de fumée secondaire.
	139	OC10	Surveillance et gestion de l'air	Processus de mesure et d'analyse de la qualité de l'air intérieur pour s'assurer qu'il est sain et sans danger pour les occupants.
	140	OC11	Amélioration de la qualité de vie	La qualité de vie fait référence à l'impact d'un bâtiment sur la santé et le bien-être de la communauté. Elle permet d'évaluer si les bâtiments s'alignent sur les objectifs de la communauté, s'ils sont intégrés dans les réseaux communautaires existants et s'ils bénéficieront à la communauté à long terme.
	141	OC12	Priorité régionale/locale	Répondre aux priorités spécifiques en matière d'environnement, d'équité sociale et de santé publique qui sont géographiquement spécifiques à l'emplacement du projet. Ces priorités sont déterminées par la communauté locale de la construction dans chaque région.
	142	OC13	Accès à la nature	Disponibilité et intégration d'éléments et d'environnements naturels dans la conception du bâtiment et le paysage environnant, offrant aux occupants du bâtiment des connexions visuelles, auditives et/ou tactiles avec la nature.

Tableau A II.1 Descriptions des indicateurs de la MCD (suite)

Catégorie	NO	Code	Indicateurs	Description
	143	OC14	Ameublement	Évaluation des matériaux et des composants utilisés pour équiper les espaces intérieurs d'un bâtiment, tels que le mobilier, les tissus et les finitions. Cela inclut des facteurs tels que l'utilisation de matériaux à faibles émissions, l'utilisation de matériaux recyclés ou rapidement renouvelables, et la réduction des déchets générés lors de la fabrication et de l'installation du mobilier.
Santé et sécurité des occupants	144	HS01	Taux d'incidents enregistrables	Mesure du nombre de blessures et de maladies liées au travail qui surviennent sur un lieu de travail, y compris les incidents tels que les traitements médicaux, les arrêts de travail et les cas de restriction de travail.
	145	HS02	Taux de mortalité	Nombre de décès survenus sur un chantier de construction ou dans un bâtiment.
	146	HS03	Taux de fréquence des quasi-accidents	Nombre d'incidents qui ont failli entraîner des blessures ou des dommages mais qui ont été évités à temps dans un bâtiment ou sur un chantier de construction. Cette mesure est utilisée pour évaluer l'efficacité des mesures de sécurité et des pratiques de gestion des risques dans un bâtiment ou un projet déconstruction.
	147	HS04	Cas déclarés de silicose	Mesures visant à prévenir la production et l'inhalation de poussières de silice (qui peuvent provoquer une maladie pulmonaire professionnelle connue sous le nom de silicose), telles que l'utilisation de mesures d'ingénierie (par exemple, le mouillage des matériaux) et d'équipements de protection individuelle (par exemple, des respirateurs).
	148	HS05	Confinement sûr dans les laboratoires	Évaluation des mesures prises pour empêcher la libération de matières dangereuses et pour assurer la sécurité des occupants et de l'environnement dans les laboratoires.
	149	HS06	Gestion des produits chimiques dangereux	Ensemble de procédures, de protocoles et de pratiques mis en place pour garantir que les travailleurs du secteur de la construction sont protégés contre l'exposition à des produits chimiques dangereux susceptibles de nuire à leur santé.
	150	HS07	Système de mesure de la sécurité pour la conduite	Se réfère à un système conçu pour évaluer et contrôler les performances en matière de sécurité des conducteurs qui utilisent des véhicules dans le secteur de la construction.
	151	HS08	Mesure des accidents de la route	Se réfère au processus de collecte et d'analyse des données sur les accidents de la route qui se produisent dans le secteur de la construction. Ces données peuvent être utilisées pour identifier les tendances, les modèles et les facteurs de risque associés aux accidents de la route, ainsi que pour informer le développement d'interventions et de politiques visant à réduire le risque d'accidents futurs.
	152	HS09	Rayonnements ionisants, santé humaine	Mesures de sécurité appropriées pour protéger les travailleurs contre les rayonnements ionisants (principalement U235). Cela peut inclure le port de vêtements et d'équipements de protection, la surveillance des niveaux de rayonnement et le respect des procédures appropriées de manipulation et d'élimination des matières radioactives.
	153	HS10	Participation des travailleurs à la santé et à la sécurité au travail	Encourager les travailleurs et leur donner la possibilité de contribuer à l'identification, à l'évaluation et au contrôle des dangers et des risques en matière de santé et de sécurité au travail.
	154	HS11	Formation des travailleurs à la santé et à la sécurité au travail	Processus d'éducation et de formation des travailleurs aux dangers et risques potentiels liés à leur travail dans l'industrie de la construction.

Tableau A II.1 Descriptions des indicateurs de la MCD (suite)

Catégorie	NO	Code	Indicateurs	Description
	155	HS12	Amélioration de la santé publique et de la sécurité	Actions entreprises pour améliorer la sécurité et promouvoir les avantages pour la santé sur le chantier de construction, dans les zones avoisinantes et dans l'ensemble de la population, de manière équitable et impartiale.
Conception	156	DS01	Efficacité de l'espace	L'efficacité de l'espace fait référence à l'utilisation efficace de la surface au sol dans un bâtiment, qui peut être améliorée en optimisant la distribution de l'espace afin de réduire les coûts de construction et d'exploitation, ainsi que de minimiser l'impact environnemental du bien.
	157	DS02	Stratégies de conception du projet	Réfère à la préservation ou à l'intégration des caractéristiques naturelles du site dans la conception du projet, à la prise en compte de la culture du bâtiment et à la protection des biens culturels, ainsi qu'à l'utilisation de principes et de stratégies durables dans la conception et la construction afin d'atteindre les buts et objectifs de durabilité.
	158	DS03	Fonctionnalité	Se réfère à la performance physique des espaces intérieurs, y compris la facilité de mouvement, le confort et la disponibilité de commodités telles que l'équipement informatique et l'espace de rafraîchissement. Elle est évaluée à l'aide d'indices de substitution tels que la surface au sol par occupant, la hauteur de plafond et les considérations relatives à l'entretien, plutôt qu'à l'aide de mesures quantitatives directes.
	159	DS04	Adaptabilité	Capacité d'un bâtiment à être modifié ou adapté au cours de son cycle de vie afin de maintenir sa capacité d'utilisation, de prolonger sa période d'utilisation économique ou de s'adapter à l'évolution des besoins ou des conditions des utilisateurs.
	160	DS05	Désassemblage	Se réfère à la facilité et à la faisabilité du démantèlement d'un bâtiment ou de ses composants à la fin de sa vie utile en vue de sa réutilisation, de son recyclage ou de son élimination en toute sécurité.
	161	DS06	Résistance aux tremblements de terre	Capacité à s'adapter et/ou à se remettre rapidement d'une perturbation importante, principalement due à un tremblement de terre.
	162	DS07	Cote de charge du plancher	Le poids maximal qu'un plancher est conçu et construit pour supporter, sans subir de dommages ou de défaillances significatifs, garantit que le plancher est sûr et stable pour les occupants et l'équipement.
	163	DS08	Utilisation conjointe d'installations	Partage d'installations et d'infrastructures entre différentes organisations ou parties prenantes, telles que des immeubles de bureaux, des écoles et des centres communautaires, pouvant impliquer le partage de parkings, d'espaces ouverts ou d'autres commodités.
	164	DS09	Sécurité incendie	Intégration intentionnelle et systématique de mesures et de caractéristiques de sécurité incendie dans la conception et la construction d'un bâtiment.
	165	DS10	Conception inclusive	Approche de la conception de produits, d'environnements, de programmes et de services pouvant être utilisés par le plus grand nombre de personnes possible, indépendamment de leur âge, de leur taille, de leurs capacités ou de leur handicap, sans nécessiter d'adaptations spéciales ou de conception spécialisée.
	166	DS11	Bureau à domicile	Attribution d'un espace de travail désigné à l'intérieur d'un domicile qui est utilisé pour le travail ou à des fins professionnelles afin de réduire le besoin de déplacements et d'espaces de bureau séparés.
	167	DS12	Conception de l'interface entre la nature et la ville	Se réfère à la conception des bâtiments et des paysages dans les zones où les zones sauvages et les zones urbaines se rencontrent, afin de réduire le risque d'incendies de forêt et d'autres catastrophes naturelles. Certaines stratégies comprennent l'utilisation de matériaux de couverture résistants au feu, la

