

Mémoire de fin d'études Gouverner l'intelligence artificielle dans les bâtiments tertiaires intelligents : concilier "IT for Green", "Green IT " et infrastructures numériques

Auteur : Pennartz, Fanny

Promoteur(s) : de Boissieu, Aurélie

Faculté : Faculté d'Architecture

Diplôme : Master en architecture, à finalité spécialisée en art de bâtir et urbanisme

Année académique : 2025-2026

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/25663>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Université de Liège – Faculté d’Architecture

**Gouverner l’intelligence artificielle dans les
bâtiments tertiaires intelligents : concilier IT
for Green, Green IT et infrastructures
numériques**

Travail de fin d’études présenté par Fanny Pennartz en vue de l’obtention du grade
de Master en Architecture

Promotrice : Prof. Aurélie de BOISSIEU
Jury : Eric LE COGUEC & Simon BAUDRU
Année académique 2025-2026

Remerciements

Ce TFE marque la fin d'une année riche en émotions, pleine de découvertes et d'apprentissages intenses. Ce travail m'a permis d'explorer l'intelligence artificielle au service de l'architecture durable, un sujet qui m'ouvre des portes professionnelles et dans lequel j'ai trouvé une direction passionnante pour la suite de mon parcours.

Je remercie du fond du cœur ma promotrice Aurélie de Boissieu, pour son accompagnement bienveillant. Sa confiance, ses conseils avisés et l'opportunité de suivre son cours, enrichi par les interventions inspirantes de différents intervenants extérieurs, ont profondément nourri ce travail.

Je souhaite également remercier l'ensemble des enseignants et de la faculté qui ont contribué à ma formation et à la construction de ma réflexion tout au long de ce parcours.

Merci à mes amis et mes colocataires qui ont partagé mes doutes et qui m'ont divertie dans les bons moments pour tenir le rythme !

Je remercie également ma famille et mon entourage, avec qui j'ai pu discuter de mon sujet, les intriguer et recueillir leurs avis précieux qui ont nourri ma réflexion.

Enfin, ma gratitude la plus émue va à ma maman, qui a pris le temps de relire ce travail avec soin, apportant sa touche précieuse à cette réalisation.

Ce travail constitue pour moi une étape importante.

Résumé

Ce travail de fin d'études analyse le rôle de l'intelligence artificielle (IA) dans les bâtiments tertiaires intelligents, en mettant en évidence la tension entre son potentiel d'optimisation environnementale (*IT for Green*) et l'empreinte énergétique et matérielle des infrastructures numériques qui la soutiennent (*Green IT*).

À partir d'un état de l'art et de trois études de cas, la recherche examine l'intégration de l'IA aux différentes phases du cycle de vie du bâtiment (conception, construction, exploitation, fin de vie). Elle montre que, si ces technologies permettent d'optimiser la conception bioclimatique, le pilotage énergétique en temps réel et les stratégies de maintenance et de réemploi elles reposent sur des dispositifs numériques intensifs dont les impacts restent largement sous-évalués.

Face à ce paradoxe, le travail développe une approche centrée sur la gouvernance de l'IA et propose une grille d'analyse articulée autour de trois axes : performance environnementale, sobriété numérique et gouvernance. Cet outil vise à rendre visibles les bénéfices et les coûts des systèmes étudiés afin d'éclairer les choix de conception.

En conclusion, le travail souligne que la durabilité architecturale ne peut reposer sur une simple intensification technologique, mais nécessite un arbitrage explicite entre innovation numérique et sobriété.

Mots-clés

Intelligence artificielle ; Smart buildings ; Durabilité architecturale ; IT for Green ; Green IT ; Gouvernance de l'IA ; Sobriété numérique ; Cycle de vie du bâtiment

Description de l'usage de l'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle a été mobilisée de manière ponctuelle comme outil d'assistance à la rédaction et à la structuration du travail. Elle a notamment été utilisée pour reformuler certains passages, améliorer la clarté du texte, clarifier certains développements, ainsi que pour faciliter la traduction de certains contenus.

Elle a également pu être sollicitée pour orienter la recherche bibliographique en suggérant des mots-clés ou des thématiques, lesquels ont ensuite été systématiquement vérifiés, validés et complétés à partir de sources académiques.

Son usage est resté encadré et critique. L'intelligence artificielle n'a en aucun cas été utilisée comme source d'information primaire.

Table des matières

1.	Introduction	10
2.	Problématique.....	10
3.	État de l’art.....	14
3.1	L’intelligence artificielle comme levier de durabilité architecturale (<i>IT for Green</i>)	14
3.2	Les coûts environnementaux et matériels du numérique (<i>Green IT</i>)	22
3.3	Vers un numérique responsable : cadres de gouvernance et limites des approches existantes	25
3.4	Synthèse critique de l’état de l’art.....	27
4.	Méthodologie.....	28
4.1	Positionnement de la recherche	28
4.2	Cadre d’analyse: articulation IT for Green et Green IT	28
4.3	Dispositif méthodologique	29
4.4	Sélection et analyse des études de cas	31
5.	Proposition d’une grille d’analyse de la gouvernance de l’IA pour des projets durables	32
5.1	Principes de construction de la grille d’analyse	32
5.2	Structure de la grille d’analyse.....	33
5.3	Justification de l’approche par critères d’analyse.....	38
6.	Etude de cas – Mise à l’épreuve de la grille d’analyse	39
6.1	CAS 1 – <i>The Edge</i>	39
6.2	CAS 2 - Siège d’Autodesk Research	47
6.3	CAS 3 – <i>TU Delft</i>	56
7	Synthèse et discussion transversale	64
7.1	Objectifs et cadre de l’analyse	64
7.2	Analyse transversale : une IA aux visages multiples	64
7.3	Enseignements clés et levier de durabilité	65
7.4	Analyse par axes (<i>IT for Green, Green IT, Gouvernance</i>).....	66
7.5	Limites récurrentes	70
7.6	Retour critique sur la grille d’analyse proposée	71
8	Discussion – Mise en perspective	73

9.	Conclusion	78
9.1	Apports du travail et implications pour la pratique architecturale.....	79
10.	Bibliographie	80

Table des figures

Figure 1 :	Schéma méthodologique : aller-retour entre théorie, grille et cas	30
Figure 2 :	The Edge, Amsterdam — vue extérieure de la façade vitrée et du volume compact. Source : PLP Architecture, 2015	39
Figure 3 :	The Edge, Amsterdam – atrium central et espace de circulation intérieure, qui structurent la relation entre lumière, usages et sociabilité. Source : PLP Architecture, 2015	39
Figure 4 :	The Edge, Amsterdam – vue d’ensemble du bâtiment dans son contexte urbain, entre image de performance et architecture tertiaire. Source : ArchInspires, 2024.	41
Figure 5 :	Figure 6.4 : The Edge – morphologie en U ouverte au nord, atrium central et organisation des plateaux autour d’un cœur collectif. Source : PLP Architecture, 2015	42
Figure 6 :	Vue extérieure du MaRS Discovery District à Toronto, où est implanté le siège d’Autodesk Research. Le projet s’inscrit dans un environnement dédié à l’innovation technologique et à la recherche appliquée. Source : Autodesk News, 2015.	47
Figure 7 :	Vue intérieure des espaces de travail du siège Autodesk Toronto, caractérisés par une organisation ouverte et collaborative issue du processus de design génératif. Photographie : Ben Rahn / A-Frame Inc. Source : BrainStation, 2017.....	48
Figure 8 :	Le système géométrique : (0) intègre les contraintes ; (1) définit les zones génératives et non génératives ; (2–3) subdivise l’espace en quartiers fonctionnels ; (4) génère des espaces partagés ; (5) produit des configurations tests ; (6) attribue les équipes ; (7) évalue les solutions générées. Workflow du processus de design génératif utilisé pour le projet Autodesk Toronto. Source : Nagy et al., 2017.	49
Figure 9 :	Variantes spatiales générées dans le cadre du processus de design génératif du siège Autodesk Toronto. Source : Benjamin & Testai, 2020	50
Figure 10 :	Relevé par nuage de points utilisé dans un workflow scan-to-BIM appliqué à un bâtiment existant. Source : Gordon et al., 2023.	57
Figure 11 :	Bâtiment existant utilisé comme support de relevés numériques et d’expérimentations liées au réemploi et à la déconstruction sélective. Source : TU Delft / Circular Built Environment publications, 2021–2023.	58
Figure 12 :	(a) Nuages de points originaux ; (b) résultats de segmentation sémantique ; (c) résultats de segmentation par instances. Segmentation et classification automatisée d’éléments constructifs à partir d’un nuage de points appliqué à un bâtiment existant. Source : Croce et al., 2023	58

Table des tableaux

Tableau 1 :	Critères de l’axe IT for Green	35
Tableau 2 :	Critères de l’axe Green IT.....	36

Tableau 3 : Critères de l'axe gouvernance	38
Tableau 4 : Analyse du cas The Edge à partir de la grille IT for Green.....	46
Tableau 5 : Analyse du cas The Edge à partir de la grille Green IT	46
Tableau 6 : Analyse du cas The Edge à partir de la grille gouvernance	46
Tableau 7 : Analyse du cas Autodesk Toronto à partir de la grille IT for Green	55
Tableau 8 : Analyse du cas Autodesk Toronto à partir de la grille Green IT	55
Tableau 9 : Analyse du cas Autodesk Toronto à partir de la grille gouvernance.....	55
Tableau 10 : Analyse du cas TU Delft à partir de la grille IT for Green	62
Tableau 11 : Analyse du cas TU Delft à partir de la grille Green IT.....	63
Tableau 12 : Analyse du cas TU Delft à partir de la grille gouvernance.....	63
Tableau 13 : Analyse des trois études de cas	69

Lexique

Terme	Définition
Accountability	Responsabilité institutionnelle et traçabilité des décisions prises par les systèmes d'IA.
Algorithme	Suite d'instructions automatisées pour résoudre un problème ou effectuer une tâche.
Apprentissage automatique (Machine Learning)	Branche de l'IA où des algorithmes apprennent à partir de données sans programmation explicite.
Apprentissage profond (Deep Learning)	Sous-domaine du machine learning utilisant des réseaux de neurones complexes.
BIM (Building Information Modeling)	Modélisation numérique collaborative intégrant données géométriques, techniques et fonctionnelles du bâtiment.
Big Data	Données massives, variées et rapides nécessitant des outils d'analyse spécifiques.
Capteurs IoT	Dispositifs mesurant des paramètres physiques (température, CO ₂ , luminosité, etc.).
Cloud computing	Utilisation de serveurs distants pour stocker et traiter des données via internet.
CNN (Convolutional Neural Networks)	Réseaux de neurones convolutifs pour la reconnaissance d'éléments dans les nuages de points 3D.

Terme	Définition
Computational Design	Conception intégrant outils numériques et algorithmiques pour explorer des solutions architecturales.
Conception générative	Processus automatisé générant et évaluant de multiples solutions selon des critères définis.
Conception paramétrique	Méthode basée sur des paramètres modifiables générant différentes variantes d'un projet.
CVC	Systèmes de Chauffage, Ventilation et Climatisation.
Data center	Infrastructure centralisée pour le stockage et traitement de grandes quantités de données.
Digital Twin (Jumeau numérique)	Modèle dynamique connecté à des données temps réel pour simuler/optimiser un bâtiment.
Edge computing	Traitement local des données au plus près des capteurs (vs cloud).
Effet rebond	Gains d'efficacité entraînant une augmentation globale des usages.
GAN (Generative Adversarial Networks)	Réseaux générant plans/morphologies à partir de corpus architecturaux.
Gouvernance des données	Règles encadrant collecte, usage et gestion des données.
Green IT	Pratiques réduisant l'empreinte environnementale des technologies numériques.
GTB (Gestion Technique du Bâtiment)	Système pilotant les équipements techniques d'un bâtiment.
H-BIM	BIM appliqué aux bâtiments existants pour inventaire/déconstruction.
Intelligence artificielle (IA)	Techniques informatiques imitant des capacités cognitives humaines.
IoT (Internet of Things)	Réseau d'objets connectés collectant/transmettant des données.
IT for Green	Technologies numériques améliorant la performance environnementale du bâti.

Terme	Définition
Lock-in technologique	Dépendance à un fournisseur/technologie difficile à remplacer.
Maintenance prédictive	Anticipation des pannes par analyse de données d'équipements.
Modèle prédictif	Anticipe comportements futurs à partir de données passées.
NSGA-II	Algorithme d'optimisation multi-objectifs par évolution.
Nuage de points	Points numériques représentant la géométrie d'un espace (scan 3D).
PoE (Power over Ethernet)	Alimentation électrique + données via un seul câble Ethernet.
Scan-to-BIM	Transformation de relevés 3D en modèles BIM structurés.
Transparence algorithmique	Compréhension du fonctionnement/décisions d'un algorithme.
Workflow BIM	Organisation des processus/échanges numériques dans un projet BIM.

1. Introduction

Face à l'urgence climatique et à la nécessité de réduire l'empreinte environnementale du secteur du bâtiment, la durabilité s'impose aujourd'hui comme un enjeu central des pratiques architecturales. Ce secteur représente une part significative de la consommation énergétique et des émissions mondiales de gaz à effet de serre, ce qui en fait un levier essentiel de la transition écologique (United Nations Environment Programme [UNEP], 2022)

Dans ce contexte, les bâtiments tertiaires occupent une place singulière : fortement consommateurs d'énergie en phase d'exploitation, ils se situent également au croisement de mutations organisationnelles et technologiques liées à la flexibilisation des usages et à la recherche de performance mesurée (Agence de la transition écologique [ADEME], 2025). Pour répondre à ces exigences, le recours au numérique s'est progressivement intensifié, notamment à travers le développement du *Building Information Modeling (BIM)*, des systèmes de gestion technique du bâtiment et des dispositifs de surveillance environnementale (*monitoring environnemental*) (Jalia et al., 2018 ; Pan & Zhang, 2021 ; Panissod, 2019)

Cette évolution s'inscrit notamment dans le développement des jumeaux numériques (*digital twins*), qui constituent une forme avancée d'intégration des systèmes techniques, en articulant modélisation, données en temps réel et capacités prédictives. Ces dispositifs participent à une transformation du bâtiment en système dynamique et piloté, au cœur des logiques contemporaines de *smart building* (Jalia et al., 2018 ; Michalakopoulos et al., 2023).

Plus récemment, l'intelligence artificielle (IA) s'est ajoutée à cet écosystème numérique, ouvrant de nouvelles perspectives d'optimisation pour la conception, le pilotage énergétique et l'exploitation du bâti (Elwy & Hagishima, 2024 ; International Energy Agency [IEA], 2023). Présentée comme un outil capable d'améliorer la performance environnementale grâce à l'analyse et à la modélisation prédictive des données, l'IA occupe désormais une place croissante dans les discours et les pratiques liés à l'architecture durable (Dignum, 2019 ; Floridi, 2023 ; Panissod, 2019).

2. Problématique

Dans les bâtiments tertiaires instrumentés, connectés et pilotés par des systèmes d'automatisation et d'IA (souvent qualifiés de "*smart buildings*"), l'intelligence artificielle est de plus en plus mobilisée pour optimiser la conception environnementale, la gestion énergétique et l'exploitation opérationnelle. Des travaux récents montrent que l'IA, intégrée à des *workflows BIM* (défini la séquence collaborative d'étapes, de règles et d'échanges numériques entre architectes, ingénieurs et entreprises, de la conception à l'exploitation), à

des systèmes de gestion technique du bâtiment, à des dispositifs de maintenance prédictive ou encore à des jumeaux numériques (*digital twins*), permettant de simuler et d'anticiper le comportement du bâtiment en temps réel, peut contribuer à réduire les consommations d'énergie, à améliorer le confort et à soutenir des démarches d'économie circulaire dans le secteur du bâti (Attia et al., 2018 ; Chaillou, 2021 ; Elwy & Hagishima, 2024 ; Suphavarophas et al., 2024). Dans ce contexte, elle est fréquemment présentée comme un levier clé de la transition écologique, prolongeant les scénarios plus anciens du « bâtiment intelligent » et du *smart building* (Panissod, 2019 ; Jalia et al., 2018).

Cependant, ces promesses d'optimisation reposent sur une infrastructure numérique dense : capteurs *IoT*, réseaux de communication, serveurs locaux, plateformes *cloud* et modèles d'IA entraînés sur des volumes importants de données. Cette matérialité du numérique entraîne des consommations électriques significatives, concentrées dans les *datas centers* et les équipements de réseau, ainsi qu'une forte mobilisation de ressources matérielles, souvent peu recyclées, pour produire et renouveler les composants électroniques (Strubell et al., 2019 ; IEA, 2023 ; Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD], 2022). Dans une perspective de *Green IT*, entendu comme l'ensemble des démarches visant à réduire l'empreinte environnementale des technologies numériques (infrastructures, équipements, logiciels et usages), plusieurs travaux soulignent que ces coûts énergétiques et matériels doivent être intégrés au bilan environnemental global des projets, alors qu'ils restent largement absents des outils d'évaluation mobilisés en pratique faute de quoi les gains affichés à l'échelle du bâtiment risquent de masquer un déplacement des impacts vers l'infrastructure numérique (Schwartz et al., 2020 ; Institut du Numérique Responsable [INR], 2019).

Cette tension entre *IT for Green* (l'usage de l'IA comme outil d'optimisation environnementale) et *Green IT* (la réduction de l'empreinte propre du numérique) ne relève pas uniquement d'un calcul technique, mais d'un véritable enjeu de gouvernance. Ainsi, dans les bâtiments tertiaires instrumentés, les choix relatifs au niveau d'instrumentation, à l'architecture des systèmes (*edge vs cloud*), aux politiques de données ou à la durée de vie des équipements sont rarement neutres : ils conditionnent directement le profil de risques énergétiques, environnementaux, mais aussi éthiques et organisationnels (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization [UNESCO], 2021 ; Panissod, 2019 ; Floridi, 2023 ; Commission nationale d'éthique, 2024). L'absence de cadres clairs de gouvernance de l'IA et du numérique peut ainsi conduire à des situations de dépendance vis-à-vis de fournisseurs, à un manque de transparence sur les algorithmes mobilisés, à des difficultés de redevabilité et de responsabilité institutionnelle (*accountability*) ou à une « sur-instrumentation » des espaces, peu compatible avec les principes de sobriété (UN-Habitat, 2022 ; Flaih, 2022).

Dans ce contexte, plusieurs auteurs plaident pour un numérique « responsable » ou un *Green IT*, articulant performance environnementale, maîtrise des risques et transparence des usages

(Babinet, 2024 ; OECD, 2022 ; Schwartz et al., 2020). Cette approche invite à considérer les systèmes d'IA non comme des solutions neutres, mais comme des dispositifs à encadrer par des stratégies explicites de conception et de gouvernance : définition de niveaux de suffisance numérique, choix de modèles plus frugaux, arbitrage entre traitement local et *cloud*, critères de sélection et de renouvellement du matériel, règles de collecte et de conservation des données, ou encore intégration de ces enjeux dans les processus décisionnels des maîtres d'ouvrage (Flaih, 2022).

C'est dans cette perspective que s'inscrit ce travail, qui **s'interroge sur la manière dont les dispositifs d'intelligence artificielle intégrés aux bâtiments tertiaires influencent les arbitrages entre performance environnementale, sobriété numérique et gouvernance des projets architecturaux, tout au long du cycle de vie du bâti.**

Plus précisément, il se focalise sur des bâtiments tertiaires revendiquant à la fois une ambition environnementale et une forte composante numérique/IA. À partir d'une analyse documentaire et d'études de cas, il s'agit d'identifier, à l'échelle du projet architectural, quels risques sont effectivement générés ou amplifiés par l'intégration de l'IA (consommations invisibles, dépendance technique, sur-complexité, effets rebond) et quelles marges de manœuvre disposent les concepteurs, exploitants et institutions pour les encadrer.

L'objectif est de formuler des stratégies de gouvernance et de conception (sous la forme de critères) permettant de concilier les bénéfices recherchés de l'IA (*IT for Green*) avec une réduction maîtrisée de son empreinte propre (*Green IT*), dans une logique de grille d'analyse transférable à d'autres projets, notamment à l'échelle d'un patrimoine universitaire ou institutionnel. La construction de cet outil d'évaluation constitue le cœur de la démarche : elle permet de transformer des concepts théoriques de gouvernance en leviers décisionnels concrets pour l'architecte.

Afin d'aborder de manière opérationnelle la problématique posée, ce travail s'articule autour d'une question de recherche principale, complétée par un ensemble de sous-questions destinées à structurer l'analyse et à guider l'étude des cas. Ces sous-questions ne constituent pas des fins en soi, mais des angles de lecture permettant d'éclairer les conditions de mise en œuvre, d'évaluation et de gouvernance des systèmes d'intelligence artificielle dans les projets architecturaux.

Question principale :

Comment les dispositifs d'intelligence artificielle intégrés aux bâtiments tertiaires influencent-ils les arbitrages entre performance environnementale, sobriété numérique et gouvernance des projets, tout au long du cycle de vie du bâti ?