Tableau A II.1 Descriptions des indicateurs de la MCD (suite)

Catégorie	NO	Code	Indicateurs	Description
				création de coupe-feu autour du bâtiment et le maintien d'une distance de sécurité entre les bâtiments et les zones sauvages.
	168	DS13	Préserver les ressources historiques et culturelles	Évaluer les mesures prises pour identifier, préserver ou restaurer les sites historiques et culturels importants et les ressources connexes, notamment en développant une approche sensible de la conception.
	169	DS14	Améliorer les espaces publics et les équipements	Créer des espaces plus agréables à vivre et plus fonctionnels pour le public tout en promouvant la durabilité et la résilience. Cette mesure peut comprendre des actions telles que l'ajout d'oeuvres d'art public, la plantation d'arbres ou l'intégration d'éléments de conception durables tels que des jardins de pluie ou des toits verts.
	170	DS15	Urbanisme et conception	Elaboration de rapports d'évaluation proactive de la conception des sites qui intègrent les mesures durables des plans d'urbanisme, telles que la promotion des transports actifs, l'utilisation d'énergies renouvelables et la préservation des espaces verts.
Social et économique	171	SE01	Viability commerciale	Se réfère à la faisabilité économique d'un bâtiment ou d'un projet de développement. Elle prend en considération des facteurs tels que les coûts de construction, les coûts d'entretien et les flux de revenus potentiels afin de garantir la viabilité financière du projet à long terme.
	172	SE02	Accès universel / Accès équitable	Assurer un accès équitable et une protection contre les impacts négatifs résultant du développement d'un projet de construction pour tous les individus, indépendamment de leur origine, de leur sexe, de leur classe socio-économique ou de leur capacité physique.
	173	SE03	Discrimination au travail	Traitements équitables et égal de toutes les personnes participant à un projet de construction, y compris le recrutement, la formation, la promotion et la rémunération, indépendamment de leur race, de leur sexe, de leur apparence ethnique, de leur religion, de leur orientation sexuelle ou de leur handicap.
	174	SE04	Politiques en matière de droits de l'humain	Politiques et mesures mises en œuvre pour garantir que la construction, l'exploitation et l'entretien d'un bâtiment n'enfreignent pas les droits de l'homme d'une personne ou d'un groupe. Cela inclut des pratiques de travail équitables, des politiques de non-discrimination, la protection des droits des travailleurs, le respect des droits des populations autochtones et l'interdiction du travail forcé et du travail des enfants.
	175	SE05	Engagement communautaire	Impliquer activement et responsabiliser les communautés locales dans les processus de planification, de conception et de prise de décision des projets de développement durable. Il s'agit notamment de créer des possibilités de dialogue et de collaboration avec diverses parties prenantes, d'intégrer les connaissances et l'expertise locales et de favoriser un sentiment d'appropriation et de responsabilité à l'égard du projet au sein de la communauté.
	176	SE06	Plan pour les arts et la culture	Préservation du patrimoine culturel et soutien au développement des industries créatives locales en promouvant l'intégration des arts, de la culture et du patrimoine dans les projets de développement durable.
	177	SE07	Améliorer les compétences des employés (Éducation et Formation)	Effort de l'entreprise pour fournir des opportunités de formation et de développement afin d'améliorer les connaissances, les compétences et les capacités de ses employés, dans le but d'améliorer leurs performances, leur productivité et leur satisfaction au travail.

Tableau A II.1 Descriptions des indicateurs de la MCD (suite)

Catégorie	NO	Code	Indicateurs	Description
	178	SE08	Pratiques commerciales et contractuelles équitables	Se réfère à la fourniture équitable et impartiale d'informations sur les produits et services liés à la construction. Cela comprend les informations sur les matériaux, les technologies et les méthodes utilisées dans le processus de construction, ainsi que leurs impacts sociaux, économiques et environnementaux.
	179	SE09	Protection des données des consommateurs et de la vie privée	Veiller à ce que toute information personnellement identifiable collectée auprès des clients ne soit utilisée qu'à des fins légitimes et soit protégée contre tout accès ou toute divulgation non autorisée. Cela peut inclure la mise en œuvre de mesures telles que le cryptage, les contrôles d'accès et les procédures de sauvegarde des données.
	180	SE10	Accès aux services essentiels	Garantir aux individus un accès fiable et équitable aux services publics de base tels que l'électricité, le gaz, l'eau, les services d'assainissement, le drainage, les eaux usées et la communication.
	181	SE11	Travail des enfants	Éliminer et prévenir tout travail ou activité économique que les enfants n'ayant pas atteint l'âge minimum légal (tel que défini par la législation nationale) sont contraints d'effectuer et qui les prive de leur enfance, de leur potentiel et de leur dignité, et qui est préjudiciable à leur développement physique et mental.
	182	SE12	Travail forcé ou obligatoire	Tout travail ou service exigé d'une personne sous la menace d'une peine quelconque et pour lequel ladite personne ne s'est pas offerte volontairement.
	183	SE13	Valeur économique directe	Valeur monétaire et non monétaire générée par un projet de construction. Il peut s'agir de revenus générés par la vente ou la location de biens immobiliers, ainsi que de bénéfices provenant de la fourniture de services de construction.
	184	SE14	Impacts économiques indirects	Avantages économiques et impacts d'un projet de construction sur les fournisseurs et prestataires de services locaux, tels que l'achat de matériaux ou l'embauche d'entrepreneurs, ainsi que les avantages économiques pour la communauté locale résultant de l'augmentation de l'emploi et des recettes fiscales.
	185	SE15	Aide financière	Se réfère aux aides, subventions, crédits d'impôt ou autres formes de soutien financier fournis par les gouvernements ou d'autres organisations pour encourager certaines actions, telles que l'utilisation de pratiques de construction durable ou la préservation des bâtiments historiques.
	186	SE16	Transparence	Mesure dans laquelle une entreprise fournit des informations claires, précises et opportunes sur ses activités commerciales, ses résultats financiers et ses risques.
	187	SE17	Activités de lutte contre la corruption	Mesures prises par l'organisation pour prévenir et combattre toute pratique de corruption, telle que les pots-de-vin, la fraude, la collusion, le détournement de fonds et le blanchiment d'argent. Ces activités comprennent la mise en place et l'application d'un code de conduite, des évaluations régulières des risques et une diligence raisonnable, un suivi, etc.
	188	SE18	Thèmes fiscaux	Respecter la législation fiscale et répondre aux attentes des parties prenantes en matière de bonnes pratiques fiscales, notamment en ce qui concerne l'impôt sur le revenu, l'impôt foncier, l'impôt sur les ventes, la taxe sur la valeur ajoutée (TVA), les droits de douane et les autres impôts et taxes.
	189	SE19	Sujets liés à l'emploi	Approche de l'organisation en matière d'embauche, de recrutement, de fidélisation et de pratiques connexes, ainsi que les conditions de travail qu'elle offre à ses employés.