Sous-questions :

- À quelles étapes du cycle de vie du bâtiment (conception, exploitation, fin de vie) l'intelligence artificielle est-elle mobilisée de manière significative, et selon quelles modalités techniques (génération, prédictive, automatisée) ?
- Quels bénéfices environnementaux mesurables ces systèmes apportent-ils en termes de performance énergétique, de confort d'usage et de sobriété matérielle du bâti ?
- Quels coûts énergétiques, matériels et organisationnels sont associés à leur mise en œuvre (infrastructures numériques, calcul, stockage des données, maintenance et obsolescence des équipements) ?
- Comment ces bénéfices et ces coûts peuvent-ils être rendus visibles, comparables et discutables dans le cadre du projet architectural, afin de soutenir des décisions de conception et de gouvernance plus sobres et transparentes ?

Délimitation :

Le travail ne vise pas à produire une analyse exhaustive des impacts environnementaux du numérique à l'échelle macro, tels que les réseaux mondiaux, les politiques énergétiques, la géopolitique des ressources ou les dynamiques industrielles des *data centers*. Ces dimensions sont mobilisées comme éléments de contexte, mais ne constituent pas le cœur de l'analyse.

De même, l'étude ne cherche pas à comparer de manière systématique des technologies d'intelligence artificielle entre elles, ni à évaluer la performance algorithmique des modèles utilisés. L'accent est volontairement placé sur les choix de conception, d'implémentation et de gouvernance des systèmes numériques dans les projets architecturaux pendant tout leur cycle de vie, et sur leurs conséquences environnementales et organisationnelles.

Enfin, les résultats proposés s'appuient sur des études de cas documentées et sur des ordres de grandeur issus de la littérature, et n'ont pas vocation à être généralisés à l'ensemble des bâtiments. Ils sont conçus comme une grille de lecture transférable, destinée à éclairer la prise de décision dans des contextes comparables.

3. État de l'art

3.1 L'intelligence artificielle comme levier de durabilité architecturale (*IT for Green*)

Face aux impératifs de décarbonation du secteur du bâtiment, la littérature récente présente l'intelligence artificielle comme un levier de transformation des pratiques de conception, de construction et d'exploitation. Responsable d'environ 36 % de la consommation énergétique finale et de 37 % des émissions de CO₂ liées à l'énergie à l'échelle mondiale (UNEP, 2022), le secteur du bâti concentre une part majeure des efforts de transition écologique. Dans ce contexte, de nombreux travaux mettent en avant le potentiel de l'IA pour améliorer la performance énergétique, le confort et l'usage des ressources dans le bâtiment (Attia et al., 2018 ; Chaillou, 2021 ; Elwy, & Hagishima, 2024).

Toutefois, ces bénéfices ne sont ni automatiques ni universels : ils dépendent étroitement de la qualité des données mobilisées, des objectifs d'optimisation retenus et des modalités concrètes d'intégration de l'IA dans le projet architectural (Li et al., 2025 ; Elwy & Hagishima, 2024). **L'IA ne constitue donc pas une solution générique, mais un ensemble d'outils dont l'efficacité environnementale varie selon les contextes et les choix de conception.**

Ces affirmations restent souvent formulées de manière générale. La présente section vise dès lors à examiner plus précisément comment ces promesses se traduisent dans les dispositifs concrets de conception, de construction et d'exploitation, et dans quelles conditions elles peuvent effectivement être vérifiées.

3.1.1 Phase de conception : de la simulation bioclimatique à la conception générative

En phase de conception, l'intégration de l'intelligence artificielle s'inscrit dans la continuité de la modélisation paramétrique, de la simulation environnementale et des approches d'optimisation multiobjectif. Les travaux précurseurs sur la performative architecture ont montré comment des *workflows* algorithmiques pouvaient articuler géométrie, comportement structurel et performance bioclimatique, en s'appuyant sur des scripts déterministes et des boucles d'optimisation couplées à des moteurs de simulation (Kolarevic & Malkawi, 2004). Ces approches « préIA » ont préparé le terrain aux méthodes actuelles, qui mobilisent des algorithmes d'apprentissage automatique et d'optimisation avancée pour explorer un espace de solutions de plus en plus vaste (Attia et al., 2018 ; Elwy & Hagishima, 2024).

Cette évolution s'inscrit dans le champ plus large du *Computational Design*, qui distingue des sous-ensembles- tels que paramétrique, generative et algorithmique *design*, en insistant sur le passage d'une logique « compute-r-aided » à une véritable pensée computationnelle (de Boissieu, 2022). La modélisation paramétrique constitue le socle de nombreuses démarches

de conception « augmentée » : elle permet de définir des relations explicites entre paramètres géométriques (compacité, orientation, profondeur des plateaux), constructifs (types de parois, systèmes structurels) et environnementaux (facteurs solaires, apports de lumière naturelle). Dans ce cadre, l'intelligence artificielle n'est pas nécessairement mobilisée : les algorithmes restent souvent déterministes, et les concepteurs pilotent directement les variations du modèle (Kolarevic & Malkawi, 2004).

La conception générative ajoute un niveau d'automatisation en confiant à des moteurs d'optimisation le soin de produire, d'évaluer et de filtrer des milliers de variantes selon des objectifs multiples (performance énergétique, *daylighting*, efficacité spatiale, coûts, etc.) (Suphavarophas et al., 2024 ; Nagy et al., 2017).

Optimisation heuristique et algorithmes évolutionnaires

Une première famille d'algorithmes au cœur des *workflows* génératifs est constituée par les méthodes d'optimisation heuristique, et en particulier les algorithmes évolutionnaires et les approches de type *NSGAII*. Ces outils permettent d'optimiser simultanément plusieurs objectifs (par exemple minimiser la demande énergétique et les consommations d'éclairage, tout en maximisant l'éclairement naturel utile et la compacité) en produisant des fronts qui rendent explicites les compromis possibles (Suphavarophas et al., 2024 ; Dagadkar et al., 2025).

Méta-modèles et apprentissage automatique

Une deuxième famille regroupe les approches de métamodélisation : des modèles de substitution (*surrogate models*) sont entraînés pour approximer les résultats de simulations thermiques, d'éclairage ou de confort, de façon à réduire drastiquement les temps de calcul. Des techniques d'apprentissage automatique (régressions non linéaires, forêts aléatoires, réseaux de neurones peu profonds) permettent de prédire des indicateurs tels que la demande énergétique ou les heures d'inconfort à partir d'un échantillon limité de simulations détaillées (Attia et al., 2018 ; Li et al., 2025). Ces métamodèles peuvent ensuite être intégrés dans les boucles d'optimisation pour évaluer rapidement de nouvelles variantes, tout en maintenant une précision acceptable pour la prise de décision (Nguyen et al., 2014).

Réseaux neuronaux profonds et apprentissage par renforcement

Une troisième famille s'appuie sur des réseaux neuronaux profonds pour capturer des relations plus complexes entre morphologie du bâtiment, conditions climatiques et performance. Elwy et Hagishima (2024) montrent par exemple comment des architectures de *deep learning* peuvent être utilisées pour prédire la performance énergétique et environnementale de bâtiments à partir de descripteurs de forme et de matériaux, sans recourir à des simulations complètes pour chaque variante.

En parallèle, plusieurs travaux explorent l'apprentissage par renforcement profond pour

concevoir des stratégies de contrôle ou des configurations adaptatives, notamment pour le pilotage conjoint de l'enveloppe et du CVC dans des environnements simulés (Yu et al., 2021). Dans ces approches, un agent apprend par essais erreurs à maximiser une fonction de récompense combinant confort et consommation énergétique, ce qui déplace une partie de l'optimisation de la phase d'exploitation vers la phase de conception des stratégies.

IA générative (GAN, diffusion) pour plans et morphologies

Au-delà des approches fondées sur des paramètres explicites, une littérature émergente mobilise des réseaux antagonistes génératifs (GAN) et, plus récemment, des modèles de diffusion pour produire des plans, des façades ou des configurations urbaines à partir de corpus d'exemples existants. Ces modèles apprennent des distributions de formes et de relations spatiales à partir de données d'entraînement, puis synthétisent de nouvelles propositions qui respectent des contraintes globales (compacité, nombre de pièces, relations fonctionnelles). S'ils restent encore largement expérimentaux dans la pratique professionnelle, ces travaux questionnent déjà la reproductibilité des styles, la traçabilité des choix formels et les risques de standardisation implicite de la production architecturale (Dagadkar et al., 2025).

Apports environnementaux et limites

Du point de vue environnemental, ces différentes familles d'algorithmes sont principalement mobilisées pour :

- Renforcer l'intégration bioclimatique dès l'esquisse (orientation, compacité, profondeur des plateaux, placement et dimensionnement des ouvertures, protections solaires) ;
- Optimiser la performance énergétique et lumineuse projetée, en lien avec des scénarios climatiques et d'occupation, en réduisant les besoins de chauffage, de refroidissement et d'éclairage artificiel (Attia et al., 2018 ; Elwy & Hagishima, 2024) ;
- Réduire les quantités de matériaux ou concevoir des systèmes structurels plus efficaces, en articulant optimisation formelle et contraintes mécaniques (Suphavarophas et al., 2024).

Ces apports restent toutefois conditionnés à plusieurs limites spécifiques. D'abord, la qualité et le cadrage des données d'entrée (climats de référence, scénarios d'occupation, hypothèses de systèmes techniques) déterminent la pertinence des solutions générées : un modèle « optimisé » sur la base de scénarios idéalisés peut se révéler moins performant en situation réelle (Attia et al., 2018 ; Nguyen et al., 2014).

Ensuite, la formulation des objectifs d'optimisation et des pondérations encode des choix de valeurs (priorité au kWh/m².an, au confort, à la densité d'occupation, etc.) qui ne sont pas neutres (Li et al., 2025 ; Dagadkar et al., 2025). Par ailleurs, la génération et l'évaluation de

milliers de variantes reposent sur des ressources de calcul intensives, souvent externalisées vers des plateformes *cloud*, ce qui soulève des questions d'empreinte énergétique propre et de sobriété computationnelle (Strubell et al., 2019 ; MIT Technology Review, 2019).

Enfin, l'opacité croissante de certains modèles (en particulier les réseaux profonds et les chaînes d'optimisation couplées à des métamodèles) rend plus difficile la compréhension des raisons pour lesquelles certaines solutions sont privilégiées. Plusieurs travaux insistent sur la nécessité de maintenir une explicabilité minimale des critères et des pondérations, afin d'éviter une délégation excessive du jugement architecturale aux algorithmes (Panissod, 2019 ; Dignum, 2019). Dans cette perspective, la valeur ajoutée de l'IA en conception ne réside pas uniquement dans la puissance des algorithmes, mais dans la capacité des concepteurs à formuler correctement le problème (variables, indicateurs, contraintes), à interpréter de manière critique les solutions proposées et à les replacer dans des enjeux plus larges de sobriété et de gouvernance du numérique (Nagy et al., 2017 ; Elwy & Hagishima, 2024).

3.1.2 Phase de construction : optimisation des flux et réduction des déchets

En phase de chantier, les usages numériques restent encore hétérogènes et souvent expérimentaux : il est donc nécessaire de distinguer, d'une part, l'automatisation « classique » (suivi logistique, traçabilité, planification outillée) et, d'autre part, les applications d'intelligence artificielle au sens strict, fondées sur des modèles prédictifs ou de reconnaissance automatique.

Sur le volet logistique, de nombreuses solutions se limitent à un suivi numérique des livraisons, des stocks ou des plannings (codes-barres, RFID, plateformes de suivi), sans mobiliser d'IA proprement dite. Dans certains projets pilotes, ces systèmes sont couplés à des modèles prédictifs qui cherchent à anticiper les besoins en matériaux, lisser les livraisons et réduire les trajets à vide, afin de limiter l'empreinte carbone associée aux flux de chantier (Bock & Linner, 2015 ; Sawhney et al., 2020). Ces approches supposent toutefois des données d'entrée fiables (planning consolidé, cadences réelles, capacités des fournisseurs) et une coordination fine entre acteurs, ce qui limite pour l'instant leur généralisation à quelques chantiers très structurés.

Du côté du contrôle d'exécution, la frontière entre numérisation et IA est également nette. D'un côté, des outils « classiques » de scan 3D ou de capture 360° produisent des nuages de points ou des panoramas utilisés comme support de coordination visuelle. De l'autre, des dispositifs mobilisant de l'apprentissage automatique (classification d'images, détection d'objets, segmentation de nuages de points) cherchent à comparer automatiquement l'état « *as-built* » aux modèles « *as-planned* », à détecter des écarts, des conflits entre corps de métier ou des situations à risque (Attia et al., 2018 ; Chaillou, 2021). Lorsque les conditions sont réunies (qualité des relevés, fréquence de mise à jour, intégration dans les routines de pilotage), ces

systèmes peuvent contribuer à la qualité d'exécution et à la sécurité sur site, mais ils restent encore largement au stade de démonstrateurs ou de déploiements ciblés.

Sur le plan environnemental, ces outils sont mobilisés pour soutenir des démarches de réduction des déchets : estimation automatisée des quantités réellement mises en œuvre, suivi plus fin des flux de matériaux, identification de gisements potentiels de tri ou de réemploi. La préfabrication et l'industrialisation hors site, lorsqu'elles sont pilotées par des données de conception et de planning suffisamment robustes, peuvent réduire les pertes de matériaux et optimiser les approvisionnements en synchronisant fabrication et pose (Babinet, 2024). Ces effets restent toutefois très dépendants des filières, des modes contractuels et du degré de maturité numérique des entreprises.

Enfin, l'ensemble de ces dispositifs ; qu'ils relèvent de l'automatisation ou de l'IA au sens strict, impliquent des investissements significatifs en infrastructures numériques (capteurs, scanners, réseaux, plateformes), une interopérabilité encore imparfaite entre outils et acteurs, et une forte disparité des compétences. Dans ce contexte, la question de la sobriété des dispositifs devient un critère central : il s'agit de capter « assez » d'informations pour améliorer la décision, sans sur-instrumenter les chantiers ni multiplier des flux de données peu exploités (Panissod, 2019).

3.1.3 Phase d'exploitation : vers le bâtiment auto-adaptatif

En phase d'exploitation, le bâtiment devient un écosystème de données au sein duquel l'IA joue un rôle central dans la régulation énergétique et le pilotage des usages. Il est utile de distinguer les systèmes de gestion technique du bâtiment (GTB) « classiques » de ceux qui intègrent des briques d'IA et de jumeau numérique. Dans un GTB classique, la régulation repose principalement sur des lois de commande prédéfinies (consignes fixes, plages horaires, seuils de température), éventuellement ajustées par quelques scénarios d'occupation. À l'inverse, un GTB couplé à des algorithmes d'apprentissage et à un jumeau numérique vise un contrôle prédictif et une optimisation continue, en ajustant les consignes au fil des données mesurées et des comportements observés (Yu et al., 2021).

Les systèmes de gestion technique du bâtiment, alimentés par des capteurs mesurant en continu des paramètres environnementaux (température, humidité, CO₂, luminosité) et des taux d'occupation, permettent déjà d'ajuster dynamiquement les équipements de chauffage, de ventilation, de climatisation et d'éclairage (Yu et al., 2021). Ces régulations peuvent générer des économies d'énergie significatives par rapport à un pilotage conventionnel, tout en améliorant la stabilité des conditions de confort (Michalakopoulos et al., 2023 ; Usman et al., 2024 ; Hubert, 2024).

Au-delà de cette régulation, le jumeau numérique (*digital twin*) prolonge ces dispositifs. Il s'agit

d'un modèle numérique dynamique du bâtiment, couplé à des flux de données en temps réel, qui permet de simuler et d'anticiper le comportement énergétique, les conditions de confort ou l'usure des équipements en fonction de scénarios d'usage et de conditions climatiques (Jalia et al., 2018 ; Pan & Zhang, 2021). Dans ce cadre, l'IA est mobilisée pour calibrer le jumeau à partir des données mesurées, détecter les dérives de performance, optimiser les consignes de pilotage et proposer des actions de maintenance prédictive.

Les approches d'apprentissage automatique renforcent ainsi les performances opérationnelles par des stratégies prédictives : les modèles apprennent des usages passés pour anticiper les besoins futurs, adapter les consignes de CVC et d'éclairage ou identifier des anomalies avant qu'elles ne se traduisent par des surconsommations ou des pannes (Yu et al., 2021 ; Michalakopoulos et al., 2023). Des réalisations emblématiques de bâtiments tertiaires intelligents montrent comment la combinaison capteurs-GTB-jumeau numérique peut améliorer simultanément le confort des usagers, l'efficacité énergétique et la durée de vie des équipements grâce à la maintenance prédictive et à un pilotage plus fin des services (Jalia et al., 2018).

Cette hyperconnectivité induit toutefois une consommation numérique propre, liée aux réseaux, aux serveurs locaux, au stockage des données, aux plateformes *cloud* et au calcul nécessaire pour faire fonctionner et alimenter le jumeau numérique. Ces charges énergétiques restent souvent absentes des bilans environnementaux des bâtiments, illustrant la tension entre gains opérationnels (*IT for Green*) et dépendance à un socle numérique énergivore (*Green IT*), au cœur des enjeux abordés dans la suite du travail (IEA, 2023 ; OECD, 2022).

3.1.4 Phase de déconstruction et d'économie circulaire

En fin de cycle de vie, l'intelligence artificielle ouvre des perspectives nouvelles pour la valorisation et le réemploi des matériaux, même si ces dispositifs restent pour l'instant largement au stade d'expérimentations pilotes et de recherches académiques (Gordon et al., 2023 ; Çetin et al., 2022). Comme pour la phase de chantier, il est utile de distinguer la simple numérisation (relevés 3D utilisés comme support visuel) des approches mobilisant effectivement de l'IA. Dans un premier cas, les campagnes de scan 3D ou de *laser scanning* produisent des nuages de points denses qui servent de base à des relevés géométriques et à des diagnostics classiques. Dans un second cas, ces nuages de points sont couplés à des algorithmes de segmentation et de classification automatiques, qui identifient et catégorisent les éléments constructifs (murs, planchers, menuiseries, réseaux techniques) afin de repérer les composants potentiellement récupérables et de planifier des opérations de démontage sélectif (Croce et al., 2023 ; Chaillou, 2021).

Le *scan-to-BIM* s'inscrit au cœur de ces *workflows* : les relevés 3D sont convertis en modèles

BIM ou *H-BIM* structurés, dans lesquels les objets reconnus sont enrichis d'attributs géométriques, matériels et fonctionnels. Des travaux récents montrent comment des réseaux de neurones convolutifs et des méthodes de vision par ordinateur peuvent automatiser, au moins partiellement, la conversion de nuages de points en objets *H-BIM*, réduisant le temps de modélisation et augmentant la complétude des inventaires (Croce et al., 2021 ; Cotella, 2023). Combiné à des bases de données matériaux et à des critères d'analyse de cycle de vie, ce processus facilite la constitution d'inventaires matière détaillés, la hiérarchisation des éléments selon leur potentiel de réemploi ou de recyclage de qualité, et la traçabilité des composants réemployables (Babinet, 2024 ; Mullen, 2023). Plusieurs études soulignent qu'il devient ainsi possible d'estimer les impacts environnementaux évités (kgCO₂, consommation de ressources) en comparant différents scénarios de démolition, de réemploi ou de recyclage (Çetin et al., 2022 ; Zhou, 2025).

Ces approches restent toutefois confrontées à des incertitudes techniques sur la qualité et l'état des éléments déposés (dégradation, hétérogénéité des assemblages, présence de polluants), à des coûts logistiques élevés liés au démontage, au stockage et au transport, ainsi qu'à un cadre réglementaire encore inégal pour le réemploi structurel ou hors site (Çetin et al., 2022). L'adoption de ces outils se heurte également à des freins organisationnels : maturité variable des filières de réemploi, manque de standardisation des formats et des protocoles d'échange, et nécessité de coordonner de nombreux acteurs (maîtres d'ouvrage, bureaux d'études, entreprises de déconstruction, plateformes de réutilisation) (Nordic Council of Minister [Nordregio], 2023 ; Mullen, 2023).

Du point de vue de la durabilité, ces dispositifs prolongent la durée de vie des ressources matérielles et soutiennent des stratégies d'économie circulaire en rendant visibles les stocks de matériaux incorporés dans le bâti (*IT for Green*) (Gordon et al., 2023). Mais ils renforcent également la dépendance à des infrastructures numériques nécessitant un suivi et une mise à jour continus : campagnes de scan répétées, stockage de nuages de points volumineux, recalage régulier des modèles, hébergement de bases de données et de plateformes d'échange (Bourbia et al., 2023 ; Panissod, 2019). L'empreinte énergétique et matérielle de ce socle numérique reste encore peu intégrée dans les évaluations, illustrant à nouveau la tension entre gains environnementaux potentiels en fin de vie et coûts propres du numérique, au cœur de la problématique *IT for Green / Green IT* développée dans ce travail (OECD, 2022 ; MIT OpenCourseWare, 2023).