ANNEXE III

CLASSEMENT DES INDICATEURS EN FONCTION DE LEUR SCORE D'ACCORD PONDÉRÉ

Tableau A III.1 Classement des indicateurs en fonction de leur score d'accord pondéré

Classement	Code	Nom de l'indicateur	Score d'accord pondéré
1	DS 01	Efficacité de l'espace	0.32
2	DS 02	Stratégies de conception du projet	0.31
3	DS 15	Urbanisme et conception	0.3
4	DS 03	Fonctionnalité	0.3
5	EN 05	Quantification de l'énergie	0.3
6	MG 12	Implication des parties prenantes	0.3
7	SE 12	Travail forcé ou obligatoire	0.29
8	DS 07	Cote de charge du plancher	0.28
9	OC 10	Surveillance et gestion de l'air	0.28
10	EM 07	Qualité de l'air intérieur	0.27
11	EM 05	Polluants atmosphériques dangereux (PAD)	0.27
12	WS 02	Gestion des déchets de démolition	0.27
13	EN 06	Isolation	0.27
14	MB 03	Politique de covoiturage	0.27
15	SE 11	Travail des enfants	0.27
16	LU 02	Prévention de la pollution liée à la construction	0.26
17	MG 02	Plan de projet	0.26
18	EN 13	Sous-comptage pour les locataires	0.26
19	DS 14	Améliorer les espaces publics et les équipements	0.26
20	DS 06	Résistance aux tremblements de terre	0.25
21	EM 02	Matières particulières	0.25
22	EN 17	Gestion du carburant des véhicules	0.25
23	EN 20	Énergie exportée	0.25
24	DS 05	Désassemblage	0.25
25	EM 01	Émissions de NOx/SOx	0.25
26	MT 02	Approvisionnement responsable en matériaux	0.25
27	SE 19	Sujets liés à l'emploi	0.25
28	EM 03	Composés organiques volatils (COV)	0.25
29	EM 06	Ventilation	0.25
30	EN 12	Économie d'énergie/ réduction	0.24
31	EC 03	Superficies terrestres perturbées	0.24
32	MT 03	Conception pour la durabilité	0.24
33	SE 03	Discrimination au travail	0.24
34	SE 17	Activités de lutte contre la corruption	0.24
35	WS 01	Gestion des déchets de construction	0.24
36	SE 04	Politiques en matière de droits de l'humain	0.23
37	MG 05	Mise en service de bâtiment	0.23

Tableau A III.1 Classement des indicateurs en fonction de leur score d'accord pondéré (suite)

Classement	Code	Nom de l'indicateur	Score d'accord pondéré
38	MG 08	Phase d'attribution des contrats/appels d'offres	0.23
39	MB 09	Développement avec accès aux transports	0.22
40	MG 15	Comptage et surveillance/Gestion numérique des installations	0.22
41	SE 15	Aide financière	0.22
42	SE 18	Thèmes fiscaux	0.22
43	DS 11	Bureau à domicile	0.22
44	EN 04	Surveillance énergétique	0.22
45	EN 02	Réponse flexible à la demande	0.22
46	EN 10	Mise en service améliorée	0.22
47	MG 11	Travail d'équipe et collaboration	0.22
48	EN 08	Étanchéité de l'enveloppe du bâtiment / Pont thermique	0.22
49	MB 05	Plan de déplacement	0.22
50	MG 06	Service d'après livraison	0.21
51	MG 19	Analyse des investissements immobiliers	0.21
52	MB 08	Promotion des déplacements à pied	0.21
53	MG 09	Documentation	0.21
54	DS 12	Conception de l'interface entre la nature et la ville	0.2
55	DS 13	Préserver les ressources historiques et culturelles	0.2
56	MT 17	Matériaux réutilisés	0.2
57	MT 13	Utilisation de matériaux alternatifs	0.2
58	OC 11	Amélioration de la qualité de vie	0.2
59	EM 04	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	0.2
60	MG 13	Plan pour la fin de vie	0.2
61	MG 17	Plan de maintenance programmée	0.2
62	SE 07	Améliorer les compétences des employés (Éducation et Formation)	0.2
63	DS 09	Sécurité incendie	0.2
64	MG 16	Gestion des risques	0.2
65	MT 11	Déclaration environnementale de produit (DEP)	0.2
66	MT 14	Préfabrication	0.2
67	MT 19	Évaluation des risques liés aux produits	0.2
68	EN 01	Demande en énergie primaire	0.19
69	EN 07	Prévisions de consommation	0.19
70	EN 11	Harmonisation du réseau	0.19
71	WS 03	Traitements des déchets organiques	0.19
72	OC 08	Influence de l'utilisateur / Technologies d'interface	0.19
73	EN 14	Densité de puissance / Intensité énergétique	0.19
74	LU 01	Sélection du site	0.19
75	MG 18	Assurance qualité	0.19
76	DS 04	Adaptabilité	0.19
77	MT 18	Matériaux recyclés	0.19
78	OC 02	Confort thermique	0.19
79	CL 05	Eutrophisation	0.18
80	LU 07	Réduction de la pollution lumineuse	0.18
81	LU 08	Protection des terres agricoles	0.18
82	MT 15	Matériaux forestiers durables/Bois	0.18
83	SE 06	Plan pour les arts et la culture	0.18
84	DS 10	Conception inclusive	0.18
85	EC 02	Amélioration/préservation de la biodiversité	0.18
86	EN 18	Génération de gaz de décharge	0.18
87	EN 19	Matériaux pour la récupération d'énergie	0.18
88	MB 06	Mobilité/transport alternatifs	0.18

Tableau A III.1 Classement des indicateurs en fonction de leur score d'accord pondéré (suite)