3.1.5 Synthèse critique : trois modes récurrents d'intégration de l'IA

L'analyse transversale de la littérature ne fait pas apparaître une forme unique d'intelligence artificielle dans le bâti, mais plutôt trois logiques récurrentes d'intégration de l'IA tout le long du cycle de vie du bâtiment. Ces logiques se distinguent par leur position dans le processus, leur niveau d'autonomie et la nature des décisions qu'elles influencent :

- Une IA d'aide à la conception, orientée vers l'exploration de variantes et l'objectivation de compromis en phase de projet ;
- Une IA de pilotage opérationnel, mobilisée pour la régulation prédictive et l'optimisation continue en phase d'exploitation ;
- Une IA de support à la circularité, utilisée pour la cartographie des ressources incorporées et la préparation du réemploi en fin de vie.

La première logique correspond aux outils de conception paramétrique, générative et d'optimisation multicritère qui assistent les architectes et ingénieurs dans l'exploration de l'espace des solutions et dans l'évaluation de leurs performances environnementales, énergétiques et fonctionnelles. Elle prolonge les pratiques du *Computational Design* décrites par de Boissieu (2022), où *parametric, generative et algorithmic design* sont analysés comme trois sous-ensembles structurants d'une conception fondée sur la pensée computationnelle plutôt que sur le simple « compute-r-aided design ». Dans cette logique, l'IA ne remplace pas la décision, mais élargit la gamme de configurations envisageables et rend plus explicites certains compromis, tout en restant fortement dépendante du cadrage des objectifs, des données et des contraintes (Attia et al., 2018 ; Elwy & Hagishima, 2024).

La deuxième logique renvoie aux dispositifs de régulation intelligente et de jumeau numérique, dans lesquels l'IA est intégrée au pilotage quotidien des systèmes techniques : contrôle prédictif du CVC et de l'éclairage, adaptation aux usages réels, détection d'anomalies et maintenance prédictive. Ici, l'IA agit comme un acteur opérationnel au cœur du fonctionnement du bâtiment, avec des impacts directs sur les consommations énergétiques, le confort et les modalités de gestion (Yu et al., 2021 ; Jalia et al., 2018). Le bâtiment devient un système auto adaptatif où les décisions de contrôle sont de plus en plus déléguées à des modèles d'apprentissage automatique, en s'appuyant sur des flux continus de données issues de capteurs et de plateformes numériques.

La troisième logique, encore émergente, concerne les *workflows* de *scan-to-BIM* augmentés par l'IA, qui visent à rendre visibles les stocks de matériaux, à identifier des éléments réemployables et à soutenir la planification de déconstruction sélective. Dans ce cas, l'IA n'est pas « circulaire » en elle-même, mais elle joue un rôle de support à la circularité en rendant techniquement et cognitivement accessibles des informations qui conditionnent le réemploi et la réduction des déchets (Gordon et al., 2023 ; Çetin et al., 2022). La valeur ajoutée réside dans la capacité à produire des inventaires matière plus complets, à hiérarchiser les éléments selon leur potentiel de réemploi et à estimer les impacts environnementaux évités en comparant différents scénarios de fin de vie (Zhou, 2025).

Ces trois logiques traduisent une évolution progressive du rôle assigné à l'IA : d'un outil d'exploration et d'assistance à la décision en conception, à un dispositif de pilotage opérationnel en exploitation, puis à un instrument de mise en visibilité des ressources matérielles en fin de

vie. Elles confirment le potentiel de l'IA comme levier d'efficacité environnementale du bâti, mais mettent également en évidence une dépendance croissante à un socle numérique énergivore et matériellement intensif. (OECD, 2022 ; IEA, 2023). L'empreinte propre de ce socle reste encore insuffisamment intégrée aux cadres d'évaluation existants, qui continuent de se focaliser principalement sur les performances du bâtiment sans considérer les coûts environnementaux du numérique qui les rendent possibles.

C'est ce paradoxe entre gains mesurés ou projetés à l'échelle du bâtiment (*IT for Green*) et empreinte environnementale des infrastructures numériques (*Green IT*) qui constitue l'objet du chapitre suivant, consacré aux coûts énergétiques et matériels du numérique et aux limites des approches actuelles.

3.2 Les coûts environnementaux et matériels du numérique (*Green IT*)

Si l'intelligence artificielle est largement présentée comme un levier d'optimisation environnementale du bâti, elle repose elle-même sur une infrastructure numérique énergivore et matériellement intensive. Dans ce travail, le terme de « bâtiment intelligent » ne désigne pas un label unique, mais un ensemble de configurations où le bâtiment est fortement instrumenté (capteurs, GTB, réseaux *IP*, plateformes logicielles) et où une part croissante des décisions de pilotage repose sur des traitements de données automatisés ou sur des modèles d'IA.

Son déploiement à grande échelle dans les bâtiments intelligents (capteurs connectés, réseaux de communication, serveurs locaux, plateformes *cloud* et systèmes de stockage) engendre une consommation significative de ressources et d'énergie, encore largement occultée dans les discours sur l'innovation durable (IEA, 2023 ; OECD, 2022 ; Strubell et al., 2019).

Dans une perspective de *Green IT*, il s'agit dès lors de considérer l'empreinte écologique propre de ces technologies afin d'évaluer leur contribution réelle à la durabilité architecturale. Cette approche invite à dépasser une lecture strictement fonctionnelle de l'IA, centrée sur ses bénéfices opérationnels, pour adopter une vision systémique intégrant les externalités énergétiques, matérielles et organisationnelles du numérique. (Babinet, 2024 ; UNEP, 2022).

3.2.1 L'empreinte énergétique des infrastructures numériques

Le fonctionnement des systèmes d'intelligence artificielle dépend étroitement des centres de données, qui constituent les nœuds énergétiques de l'économie numérique contemporaine. Selon l'Agence internationale de l'énergie, les *data centers* représentent environ 1 % de la consommation mondiale d'électricité (240-340 TWh/an), une part appelée à doubler d'ici 2026 avec la généralisation des usages IA (IEA, 2023).

Ces infrastructures nécessitent un fonctionnement 24/7 et des dispositifs de refroidissement énergivores (jusqu'à 40 % de leur consommation totale) générant une dépense indirecte importante. Dans le contexte architectural, les applications comme les simulations bioclimatiques (ex. *Ladybug* pour analyse climatique), la conception générative (ex. *Autodesk Generative Design*) ou la gestion énergétique prédictive reposent sur ces calculs intensifs, dont l'empreinte énergétique est rarement explicitée dans les évaluations environnementales des projets (Pachot & Patissier, 2022 ; OECD, 2022).

L'énergie mobilisée provient encore majoritairement de sources non renouvelables (60 % du mix *data centers*), contribuant à des émissions significatives de gaz à effet de serre (Broadsword group, 2024 ; GoodPlanet, 2024). À titre d'illustration, Strubell et al. (2019) estiment que l'entraînement de certains modèles de grande taille génère jusqu'à 284 tonnes de CO₂, soit l'équivalent des émissions cumulées de 5 voitures moyennes sur leur cycle de vie. Bien que les modèles du secteur du bâtiment soient généralement plus modestes, ces ordres de grandeur rappellent la nécessité de contextualiser les gains énergétiques annoncés au regard des coûts réels du calcul algorithmique (MIT Technology Review, 2019).

3.2.2 L'impact matériel : extraction, production et obsolescence

Au-delà de la consommation énergétique, l'intelligence artificielle repose sur une infrastructure matérielle complexe comprenant capteurs *IoT*, processeurs, serveurs haute performance, dispositifs de stockage et équipements de réseau. La production et le transport de ces équipements représenteraient environ 5,5 % des émissions totales du numérique mondial (Broadsword group, 2024).

La fabrication de ces composants implique l'extraction et le raffinage de métaux rares et stratégiques (lithium, cobalt, tantale, néodyme) souvent issus de chaînes d'approvisionnement peu transparentes et socialement problématiques (un seul serveur haut de gamme nécessite ~1,5 kg de métaux rares) (UNEP, 2022). Cette matérialité du numérique entre en tension directe avec les principes de l'architecture durable, qui visent à limiter la consommation de ressources non renouvelables et à favoriser des cycles de vie longs (Broadsword group, 2024).

La dépendance croissante à ces équipements introduit également un risque d'obsolescence rapide. La durée de vie moyenne des dispositifs électroniques est inférieure à cinq ans, un horizon temporel sans commune mesure avec celui du bâti. Par ailleurs, moins de 1 % des métaux rares contenus dans les équipements électroniques sont effectivement recyclés, alimentant un cycle d'extraction et de remplacement incompatible avec les logiques de circularité et de résilience recherchées en architecture (INR, 2019).

3.2.3 L'infrastructure invisible : réseaux, stockage et circulation des données

L'empreinte environnementale du numérique ne se limite ni au calcul ni au matériel : elle réside également dans la circulation continue des données (Schwartz et al., 2020 ; INR, 2019 ; OECD, 2022). Les architectures combinant *cloud computing* et *edge computing* reposent sur des flux permanents d'information entre capteurs, serveurs locaux et centres de données distants (UN-Habitat, 2022 ; Flaih, 2022 ; IEA, 2023).

Chaque requête, synchronisation ou mise à jour génère une dépense énergétique, généralement invisible à l'échelle de l'utilisateur final (INR, 2019). Dans les bâtiments tertiaires intelligents, des milliers de capteurs transmettent en continu des données relatives à l'environnement intérieur, à l'occupation ou à la maintenance (Elwy & Hagishima, 2024). Cette hyper-connectivité, si elle améliore la gestion énergétique et le confort, induit une consommation numérique structurelle rarement intégrée aux bilans énergétiques et carbone des bâtiments (ADEME, 2025 ; OECD, 2022).

L'évaluation du cycle de vie numérique (depuis la production des équipements jusqu'au traitement, au stockage et à l'archivage des données) apparaît dès lors comme un enjeu central pour éviter un simple déplacement des impacts. Une optimisation énergétique locale peut ainsi s'accompagner d'une dégradation globale du bilan environnemental, du fait de l'énergie consommée en amont par les infrastructures numériques (MIT OpenCourseWare, 2023).

3.2.4 Vers une approche de « Green IA »

Face à ces constats, plusieurs travaux et initiatives plaident pour le développement d'une intelligence artificielle plus sobre, souvent désignée sous le terme de *Green IA* (Nexa, 2025). Toutefois, cette notion fait également l'objet de critiques, elle peut relever d'une forme de "greenwashing" lorsque les gains d'efficacité mis en avant masquent une augmentation globale des usages et des infrastructures numériques.

Dans sa définition la plus ambitieuse, cette approche vise à concevoir des modèles capables d'atteindre des performances comparables tout en réduisant la puissance de calcul, la consommation énergétique et les besoins matériels (Actualité UQAM, 2025). Des stratégies concrètes émergent, telles que le recours à des modèles plus frugaux, l'entraînement local plutôt que sur des plateformes *cloud*, la mutualisation des ressources de calcul ou l'alimentation des centres de données par des sources d'énergie renouvelable (Nexa, 2025). L'*edge computing*, en traitant les données au plus près des capteurs, offre également des perspectives intéressantes pour limiter les transferts massifs de données et réduire la dépendance aux infrastructures centralisées (Babinet, 2024 ; IEA, 2023).

Toutefois, ces approches restent encore marginales dans le secteur du bâtiment, où la priorité est souvent accordée à la performance fonctionnelle et à la complexification des systèmes

plutôt qu'à la sobriété numérique. Cette remise en question est également portée par le milieu académique, comme en témoigne une conférence de l'Université de Liège (2025) qui insiste sur la nécessité d'adopter une approche critique, sobre et soutenable du numérique, loin des discours technosolutionnistes (Université de Liège, 2025).

Le véritable enjeu du *Green IT* ne réside donc pas uniquement dans l'optimisation technique des algorithmes, mais dans une réflexion plus large sur les usages pertinents de l'automatisation : quand, pourquoi et jusqu'où faut-il mobiliser l'IA dans les projets architecturaux ?

3.2.5 Synthèse intermédiaire

L'intelligence artificielle ne peut ainsi être considérée comme un outil neutre ou immatériel. Elle repose sur une infrastructure énergivore, matériellement intensive et socialement située, dont les impacts environnementaux restent largement sous-évalués dans les projets de bâtiments intelligents. Dans les configurations les plus avancées, cette infrastructure prend la forme de jumeaux numériques : des modèles numériques dynamiques couplés à des données en temps réel, qui agrègent des informations issues du *BIM*, des systèmes de gestion technique (GTB) et des capteurs *IoT*. Ces jumeaux sont au cœur de nombreuses promesses associées aux *smart buildings* (optimisation continue, maintenance prédictive, scénarios d'usage), mais ils renforcent aussi la centralité des plateformes, du stockage et des flux de données dans le bilan environnemental du projet.

Mettre en regard les bénéfices environnementaux promis par l'IA et les externalités du numérique apparaît indispensable pour éviter que l'optimisation du bâti ne se traduise par un simple déplacement des impacts. Cette tension entre performance environnementale du bâti et empreinte numérique appelle désormais une réflexion sur les cadres de gouvernance, les outils d'évaluation et les dispositifs décisionnels capables d'arbitrer ces compromis à l'échelle du projet architectural.

3.3 Vers un numérique responsable : cadres de gouvernance et limites des approches existantes

La tension mise en évidence entre les bénéfices environnementaux de l'intelligence artificielle appliquée au bâti et l'empreinte écologique du numérique appelle un renouvellement des cadres d'analyse et de gouvernance. Plutôt que d'opposer innovation technologique et sobriété environnementale, plusieurs travaux proposent d'inscrire l'IA dans une approche de numérique responsable, fondée sur la transparence des usages, la maîtrise des impacts et la responsabilité des acteurs impliqués (UNESCO, 2021 ; Dignum, 2019).

Cette approche, mobilisée dans différents secteurs, vise à articuler les logiques du *IT for Green* (usage du numérique comme levier d'amélioration environnementale) et du *Green IT* (réduction de l'empreinte propre des technologies numériques). Elle repose généralement sur trois dimensions complémentaires : la soutenabilité écologique, la responsabilité éthique et la résilience des pratiques professionnelles.

3.3.1 Soutenabilité écologique et sobriété numérique

La première dimension concerne la réduction de l'empreinte environnementale des systèmes d'IA sur l'ensemble de leur cycle de vie, depuis la conception des dispositifs jusqu'à leur fin de vie (Schwartz et al., 2020 ; INR, 2019). Dans le champ de l'architecture, cette perspective conduit à interroger la pertinence des choix technologiques opérés dans les projets de bâtiments intelligents : niveau d'instrumentation, architecture des systèmes (traitement local ou *cloud*), fréquence des calculs ou volume de données collectées (UN-Habitat, 2022 ; Elwy & Hagishima, 2024 ; Panissod, 2019).

Plusieurs travaux mettent en avant le principe de sobriété numérique, entendu comme un usage raisonné et proportionné des technologies, fondé sur la recherche d'un rapport favorable entre bénéfices environnementaux et coûts numériques (Babinet, 2024 ; OECD, 2022 ; Hubert, 2024). Des pistes sont ainsi évoquées : recours à des modèles plus frugaux (Strubell et al., 2019), mutualisation des infrastructures (IEA, 2023), allongement de la durée de vie des équipements ou limitation des usages non essentiels (Pachot & Patissier, 2022 ; Nexa, 2025).

Toutefois, ces principes restent souvent formulés de manière générale et peinent à être traduits en critères opérationnels à l'échelle du projet architectural. La question des effets rebond, régulièrement soulignée dans la littérature, illustre cette difficulté : les gains d'efficacité permis par l'automatisation peuvent être partiellement annulés par une augmentation des usages, une sur-instrumentation des espaces ou une élévation des niveaux de confort attendus (UNEP, 2022).

3.3.2 Responsabilité éthique et gouvernance des données

La deuxième dimension du numérique responsable concerne les enjeux éthiques et la gouvernance des données. Dans les bâtiments intelligents, la collecte continue d'informations relatives aux usages et aux comportements des occupants soulève des questions de vie privée, de transparence et de consentement (Pluchart & Bonnet, 2022 ; UNESCO, 2021).

Les systèmes d'IA mobilisés dans ce contexte reposent fréquemment sur des algorithmes peu explicites, dont les logiques de décision restent difficiles à interpréter par les concepteurs, les exploitants ou les usagers. L'exigence d'explicabilité apparaît dès lors comme un enjeu central, non seulement pour des raisons éthiques, mais également pour garantir la maîtrise et la

légitimité des décisions automatisées (Panissod, 2019).

Par ailleurs, la dépendance à des fournisseurs de solutions logicielles ou de services *cloud* peut entraîner des situations de captivité technologique, limitant l'autonomie des acteurs du projet architectural (Panissod, 2019 ; Sawhney et al., 2020). La littérature souligne ainsi l'importance de l'interopérabilité des systèmes, de la standardisation des formats de données et de la traçabilité des choix techniques (Pan & Zhang, 2021 ; UN-Habitat, 2022 ; Panissod, 2019), sans pour autant proposer de cadres unifiés permettant d'intégrer ces enjeux dans les processus décisionnels du projet (Dignum, 2019 ; OECD, 2019 ; Flaih, 2022).

3.3.3 Résilience des pratiques et transformation des métiers

Enfin, le développement de l'IA dans l'architecture interroge les transformations des pratiques professionnelles et la place de l'architecte dans les processus de décision. Si les outils d'IA peuvent renforcer les capacités d'analyse et d'anticipation, ils peuvent également réduire l'autonomie critique des concepteurs lorsque les dispositifs sont utilisés de manière prescriptive ou insuffisamment maîtrisée (Floridi, 2023 ; Dignum, 2019).

Plusieurs auteurs soulignent la nécessité de développer une culture numérique critique, permettant aux professionnels de comprendre les logiques, les biais et les limites des systèmes algorithmiques qu'ils mobilisent (Commission nationale d'éthique, 2024). Toutefois, ces réflexions restent souvent cantonnées à des recommandations générales, sans articulation directe avec les outils d'évaluation environnementale ou les cadres de gouvernance du projet architectural.

3.4 Synthèse critique de l'état de l'art

L'état de l'art met ainsi en évidence un paradoxe central : l'intelligence artificielle apparaît à la fois comme un levier d'optimisation environnementale du bâti et comme une source d'impacts énergétiques, matériels et sociaux encore largement sous-évalués. Si les bénéfices du *IT for Green* sont abondamment documentés, les coûts du *Green IT* et les enjeux de gouvernance associés demeurent traités de manière fragmentée.

Malgré la multiplication des normes, labels et cadres de référence relatifs à la performance environnementale du bâti ou au numérique responsable, aucun outil ne permet aujourd'hui d'articuler de manière intégrée ces dimensions à l'échelle du projet architectural. L'absence de dispositifs opérationnels capables de rendre comparables les bénéfices environnementaux de l'IA et les externalités du numérique justifie le développement d'une approche méthodologique complémentaire.

Le début de ce travail a permis de mettre en évidence le potentiel de l'intelligence artificielle

comme levier d'amélioration de la performance environnementale du bâti, tout en soulignant les coûts énergétiques, matériels et organisationnels associés aux infrastructures numériques qui la soutiennent. L'analyse de la littérature, confirme la tension persistante entre les logiques de *IT for Green* et de *Green IT*... C'est pour répondre à ce déficit que la suite du travail s'attache à synthétiser ces enseignements sous la forme d'une grille d'analyse qualitative. Cet outil visera à rendre opérationnels les critères de vigilance identifiés ici (matérialité, sobriété, gouvernance) avant de les confronter à la réalité des études de cas.

Au regard des limites identifiées dans la littérature, il devient nécessaire de structurer une approche méthodologique permettant d'analyser concrètement ces tensions.

4. Méthodologie

4.1 Positionnement de la recherche

Ce travail adopte une approche qualitative, exploratoire et critique, par étude de cas, visant à analyser comment l'intégration de l'intelligence artificielle dans des bâtiments tertiaires dits « intelligents » reconfigure l'équilibre entre bénéfices environnementaux et impacts numériques propres. L'objectif n'est pas de produire une mesure exhaustive de la durabilité des systèmes d'IA appliqués à l'architecture, mais de comprendre, à l'échelle du projet architectural, dans quelles conditions ces technologies constituent un levier pertinent de transition écologique, et dans quelles situations elles peuvent déplacer ou amplifier les impacts environnementaux. À l'issue de cet état de l'art, il apparaît que les bénéfices environnementaux de l'intelligence artificielle ne peuvent être analysés indépendamment de leurs coûts numériques et des conditions de leur gouvernance. Cette tension justifie la mise en place d'un cadre méthodologique permettant de rendre ces dimensions comparables à l'échelle du projet architectural.

La recherche mobilise une lecture croisée du cycle de vie du bâtiment (conception, construction, exploitation, fin de vie) et du cycle de vie numérique des systèmes d'IA (infrastructures matérielles, calcul, stockage et circulation des données), afin de rendre visibles des impacts généralement traités de manière dissociée dans la littérature et les outils d'évaluation existants.

4.2 Cadre d'analyse: articulation IT for Green et Green IT

L'analyse repose sur la distinction entre deux dimensions complémentaires, mobilisées tout au long du travail :

- Le *IT for Green*, qui désigne l'usage de l'intelligence artificielle et des outils numériques pour améliorer la performance environnementale du bâti, notamment

en matière d'efficacité énergétique, de confort d'usage et de sobriété matérielle (voir section 3.1).