Classement	Code	Nom de l'indicateur	Score d'accord pondéré
89	MT 07	Extraction des ressources/Matériel régional	0.18
90	SE 02	Accès universel / Accès équitable	0.18
91	CL 06	Épuisement des ressources abiotiques	0.18
92	SE 16	Transparence	0.18
93	EN 03	Efficacité/performance énergétique	0.17
94	EN 09	Énergie renouvelable	0.17
95	LU 06	Réduction des îlots de chaleur	0.17
96	MG 07	Transfert	0.17
97	SE 09	Protection des données des consommateurs et de la vie privée	0.17
98	WT 03	Surveillance et comptage de l'eau	0.17
99	WT 04	Détection de fuite d'eau	0.17
100	MG 03	Planification de la durée de vie	0.17
101	MG 10	Leadership et engagement efficaces	0.17
102	MT 09	Recyclage facile	0.17
103	OC 12	Priorité régionale/locale	0.17
104	SE 05	Engagement communautaire	0.17
105	SE 10	Accès aux services essentiels	0.17
106	WS 06	Déchets en matériaux énergétiques	0.17
107	LU 05	Paysage / Espaces Verts	0.17
108	MG 14	Guide de l'utilisateur du bâtiment/formation	0.17
109	DS 08	Utilisation conjointe d'installations	0.16
110	LU 04	Plan du site	0.16
111	MG 01	Coûts du cycle de vie	0.16
112	MG 04	Pratique de construction responsable	0.16
113	MT 04	Conception pour la flexibilité	0.16
114	EN 15	Consommation d'énergie décentralisée	0.16
115	SE 14	Impacts économiques indirects	0.16
116	WS 04	Gestion des déchets recyclés	0.16
117	MT 01	Analyse du cycle de vie	0.16
118	MT 05	Efficacité des matériaux	0.16
119	MT 08	Nettoyage facile	0.16
120	MT 12	Utilisation de produits verts/produits à faibles émissions	0.16
121	SE 08	Pratiques commerciales et contractuelles équitables	0.16
122	OC 03	Confort Acoustique	0.15
123	OC 04	Confort olfactif	0.15
124	OC 13	Accès à la nature	0.15
125	EC 05	Habitats protégés ou restaurés	0.15
126	MB 07	Promotion de la bicyclette	0.15
127	MB 10	Impacts de la construction sur la mobilité	0.15
128	WS 05	Mesure des déchets incinérés	0.15
129	LU 03	Évaluation du site	0.15
130	CL 01	Réduction des émissions de gaz à effet de serre	0.15
131	EF 04	Système d'égouts	0.15
132	LU 10	Réhabiliter les friches industrielles et les terrains contaminés	0.15
133	MB 01	Accessibilité des transports publics	0.15
134	WT 01	Optimisation de la consommation d'eau	0.15
135	WT 05	Demande en eau	0.15
136	WT 09	Qualité de l'eau	0.15
137	LU 09	Protection des sols	0.14
138	LU 12	Image/Influence de l'emplacement	0.14
139	MT 10	Exclusion des substances nocives	0.14
140	OC 07	Qualité d'usage	0.14

Tableau A III.1 Classement des indicateurs en fonction de leur score d'accord pondéré (suite)

Classement	Code	Nom de l'indicateur	Score d'accord pondéré
141	OC 14	Ameublement	0.14
142	MT 16	Traçabilité	0.14
143	CL 04	Acidification du sol et de l'eau	0.14
144	MB 02	Capacité de stationnement	0.14
145	OC 05	Espace privé	0.14
146	OC 06	Sécurité du bâtiment	0.14
147	WS 07	Transport de déchets dangereux	0.14
148	WT 14	Additifs de l'eau	0.14
149	MB 04	Espace pour petites voitures	0.14
150	LU 14	Développement du site	0.13
151	MT 06	Résilience des matériaux	0.13
152	OC 01	Confort visuel	0.13
153	CL 03	Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP)	0.13
154	EC 04	Sites opérationnels dans ou à proximité d'une zone protégée	0.13
155	EF 05	Mesures correctives pour les rejets des décharges	0.13
156	HS 07	Système de mesure de la sécurité pour la conduite	0.13
157	HS 08	Mesure des accidents de la route	0.13
158	LU 13	Proximité aux services	0.13
159	SE 13	Valeur économique directe	0.13
160	WT 11	Système à deux réservoirs	0.13
161	OC 09	Contrôle de la fumée de tabac	0.12
162	EF 06	Déversements importants	0.12
163	EN 16	Sources alternatives non renouvelables	0.12
164	WT 06	Système d'irrigation	0.12
165	WT 07	Gestion des ressources en eau	0.12
166	EF 03	Eaux pluviales	0.12
167	EC 01	Amélioration de l'écologie du site	0.11
168	SE 01	Viabilité commerciale	0.11
169	EM 08	Installations de traitement des déchets à proximité de zones à forte densité de population	0.11
170	WT 13	Contaminants de l'eau	0.11
171	WT 02	Prélèvement d'eau	0.11
172	EF 01	Rejet d'eau	0.11
173	WT 08	Traitement de l'eau	0.11
174	LU 11	Risques liés à l'emplacement/aux dangers	0.1
175	HS 04	Cas déclarés de silicose	0.1
176	CL 02	Potentiel de création d'ozone photochimique	0.1
177	HS 02	Taux de mortalité	0.09
178	HS 03	Taux de fréquence des quasi-accidents	0.09
179	HS 05	Confinement sûr dans les laboratoires	0.09
180	HS 06	Gestion des produits chimiques dangereux	0.09
181	HS 10	Participation des travailleurs à la santé et à la sécurité au travail	0.09
182	HS 11	Formation des travailleurs à la santé et à la sécurité au travail	0.09
183	WT 10	Autosuffisance en eau	0.09
184	EF 02	Eau recyclée/récupérée	0.09
185	WT 12	Application intensive de l'eau	0.09
186	EF 07	Masses d'eau affectées par les rejets d'eau	0.09
187	HS 12	Amélioration de la santé publique et de la sécurité	0.08
188	HS 01	Taux d'incidents enregistrables	0.08
189	HS 09	Rayonnements ionisants, santé humaine	0.08

BIBLIOGRAPHIE

- Ahmad, T., & Thaheem, M. J. (2018). Economic sustainability assessment of residential buildings : A dedicated assessment framework and implications for BIM. *Sustainable Cities and Society*, 38, 476-491. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.035>
- Alamri, S., Usman, I., & Alvi, S. (2024). Agent Based Modelling in Digital Twins for Household Water Consumption Forecasting. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2024(1), 158-164. Scopus. <https://doi.org/10.15199/48.2024.01.33>
- Almutairi, A., Albagami, N., Almesned, S., Alrumayh, O., & Malik, H. (2023). A novel optimal framework for scheduling rooftop solar home appliances considering electricity, real pricing and user comfort. *Solar Energy*, 262. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.111876>
- Alreshidi, E., Mourshed, M., & Rezgui, Y. (2017). Factors for effective BIM governance. *Journal of Building Engineering*, 10, 89-101. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.02.006>
- Anwar, R. A. (2022). Enhancing the Integration of Sustainability Assessment Within Dynamic BIM Enabled Design Projects [Ph.D., University of Northumbria at Newcastle (United Kingdom)]. In *PQDT - Global* (2723854331). ProQuest Dissertations & Theses Global; ProQuest Dissertations & Theses Global Closed Collection. <https://www.proquest.com/dissertations-theses/enhancing-integration-sustainability-assessment/docview/2723854331/se-2?accountid=27231>
- ASHRAE, & USGBC. (2014). *Standard for the Design of High-Performance Green Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*. ASHRAE and U.S. Green Building Council.
- Azhar, S. (2011). Building Information Modeling (BIM) : Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. *Leadership and Management in Engineering*, 11(3), 241-252. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127)
- BCA. (2021). *BCA Green Mark 2021 (GM: 2021) Certification Standard*. Building and Construction Authority. <https://www.bca.gov.sg/feedbackform/>
- Begić, H., & Galić, M. (2021). A Systematic Review of Construction 4.0 in the Context of the BIM 4.0 Premise. *Buildings*, 11(8), 337. <https://doi.org/10.3390/buildings11080337>
- Bioregional. (2020). *One Planet Living*. Bioregional. www.bioregional.com/one-planet-living
- BNB. (2019). *Guideline for Sustainable Building : Future-proof Design, Construction and Operation of Buildings*. Federal Ministry of the Interior, Building and Community (BMI).

- Boschert, S., Heinrich, C., & Rosen, R. (2018). *Next Generation Digital Twin*.
- Brahmbhatt, P., Maheshwari, A., & Gudi, R. D. (2023). Digital twin assisted decision support system for quality regulation and leak localization task in large-scale water distribution networks. *Digital Chemical Engineering*, 9. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.dche.2023.100127>
- BRE. (2020). *BREEAM In-Use International Technical Manual : Residential*. BRE Global Limited.
- BRE. (2021). *NABERS, Guide to Design for Performance*. Building Research Establishment. www.bregroup.com/nabers-uk
- Bruckner, G., & Strohmeier, P. (2018). *Sustainable building certification schemes—A comparison* (Low Carbon Timber toolkit). CaSCo.
- BSL. (2021). *Building Environmental Assessment Method (BEAM) Plus New Buildings version 2.0*. BEAM Society Limited.
- BuildEXT. (2022, janvier 22). *What are the BIM dimensions?* <https://buildext.com/en/bim-dimensions/>
- Cavalliere, C., Dell'Osso, G. R., Favia, F., & Lovicario, M. (2019). BIM-based assessment metrics for the functional flexibility of building designs. *Automation in Construction*, 107. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102925>
- CEN. (2018). *Methodology for LCA of buildings using EN 15978:2011* (No. PN 326). European Committee for Standardization.
- CEN. (2020). *Product Category Rules For Type III Environmental Declaration Of Construction Products To EN 15804+A2*. (No. PN 514). European Committee for Standardization.
- Charef, R., Alaka, H., & Emmitt, S. (2018). Beyond the third dimension of BIM : A systematic review of literature and assessment of professional views. *Journal of Building Engineering*, 19, 242-257. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.04.028>
- Cheng, J. C. P., Kwok, H. H. L., Li, A. T. Y., Tong, J. C. K., & Lau, A. K. H. (2022). BIM-supported sensor placement optimization based on genetic algorithm for multi-zone thermal comfort and IAQ monitoring. *Building and Environment*, 216. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108997>
- Chuang, H. W., Lin, H. T., & Ho, M. C. (2011). The Eco-Community Evaluation System of Taiwan : An Introduction to EEWH-EC. *Applied Mechanics and Materials*, 71-78, 3466-3469. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.71-78.3466>

- Çimen, Ö. (2021). Construction and built environment in circular economy : A comprehensive literature review. *Journal of Cleaner Production*, 305, 127180. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127180>
- Cortez-Lara, P., & Sanchez, B. (2023). A Digital Integrated Methodology for Semi-Automated Analysis of Water Efficiency in Buildings †. *Buildings*, 13(12). Scopus. <https://doi.org/10.3390/buildings13122911>
- Costa, G., Arroyo, O., Rueda, P., & Briones, A. (2023). A ventilation early warning system (VEWS) for diaphanous workspaces considering COVID-19 and future pandemics scenarios. *Helijon*, 9(3). Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14640>
- D'Amico, A., Bergonzoni, G., Pini, A., & Currà, E. (2020). BIM for healthy buildings : An integrated approach of architectural design based on IAQ prediction. *Sustainability (Switzerland)*, 12(24), 1-31. Scopus. <https://doi.org/10.3390/su122410417>
- De Sordi, J. O. (2021). *Design Science Research Methodology : Theory Development from Artifacts*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-82156-2>
- Deng, M., Menassa, C. C., & Kamat, V. R. (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, 58-83. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.005>
- DGNB. (2020). *DGNB System – New buildings criteria set*. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (German Sustainable Building Council).
- Djebali, S., Guerard, G., & Taleb, I. (2024). Survey and insights on digital twins design and smart grid's applications. *Future Generation Computer Systems*, 153, 234-248. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.future.2023.11.033>
- Dodd, N., Donatello, S., & Cordella, M. (2021). *Level(s) – A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings : User Manual 1 : Introduction to the Level(s) common*.
- Duarte Pinheiro, M. (2019). *LiderA Voluntary System for the Sustainability of Built Environments*. Technical University of Lisbon.
- Duque, R., Bravo, C., Bringas, S., & Postigo, D. (2024). Leveraging a visual language for the awareness-based design of interaction requirements in digital twins. *Future Generation Computer Systems*, 153, 41-51. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.future.2023.11.018>
- Énoncé de politique des trois conseils : Éthique de la recherche avec des êtres humains.* (2022). Secrétariat sur la conduite responsable de la recherche.

- ENVISION. (2018). *Envision : Sustainable Infrastructure Framework Guidance Manual*. Institute for Sustainable Infrastructure. www.sustainableinfrastructure.org
- Faltejsek, M., Szeligova, N., & Vojvodikova, B. (2018). Application of building information modelling in planning of future use of underused areas. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Municipal Engineer*, 171(4), 206-215. Scopus. <https://doi.org/10.1680/jmuen.17.00038>
- Fergus, P., Chalmers, C., Longmore, S., Wich, S., Warmenhove, C., Swart, J., Ngongwane, T., Burger, A., Ledgard, J., & Meijaard, E. (2023). Empowering Wildlife Guardians : An Equitable Digital Stewardship and Reward System for Biodiversity Conservation Using Deep Learning and 3/4G Camera Traps. *Remote Sensing*, 15(11). Scopus. <https://doi.org/10.3390/rs15112730>
- Francisco, A., Mohammadi, N., & Taylor, J. E. (2020). Smart City Digital Twin-Enabled Energy Management: Toward Real-Time Urban Building Energy Benchmarking. *Journal of Management in Engineering*, 36(2). Scopus. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000741](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000741)
- Frommweiler, C., & Poirier, E. (2023). Facilitating the building commissioning process using building information modeling : An action-research project. *Engineering, Construction and Architectural Management*. Scopus. <https://doi.org/10.1108/ECAM-05-2022-0394>
- Ganiyu, S., & Egbu, C. (2018). *DEVELOPING A BIM-KNOWLEDGE (BIM-K) FRAMEWORK FOR IMPROVED DECISION MAKING IN CONSTRUCTION PROJECTS: A SEQUENTIAL EXPLORATORY APPROACH*.
- Gao, Y., Wang, J., & Yiu, T. W. (2024). Multi-information integration-based life cycle analysis of greenhouse gas emissions for prefabricated construction : A case study of Shenzhen. *Environmental Impact Assessment Review*, 104. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107330>
- GBC. (2020). *Green Star Performance—Summary of Categories and Credits*. Green Building Council of Australia.
- GBC Italia. (2016). *GBC Historic Building®—2016 Edition*. Green Building Council Italia. www.gbcitalia.org
- GBI. (2021). *Green Globe for New Construction*. Green Building Initiative, Inc.
- GhaffarianHoseini, A., Zhang, T., Nwadigo, O., GhaffarianHoseini, A., Naismith, N., Tookey, J., & Raahemifar, K. (2017). Application of nD BIM Integrated Knowledge-based Building Management System (BIM-IKBMS) for inspecting post-construction energy efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 935-949. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.061>