- Le *Green IT*, qui concerne la réduction de l'empreinte énergétique et matérielle des infrastructures numériques nécessaires au fonctionnement de ces systèmes (voir section 3.2).

Cette distinction permet d'aborder la durabilité non comme une maximisation technologique, mais comme un équilibre à construire entre gains environnementaux et coûts numériques. L'analyse ne présuppose pas un bilan favorable ou défavorable de l'IA, mais s'attache à identifier, pour chaque situation étudiée, les arbitrages opérés et les conditions de leur pertinence du point de vue environnemental, organisationnel et éthique.

Au-delà de cette distinction conceptuelle, le choix d'une approche par critères répond à un enjeu spécifique de ce travail : rendre observables des dimensions qui, aujourd'hui, sont évaluées séparément. Les bénéfices environnementaux de l'IA (réduction des consommations, amélioration du confort, appui au réemploi) et les coûts numériques associés (consommations *IT*, volumes de données, obsolescence des infrastructures) ne sont que rarement mis sur une même scène d'analyse. L'usage de critères constitue ici un compromis méthodologique : suffisamment structuré pour éclairer les arbitrages de projet, mais suffisamment souple pour intégrer des dimensions qualitatives et organisationnelles qui relèvent des sciences humaines plutôt que de l'ingénierie pure.

Le cadre d'analyse proposé constitue le socle conceptuel sur lequel s'appuiera, dans la suite du travail, l'élaboration d'une grille de critères destinée à soutenir des décisions de conception et de gouvernance plus sobres et transparentes.

4.3 Dispositif méthodologique

Afin de répondre à la question de recherche, la démarche méthodologique repose sur différents outils complémentaires :

- Analyse de la littérature, mobilisant un corpus d'articles scientifiques, de rapports institutionnels, de normes et de documents techniques. Cette analyse permet de clarifier les usages de l'IA en architecture, les cadres existants d'évaluation environnementale, ainsi que les controverses liées aux impacts du numérique ;
- Études de cas, visant à observer de manière située comment des projets de bâtiments tertiaires intelligents intègrent l'intelligence artificielle à différentes phases de leur cycle de vie, et comment sont articulés les objectifs de performance environnementale et les choix numériques ;
- Posture réflexive et analytique, consistant à mettre systématiquement en tension

les bénéfices environnementaux revendiqués et les ressources numériques mobilisées, afin d'éviter une lecture strictement solutionniste ou technophile.

L'enjeu n'est pas de produire une vérité définitive sur la balance coûts-bénéfices de l'IA, mais de construire une grille de lecture critique et transférable, fondée sur des observations empiriques et des cadres conceptuels reconnus.

Dans ce cadre, la grille d'analyse est un instrument de mise en forme de questions déjà politiques : quels bénéfices juge-t-on acceptables, pour quels coûts numériques, et au bénéfice de quels acteurs ? Elle cherche à éclairer des arbitrages souvent implicites, dispersés entre concepteurs, exploitants, fournisseurs et maîtres d'ouvrage. La grille est présentée précisément dans la partie 5.

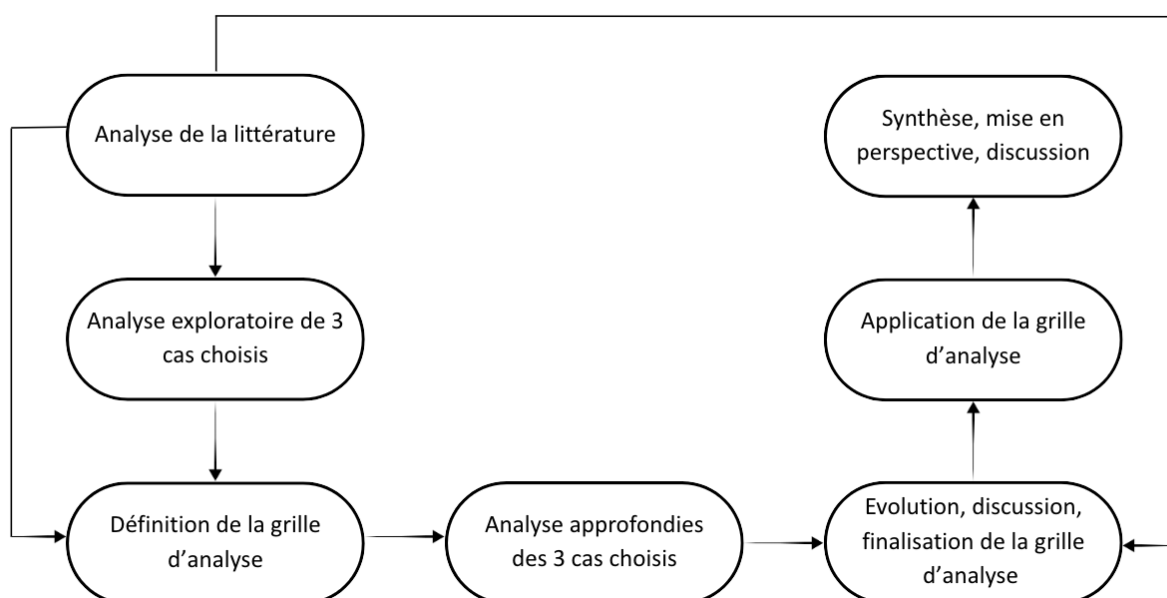


Figure 1 : Schéma méthodologique : aller-retour entre théorie, grille et cas

La démarche méthodologique n'a pas été strictement linéaire, mais itérative. Dans un premier temps, l'analyse de la littérature et un premier repérage exploratoire des cas de bâtiments tertiaires intelligent ont permis de dégager les principales tensions liées à l'usage de l'intelligence artificielle dans le bâti : bénéfices environnementaux, empreinte numérique et enjeux de gouvernance.

À partir de ces premiers constats, une grille d'analyse a été construite afin de formaliser ces tensions sous forme de critères. Cette grille a ensuite été confrontée aux études de cas explorés ce qui a conduit à ajuster certains critères et objectifs à en préciser la portée ou à écarter ceux qui apparaissaient trop génériques ou difficilement applicables aux données disponibles.

La grille présentée dans ce travail est donc le résultat d'un aller-retour entre cadre théorique, observation des cas et reformulation des critères d'analyse. Elle ne précède pas entièrement les études de cas, mais se construit progressivement avec elles, avant d'être stabilisée pour permettre l'analyse comparative.

4.4 Sélection et analyse des études de cas

Les études de cas ont été sélectionnées selon des critères qualitatifs ciblés sur les bâtiments tertiaires intelligents, visant à garantir la cohérence de l'analyse et la diversité des situations observées. Les projets répondent aux critères suivants : démarche environnementale explicite, revendiquant des objectifs de performance énergétique, réduction des émissions carbone ou économie circulaire ; intégration identifiable et documentée de l'intelligence artificielle en phase de conception (conception générative, optimisation énergétique via *Grasshopper*, *Autodesk Generative Design*) ou d'exploitation (GTB intelligents, maintenance prédictive, gestion énergétique temps réel) ; documentation accessible incluant publications scientifiques, rapports techniques ou données de performance ; diversité des stratégies numériques, couvrant dispositifs fortement instrumentés, approches *smart building* intermédiaires et formes sobres ou expérimentales.

Trois cas ont été retenus pour leur diversité et leur pertinence. *The Edge* à Amsterdam représente le smart building paradigmatique : intégration poussée de l'IA en conception et en exploitation, avec une documentation scientifique abondante. *Autodesk Toronto* illustre une approche plus sobre, fondée notamment sur le recours à l'*edge computing* (traitement local des données), ainsi que sur une certaine transparence des performances numériques. Enfin, *TU Delft* (campus ou bâtiment spécifique) a été retenu pour son approche expérimentale, développant des solutions d'intelligence artificielle frugales dans un contexte de recherche universitaire.

L'analyse de ces cas mobilise le cadre *IT for Green* et *Green IT* afin d'identifier les dispositifs d'intelligence artificielle mis en œuvre, les bénéfices environnementaux associés, les ressources numériques mobilisées et les modalités de gouvernance. Elle vise à expliciter les arbitrages qui sous-tendent l'intégration de l'IA dans chaque situation (niveau d'instrumentation, architecture numérique, priorités environnementales, dépendance technologique).

Dans la mesure où les trois cas étudiés mobilisent l'IA à des étapes différentes du cycle de vie du bâtiment, l'ensemble des critères n'est pas systématiquement applicable à chaque situation. L'analyse repose donc sur une sélection raisonnée des critères, en fonction des dispositifs effectivement déployés et des données accessibles. Les critères sont mobilisés selon trois modalités complémentaires : quantitatives, estimatives et qualitatives, afin de

rendre compte à la fois des performances mesurables et des dimensions organisationnelles et stratégiques. Cette approche permet d'intégrer des enjeux souvent absents des outils d'évaluation classiques, tels que la gouvernance des données, la dépendance aux infrastructures numériques ou la capacité d'arbitrage des acteurs.

L'analyse vise ainsi à identifier, pour chaque cas, la manière dont s'articulent concrètement les bénéfices environnementaux, les impacts numériques et les modalités de gouvernance.

5. Proposition d'une grille d'analyse de la gouvernance de l'IA pour des projets durables

La grille d'analyse proposée dans ce travail est mobilisée comme un outil de structuration de l'analyse des projets architecturaux intégrant de l'intelligence artificielle. Elle vise à mettre en relation les bénéfices environnementaux du recours à l'IA, les impacts du socle numérique mobilisé et les modalités de gouvernance des systèmes. Elle constitue le cadre d'analyse à partir duquel sont construits les critères présentés dans la suite du chapitre.

5.1 Principes de construction de la grille d'analyse

La construction de la grille repose sur un constat issu de l'analyse de la littérature et des études de cas exploratoire : les décisions relatives à l'intégration de l'intelligence artificielle dans les projets architecturaux restent souvent implicites et peu outillées. La grille vise à structurer ces arbitrages en les rendant lisibles, comparables et discutables à l'échelle du projet architectural. Elle est organisée autour de trois axes complémentaires, correspondant à la tension centrale identifiée dans ce travail.

Le premier axe, *IT for Green*, regroupe les critères relatifs aux bénéfices environnementaux associés à l'usage de l'IA : performance énergétique, confort d'usage, efficacité spatiale et gestion des flux de matière.

Le second axe, *Green IT*, vise à rendre visibles les impacts environnementaux du socle numérique mobilisé : consommation énergétique des infrastructures *IT*, volume de données, matérialité des équipements et choix d'architecture (*edge* ou *cloud*).

Le troisième axe, gouvernance, porte sur les modalités de pilotage, de décision et de responsabilité encadrant les systèmes d'IA : transparence des algorithmes, gestion des données, dépendance technologique et capacité d'intervention des acteurs.