- Giama, E., & Papadopoulos, A. M. (2012). Sustainable building management : Overview of certification schemes and standards. *Advances in Building Energy Research*, 6(2), 242-258. <https://doi.org/10.1080/17512549.2012.740905>
- GRI. (2018a). *GRI 201 : Economic Performance 2016*. Global Reporting Initiative.
- GRI. (2018b). *GRI 301 : Materials 2016*. Global Reporting Initiative.
- GRI. (2018c). *GRI 401 : Employment 2016*. Global Reporting Initiative.
- GRI. (2023). *GRI 1 : Foundation 2021*. Global Reporting Initiative.
- GRIHA. (2021). *GRIHA V.2019 : Introduction to National Rating System*. GRIHA Council and The Energy and Resources Institute (TERI).
- Gugerli, H., Lenel, S., Sintzel, B., Ganz, R., & Huber, M. (avec Geissler, A., Konferenz Kantonaler Energiedirektoren, & Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik FHNW). (2015). *Gesund und ökologisch bauen mit Minergie-Eco*. Faktor Verlag.
- Guo, D., Onstein, E., & Rosa, A. D. L. (2021). A Semantic Approach for Automated Rule Compliance Checking in Construction Industry. *IEEE Access*, 9, 129648-129660. Scopus. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3108226>
- Habib, H. M., & Kadhim R., E. (2020). Employ 6D-BIM Model Features for Buildings Sustainability Assessment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 901(1), 012021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/901/1/012021>
- Ham, Y., & Kim, J. (2020). Participatory Sensing and Digital Twin City : Updating Virtual City Models for Enhanced Risk-Informed Decision-Making. *Journal of Management in Engineering*, 36(3). Scopus. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000748](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000748)
- Han, D., Kalantari, M., & Rajabifard, A. (2024). The development of an integrated BIM-based visual demolition waste management planning system for sustainability-oriented decision-making. *Journal of Environmental Management*, 351. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119856>
- Harode, A., Thabet, W., & Dulaney, M. B. (2023). *Digital twin in healthcare facilities : Linking real-time air quality data to BIM*. 188-195. Scopus. <https://doi.org/10.1201/9781003354222-24>
- Heeringa, S., West, B. T., & Berglund, P. A. (2017). *Applied survey data analysis* (Second edition). CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Heinrich, M., & Lang, W. (2019). *Materials passports—Best practice*.

- Hire, S., Sandbhor, S., & Ruikar, K. (2022). Bibliometric Survey for Adoption of Building Information Modeling (BIM) in Construction Industry—A Safety Perspective. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(1), 679-693. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09584-9>
- Hosamo, H. H., Nielsen, H. K., Kraniotis, D., Svennevig, P. R., & Svidt, K. (2023). Improving building occupant comfort through a digital twin approach : A Bayesian network model and predictive maintenance method. *Energy and Buildings*, 288. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112992>
- Hou, F., Ma, J., Kwok, H. H. L., & Cheng, J. C. P. (2022). Prediction and optimization of thermal comfort, IAQ and energy consumption of typical air-conditioned rooms based on a hybrid prediction model. *Building and Environment*, 225. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109576>
- Hsieh, H.-F., & Shannon, S. E. (2005). Three Approaches to Qualitative Content Analysis. *Qualitative Health Research*, 15(9), 1277-1288. <https://doi.org/10.1177/1049732305276687>
- IBEC. (2014). *CASBEE for building (New Construction)—Technical manual*. Institute for Building Environment and Energy Conservation. <http://www.ibec.or.jp/CASBEE/>
- IEA. (2023). *CO2 Emissions in 2022*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
- IGBC. (2014). *IGBC green new building rating system*. Indian Green Building Council. www.igbc.in
- ISO. (2006a). *ISO 14040 : Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*. (Standard No. ISO 14040:2006). International Organization for Standardization.
- ISO. (2006b). *ISO 14044 : Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines*. (Standard No. ISO 14044:2006). International Organization for Standardization.
- ISO. (2007). *ISO 21930 : Sustainability in building construction—Environmental declaration of building products*. (Standard No. ISO 21930:2007). International Organization for Standardization.
- ISO. (2010). *ISO 26000 : Guidance on social responsibility*. (Standard No. ISO 26000:2010). International Organization for Standardization.
- ISO. (2011). *ISO 21929-1 : Sustainability in building construction—Sustainability indicators—Part 1 : Framework for the development of indicators and a core set of indicators for buildings*. (Standard No. ISO 21929-1:2011). International Organization for Standardization.

- ISO. (2015). *ISO 14001 : Environmental management systems—Requirements with guidance for use.* (Standard No. ISO 14001:2015). International Organization for Standardization.
- ISO. (2016). *ISO 37101 : Sustainable development in communities—Management system for sustainable development—Requirements with guidance for use.* (Standard No. ISO 37101:2016). International Organization for Standardization.
- ISO. (2018a). *ISO 37120 : Sustainable cities and communities—Indicators for city services and quality of life.* (Standard No. ISO 37120:2018). International Organization for Standardization.
- ISO. (2018b). *ISO 45001 : Occupational health and safety management systems—Requirements with guidance for use.* (Standard No. ISO 45001:2018). International Organization for Standardization.
- ISO. (2019a). *ISO 14090 : Adaptation to climate change—Principles, requirements and guidelines.* (Standard No. ISO 14090:2019). International Organization for Standardization.
- ISO. (2019b). *ISO 15392 : Sustainability in buildings and civil engineering works—General principles.* (Standard No. ISO 15392:2019). International Organization for Standardization.
- ISO. (2020). *ISO 20887 : Sustainability in buildings and civil engineering works—Design for disassembly and adaptability—Principles, requirements and guidance.* (Standard No. ISO 20887:2020). International Organization for Standardization.
- IWBI. (2016). *WELL Building Standard® v1* (p. New York, NY). International WELL Building Institute.
- Jaberi, M., & Poirier, E. (2024). Mind the Gap : An Evaluation of Indicator Discrepancies between Sustainability Standards and Certifications in the Built Asset Industry. *European Journal of Sustainable Development*, 13(2), 141. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2024.v13n2p141>
- Jalaei, F., Guest, G., Gaur, A., & Zhang, J. (2020). Exploring the effects that a non-stationary climate and dynamic electricity grid mix has on whole building life cycle assessment : A multi-city comparison. *Sustainable Cities and Society*, 61. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102294>
- Jalaei, F., & Jrade, A. (2015). Integrating building information modeling (BIM) and LEED system at the conceptual design stage of sustainable buildings. *Sustainable Cities and Society*, 18, 95-107. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.06.007>
- Keeble, B. R. (1988). The Brundtland report : ‘Our common future’. *Medicine and War*, 4(1), 17-25. <https://doi.org/10.1080/07488008808408783>

- Khajavi, S. H., Motlagh, N. H., Jaribion, A., Werner, L. C., & Holmstrom, J. (2019). Digital Twin : Vision, Benefits, Boundaries, and Creation for Buildings. *IEEE Access*, 7, 147406-147419. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2946515>
- Khondoker, M. T. H., Hossain, M. M., & Saha, A. (2024). 4D BIM integrated optimization of construction steel bar procurement plan for limited storage capacity. *Construction Innovation*. Scopus. <https://doi.org/10.1108/CI-12-2022-0310>
- Kibert, C. J. (Ed.). (1994). *Sustainable construction : Proceedings of the First International Conference of CIB TG 16, November 6 - 9, 1994, Tampa, Florida, U.S.A.* Center for Construction and Environment, School of Building Construction, College of Architecture, University of Florida.
- Kim, M.-G., & Bartos, M. (2024). A digital twin model for contaminant fate and transport in urban and natural drainage networks with online state estimation. *Environmental Modelling and Software*, 171. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105868>
- Klimaaktiv. (2019). *klimaaktiv Quality and Criteria—New buildings and renovations*. Austrian Federal Ministry for Sustainability and Tourism.
- Kostensalo, J., Mehtätalo, L., Tuominen, S., Packalen, P., & Myllymäki, M. (2023). Recreating structurally realistic tree maps with airborne laser scanning and ground measurements. *Remote Sensing of Environment*, 298. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113782>
- Koutamanis, A. (2020). Dimensionality in BIM : Why BIM cannot have more than four dimensions? *Automation in Construction*, 114, 103153. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103153>
- LBC. (2019). *Living Building Challenge 4.0 : A Visionary Path to a Regenerative Future*. International Living Future Institute.
- Leedy, P. D., & Ormrod, J. E. (2015). *Practical research : Planning and design* (Eleventh edition, global edition). Pearson.
- Liberotti, R., & Gusella, V. (2023). Parametric Modeling and Heritage : A Design Process Sustainable for Restoration. *Sustainability (Switzerland)*, 15(2). Scopus. <https://doi.org/10.3390/su15021371>
- Liu, S. (2021). Real-time monitoring of energy consumption of high-rise residential construction based on BIM building model. *International Journal of Critical Infrastructures*, 17(4), 317-329. Scopus. <https://doi.org/10.1504/IJCIS.2021.120188>
- Liu, Z., Gu, X., & Hong, R. (2023). Fire Protection and Evacuation Analysis in Underground Interchange Tunnels by Integrating BIM and Numerical Simulation. *Fire*, 6(4). Scopus. <https://doi.org/10.3390/fire6040139>

- Liu, Z., Zhang, M., & Osmani, M. (2023). Building Information Modelling (BIM) Driven Sustainable Cultural Heritage Tourism. *Buildings*, 13(8). Scopus. <https://doi.org/10.3390/buildings13081925>
- Lucchi, E., & Agliata, R. (2023). HBIM-based workflow for the integration of advanced photovoltaic systems in historical buildings. *Journal of Cultural Heritage*, 64, 301-314. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.10.015>
- Lv, Z., Cheng, C., & Lv, H. (2023). Digital twins for secure thermal energy storage in building. *Applied Energy*, 338. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120907>
- Manocha, A., Sood, S. K., & Bhatia, M. (2024). IoT-digital twin-inspired smart irrigation approach for optimal water utilization. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 41. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2023.100947>
- March, S. T., & Smith, G. F. (1995). Design and natural science research on information technology. *Decision Support Systems*, 15(4), 251-266. [https://doi.org/10.1016/0167-9236\(94\)00041-2](https://doi.org/10.1016/0167-9236(94)00041-2)
- Montiel-Santiago, F. J., Hermoso-Orzáez, M. J., & Terrados-Cepeda, J. (2020). Sustainability and Energy Efficiency : BIM 6D. Study of the BIM Methodology Applied to Hospital Buildings. Value of Interior Lighting and Daylight in Energy Simulation. *Sustainability*, 12(14), 5731. <https://doi.org/10.3390/su12145731>
- Moon, S. J., Pyeon, M. W., Park, H. G., Ji, J. H., & Jo, J. H. (2010). The application of geospatial information acquisition technique and Civil-BIM for site selection. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 28(6), 579-586. Scopus.
- Motalebi, M., Rashidi, A., & Nasiri, M. M. (2022). Optimization and BIM-based lifecycle assessment integration for energy efficiency retrofit of buildings. *Journal of Building Engineering*, 49. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104022>
- Mousavi, M., TohidiFar, A., & Alvanchi, A. (2022). BIM and machine learning in seismic damage prediction for non-structural exterior infill walls. *Automation in Construction*, 139. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104288>
- NBIMS. (2007). *National BIM Standard-United States® V3*. <https://www.nationalbimstandard.org/nbims-us-v3>
- Newbold, P., Carlson, W. L., & Thorne, B. (2013). *Statistics for business and economics* (8th ed). Pearson.
- Nodelman, J., Nodelman, J., Shippee, N., O'Driscoll, J., & Sparling, E. (2021). *PIEVC© Family of Resources : A Guide for Selecting Climate Risk Assessment Methods, Data, and Supporting Materials*. PIEVC Global Partnership: Deutsche Gesellschaft für

Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Institute for Catastrophic Loss Reduction, Climate Risk Institute.

OGNB. (2013). *OEGNB - Open Source Building Assessment*. Österreichische Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (Austrian Sustainable Building Council). www.oegnb.net

Ouyang, X., Peng, Y., Pan, S., & Ouyang, P. (2023). Information visualization method for intelligent construction of prefabricated buildings based on P-ISOMAP algorithm. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 24(1), 73-89. Scopus. <https://doi.org/10.1515/ijeepls-2022-0118>

Oviir, A. (2016). Life Cycle Assessment (LCA) in the Framework of the Next Generation Estonian Building Standard Building Certification as a Strategy for Enhancing Sustainability. *Energy Procedia*, 96, 351-362. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.159>

Ozel, B., & Petrovic, M. (2024). Green Urban Scenarios : A Framework for Digital Twin Representation and Simulation for Urban Forests and Their Impact Analysis. *Arboriculture and Urban Forestry*, 50(1), 109-130. Scopus. <https://doi.org/10.48044/jauf.2023.029>

Palumbo, E., Soust-Verdaguer, B., Llatas, C., & Traverso, M. (2020). How to obtain accurate environmental impacts at early design stages in BIM when using environmental product declaration. A method to support decision-making. *Sustainability (Switzerland)*, 12(17). Scopus. <https://doi.org/10.3390/SU12176927>

Peffers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A., & Chatterjee, S. (2007). A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. *Journal of Management Information Systems*, 24(3), 45-77. <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302>

PHI. (2022). *Passive House Institute Guide*. Passive House Institute. www.passivehouse.com

Preece, C., Shafiq, M., Syed, Z., Mat Isa, C. M., & Golizadez, H. (2016). *Towards BIM Enabled Sustainable Urban Developments in the UAE*.

Qi, Y., Li, H., Pang, Z., Gao, W., & Liu, C. (2022). A Case Study of the Relationship Between Vegetation Coverage and Urban Heat Island in a Coastal City by Applying Digital Twins. *Frontiers in Plant Science*, 13. Scopus. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.861768>

Ritu, R. (2023). Optimization of Energy Through BIM in the Construction Industry [M.S., University of Washington]. In *ProQuest Dissertations and Theses* (2799409842). ProQuest Dissertations & Theses Global; ProQuest Dissertations & Theses Global Closed Collection. <https://www.proquest.com/dissertations-theses/optimization-energy-through-bim-construction/docview/2799409842/se-2?accountid=27231>

- Rocca, R., Rosa, P., Sasanelli, C., Fumagalli, L., & Terzi, S. (2020). Integrating virtual reality and digital twin in circular economy practices : A laboratory application case. *Sustainability (Switzerland)*, 12(6). Scopus. <https://doi.org/10.3390/su12062286>
- Sabah Haseeb, Q., Muhammed Yunus, S., Attallah Ali Shoshan, A., & Ibrahim Aziz, A. (2023). A study of the optimal form and orientation for more energy efficiency to mass model multi-storey buildings of Kirkuk city, Iraq. *Alexandria Engineering Journal*, 71, 731-741. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.03.020>
- Sánchez Cordero, A., Gómez Melgar, S., & Andújar Márquez, J. M. (2019). Green Building Rating Systems and the New Framework Level(s) : A Critical Review of Sustainability Certification within Europe. *Energies*, 13(1), 66. <https://doi.org/10.3390/en13010066>
- Santa-Cruz, S., Córdova-Arias, C., Briosso, X., & Vázquez-Rowe, I. (2021). Transparency-based protocol for decision-making regarding seismic rehabilitation projects of public buildings. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 55. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102116>
- SASB. (2018a). *Building Products & Furnishings*. Sustainability Accounting Standards Board.
- SASB. (2018b). *Construction Materials*. Sustainability Accounting Standards Board.
- SASB. (2018c). *Engineering & Construction Services*. Sustainability Accounting Standards Board.
- SASB. (2018d). *Real Estate*. Sustainability Accounting Standards Board.
- SASB. (2018e). *Waste Management*. Sustainability Accounting Standards Board.
- Shirowzhan, S., & Zhang, K. (Éds.). (2020). *Smart Cities and Construction Technologies*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.86103>
- Shringi, A., Arashpour, M., Dwyer, T., Prouzeau, A., & Li, H. (2023). Safety in Off-Site Construction : Simulation of Crane-Lifting Operations Using VR and BIM. *Journal of Architectural Engineering*, 29(1). Scopus. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000570](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000570)
- Simon, H. A. (1996). *The sciences of the artificial* (3. ed., [Nachdr.]). MIT Press.
- Sözer, H., & Sözen, H. (2020). Waste capacity and its environmental impact of a residential district during its life cycle. *Energy Reports*, 6, 286-296. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.01.008>
- Succar, B. (2009). Building information modelling framework : A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*, 18(3), 357-375. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003>

- Sun, C., Jiang, S., Skibniewski, M. J., Man, Q., & Shen, L. (2015). A LITERATURE REVIEW OF THE FACTORS LIMITING THE APPLICATION OF BIM IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY. *Technological and Economic Development of Economy*, 23(5), 764-779. <https://doi.org/10.3846/20294913.2015.1087071>
- Truong, N.-S., Luong, D. L., Ngo, N.-T., & Nguyen, Q. T. (2024). *Optimizing Envelope Design and Window Performance for Energy-Efficient Buildings Through Integration of Building Information and Energy Modeling (BIM-BEM)*. 442, 584-595. Scopus. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7434-4_60
- Ullah, K., Lill, I., & Witt, E. (2019). An Overview of BIM Adoption in the Construction Industry : Benefits and Barriers. In I. Lill & E. Witt (Éds.), *Emerald Reach Proceedings Series* (p. 297-303). Emerald Publishing Limited. <https://doi.org/10.1108/S2516-285320190000002052>
- United Nations Environment Programme. (2024). *2023 Global Status Report for Buildings and Construction : Beyond foundations - Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. United Nations Environment Programme. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>
- USGBC. (2021). *LEED v4.1 : Leadership in Energy and Environmental Design*. U.S. Green Building Council.
- Vigneault, M.-A., Boton, C., Chong, H.-Y., & Cooper-Cooke, B. (2020). An Innovative Framework of 5D BIM Solutions for Construction Cost Management : A Systematic Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27(4), 1013-1030. <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09341-z>
- Visby Fjærbaek, E., Seidenschnur, M., Küçükavci, A., Michael Smith, K., & Anker Hviid, C. (2023). Coupling BIM and detailed modelica simulations of HVAC systems in a common data environment. *Journal of Building Performance Simulation*. Scopus. <https://doi.org/10.1080/19401493.2023.2271441>
- Vom Brocke, J., Hevner, A., & Maedche, A. (2020). Introduction to Design Science Research. In J. Vom Brocke, A. Hevner, & A. Maedche (Éds.), *Design Science Research. Cases* (p. 1-13). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46781-4_1
- WorldGBC. (2024). *What is a Sustainable Built Environment?* <https://worldgbc.org/what-is-a-sustainable-built-environment/>
- Wu, J., Wang, X., Huang, L., Wang, Z., Wan, D., & Li, P. (2023). Parameterized Site Selection Approach of Park Entrance Based on Crowd Simulation and Design Requirement. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(10). Scopus. <https://doi.org/10.3390/app13106280>

- Xu, J., Zhang, Q., Teng, Y., & Pan, W. (2023). Integrating IoT and BIM for tracking and visualising embodied carbon of prefabricated buildings. *Building and Environment*, 242. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110492>
- Xu, Z., Ran, Y., & Rao, Z. (2022). Design and integration of air pollutants monitoring system for emergency management in construction site based on BIM and edge computing. *Building and Environment*, 211. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108725>
- Yang, Y., Ng, S. T., Dao, J., Zhou, S., Xu, F. J., Xu, X., & Zhou, Z. (2021). BIM-GIS-DCEs enabled vulnerability assessment of interdependent infrastructures – A case of stormwater drainage-building-road transport Nexus in urban flooding. *Automation in Construction*, 125. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103626>
- Yitmen, I., & Alizadehsalehi, S. (2021). Towards a Digital Twin-based Smart Built Environment. In I. Yitmen (Ed.), *BIM-enabled Cognitive Computing for Smart Built Environment* (1^{re} éd., p. 21-44). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003017547-2>
- Younis, M., Kahsay, M. T., & Bitsuamlak, G. T. (2023). BIM-CFD-based Thermal Analysis for Northern Buildings on Permafrost. *Journal of Cold Regions Engineering*, 37(4). Scopus. <https://doi.org/10.1061/JCRGEI.CRENG-644>
- Yu, E., & Choi, J. (2023). Development of building information modeling-based automation assessment process for universal design of public buildings. *Journal of Computational Design and Engineering*, 10(2), 641-654. Scopus. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwad018>
- Zhang, H. X., & Zou, Z. (2023). Quality assurance for building components through point cloud segmentation leveraging synthetic data. *Automation in Construction*, 155. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105045>
- Zhang, H., Zheng, Z., Yu, H., Yang, G., & Yuan, S. (2024). Analysis of intelligent and connected vehicles driving system modeling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. Scopus. <https://doi.org/10.1177/09544070241228643>