L'approche retenue est multicritère combinant des **critères quantitatifs** (ordre de grandeur)

et **qualitatifs**, afin de rendre compte à la fois des performances mesurables et des dimensions organisationnelles et stratégiques. Les études de cas préalables ont montré que certains impacts peuvent être mesurés de manière relativement objective (consommations énergétique, volumes de données, durée de vie du matériel...) tandis que d'autres relèvent davantage d'une évaluation qualitative ou contextuelle (niveau de dépendance fournisseur, lisibilité des décisions algorithmiques, acceptabilité sociale...)

Un autre principe structurant de la grille est **son inscription dans l'ensemble du cycle de vie du bâtiment**, les critères proposés sont conçus pour être mobilisée à différentes phases de celui-ci (conception, exploitation, fin de vie) tout en reconnaissant que les bénéfices et les coûts de l'IA ne se manifestent ni avec la même intensité ni selon les mêmes temporalités. Cette approche permet de mettre en évidence les déplacements d'impact d'une phase à l'autre. Elle répond directement aux désynchronisations temporelles identifiées dans les études de cas entre durée de vie du bâti et durée de vie du numérique.

Enfin, la grille est conçue comme **un outil ouvert et évolutif**, destiné à être adapté à différents contextes de projet. Cette ouverture vise à **favoriser sa transférabilité**, elle permet également d'intégrer progressivement de nouveaux critères, à mesure que les données sur l'empreinte environnementale du numérique deviennent plus disponibles.

La force de cette grille réside dans sa capacité à croiser les axes plutôt qu'à les évaluer isolément. Un projet peut présenter des performances élevées sur le plan *IT for Green* tout en générant des coûts *Green IT* importants ou des risques de gouvernance. À l'inverse, une architecture numérique sobre peut limiter les bénéfices environnementaux attendus si les usages ne sont pas clairement définis.

La grille permet ainsi :

- D'identifier les zones de tension entre bénéfices et impacts ;
- De comparer des projets situés à des phases différentes du cycle de vie ;
- De soutenir un dialogue éclairé entre concepteurs, exploitants et décideurs.

5.2 Structure de la grille d'analyse

La structure de la grille d'analyse s'appuie sur une double démarche articulant cadre théorique et observation empirique (voir schéma de méthode section 4). Les critères ont été sélectionnés à partir de la littérature, puis ajustés en fonction de leur applicabilité aux études de cas, des dispositifs observés et des données disponibles. Cette approche a permis de retenir un ensemble de critères mobilisables à l'échelle du projet architectural, tout en tenant compte de la diversité des situations analysées.

A. *IT for Green* : bénéfices environnementaux du recours à l'IA

Les critères associés à l'axe *IT for Green* visent à rendre compte des bénéfices environnementaux potentiels liés à l'intégration de l'intelligence artificielle dans les projets architecturaux. La littérature identifie plusieurs leviers principaux à travers lesquels l'IA peut contribuer à la durabilité du bâti : l'optimisation énergétique, l'amélioration du confort d'usage, l'efficacité spatiale et la réduction des flux de matière (Attia et al., 2018 ; Elwy & Hagishima, 2024).

Le premier ensemble de critères concerne la **performance énergétique**, qui constitue l'un des apports les plus documentés de l'IA dans le secteur du bâtiment. L'évolution de la **consommation énergétique** (kWh/m².an) permet d'évaluer les gains réels ou simulés associés aux dispositifs d'optimisation, qu'ils interviennent en phase de conception (simulation, conception générative) ou en phase d'exploitation (pilotage prédictif des systèmes techniques). Ce critère est complété par l'analyse du **lissage de la courbe de charge**, qui renseigne sur la capacité des systèmes intelligents à réduire les pics de consommation et à s'adapter aux contraintes du réseau énergétique, un enjeu croissant dans les systèmes énergétiques décarbonés (IEA, 2023).

Au-delà de la seule performance énergétique, l'IA est également mobilisée pour améliorer le **confort d'usage**, notamment à travers l'adaptation dynamique des conditions ambiantes (température, éclairage, qualité de l'air) en fonction des comportements des occupants. Le critère de taux de satisfaction ou de qualité d'ambiance permet ainsi d'intégrer une dimension qualitative essentielle, souvent absente des approches strictement énergétiques, mais déterminante dans l'évaluation globale de la performance du bâtiment (Michalakopoulos et al., 2023).

L'axe *IT for Green* inclut également des critères liés à l'**efficacité spatiale**, tels que le taux d'occupation des surfaces. En optimisant l'usage des espaces grâce à l'analyse des données d'occupation, l'IA peut contribuer à réduire l'emprise bâtie nécessaire et, par conséquent, les besoins en construction et en ressources associées. Cette dimension élargit l'analyse au-delà du bâtiment lui-même, en intégrant les effets indirects sur la consommation de ressources à l'échelle du projet (Suphavarophas et al., 2024).

Enfin, des critères relatifs à la **sobriété matérielle** et à la **circularité des matériaux** sont intégrés afin de rendre compte de la capacité de l'IA à agir sur les flux de matière tout au long du cycle de vie du bâtiment. Le volume de matière économisée permet d'évaluer les gains liés à l'optimisation des structures ou des systèmes constructifs en phase de conception, tandis que le taux de réemploi vise à qualifier le potentiel de récupération et de valorisation des matériaux en fin de vie, notamment dans des approches de type scan-to-BIM ou jumeau numérique.

L'ensemble de ces critères permet ainsi de saisir la diversité des bénéfices environnementaux

attribués à l'IA, tout en évitant de réduire l'analyse à la seule dimension énergétique (voir dans le tableau 1). Ils doivent toutefois être interprétés avec prudence, dans la mesure où les gains observés dépendent fortement des hypothèses de modélisation, des conditions d'usage, du niveau d'intégration des systèmes numériques dans le projet architectural ainsi que des limites de la documentation analysée.

Tableau 1 : Critères de l'axe IT for Green

Domaine	Critères	Observations
Performance énergétique	Évolution de la consommation (kWh/m ² .an)	Mesurer le gain réel ou simulé de consommation d'énergie primaire.
Gestion des pics	Lissage de la courbe de charge	Évaluer la capacité de l'IA à réduire la demande lors des pics de tension réseau.
Confort d'usage	Taux de satisfaction / Qualité d'ambiance	Analyser l'adéquation entre les besoins des usagers et les réglages automatiques.
Efficacité spatiale	Taux d'occupation des surfaces	Optimiser le ratio m ² /personne pour réduire l'emprise bâtie globale.
Sobriété matérielle	Volume de matière économisée	Évaluer la réduction des ressources physiques grâce à l'optimisation algorithmique.
Circularité	Taux de réemploi potentiel	Identifier et tracer les matériaux pour faciliter leur réutilisation future.

B. Green IT : empreinte environnementale du socle numérique

L'axe *Green IT* vise à rendre visibles les impacts environnementaux propres aux infrastructures numériques mobilisées par les systèmes d'IA dans les bâtiments tertiaires. Alors que les bénéfices associés à l'IA sont souvent mis en avant à l'échelle du bâtiment, la littérature souligne la nécessité d'intégrer également les coûts énergétiques, matériels et organisationnels du numérique afin d'éviter un simple déplacement des impacts.

Un premier critère est la **consommation énergétique** des systèmes numériques. La part de l'énergie dédiée au numérique (serveurs, capteurs, terminaux, réseaux) permet d'isoler l'empreinte propre du socle *IT* au sein du bâtiment, généralement intégrée de manière implicite dans les bilans globaux. Ce critère est essentiel pour mettre en perspective les gains énergétiques attribués à l'IA, en permettant de comparer les économies réalisées avec les ressources mobilisées *Green IT* : empreinte environnementale du socle numérique

La **matérialité des infrastructures numériques** constitue un deuxième axe d'analyse, appréhendé à travers la densité d'équipement (capteurs/m²). Ce critère permet de mesurer l'intensité matérielle nécessaire au fonctionnement des systèmes intelligents, en intégrant les capteurs *IoT*, les dispositifs de communication et les équipements de traitement. Il met en évidence les enjeux liés à la production, à la maintenance et à l'obsolescence de ces équipements, souvent en décalage avec les temporalités longues du bâti (OECD, 2022).

L’empreinte du numérique est également abordée à travers les **flux de données**, notamment via le volume de stockage et les modalités de traitement (local ou *cloud*). Ce critère permet d’évaluer les impacts associés à la circulation, au stockage et au traitement des données, qui constituent une part croissante de la consommation énergétique globale des systèmes numériques. Il permet également d’interroger les **choix d’architecture** (*edge computing vs cloud computing*), qui conditionnent directement le profil environnemental du système (IEA, 2023 ; Flaih, 2022).

Au-delà des dimensions énergétiques et matérielles, l’axe *Green IT* intègre des critères liés aux **dépendances technologiques**. Le niveau de “*lock-in*” permet ainsi d’évaluer la dépendance du projet vis-à-vis de fournisseurs ou de plateformes spécifiques, pouvant limiter la capacité d’évolution, d’adaptation ou de réversibilité des systèmes. Cette dimension, souvent peu prise en compte dans les évaluations environnementales, constitue pourtant un enjeu central de durabilité à long terme.

Enfin, la réversibilité des systèmes est abordée à travers la capacité du bâtiment à fonctionner en mode dégradé ou manuel en cas de défaillance du système numérique. Ce critère permet d’intégrer une **dimension de résilience**, en interrogeant la robustesse des dispositifs face aux pannes, aux obsolescences ou aux ruptures de service. Il renvoie également à des enjeux de sobriété, en questionnant le degré de dépendance du bâtiment à l’automatisation.

L’ensemble de ces critères vise ainsi à compléter l’analyse des bénéfices environnementaux de l’IA en rendant visibles des impacts souvent invisibilisés dans les projets architecturaux. Ils permettent d’inscrire l’évaluation dans une perspective systémique, intégrant à la fois les performances du bâtiment et les externalités du numérique qui les rendent possible.

Tableau 2 : Critères de l’axe Green IT

Domaine	Critères	Observations
Consommation IT	Part de l’énergie dédiée au numérique	Isoler la consommation des serveurs, capteurs et terminaux de celle du bâtiment.
Matérialité numérique	Densité d’équipement (capteurs/m²)	Mesurer l’intensité matérielle nécessaire au fonctionnement de l’IA.
Données	Volume et stockage (<i>Go / local / cloud</i>)	Évaluer l’impact environnemental du stockage, du transfert et du traitement des données
Architecture système	Type de traitement (<i>edge vs cloud</i>)	Analyser l’impact des choix d’architecture sur les flux de données et la consommation énergétique
Dépendance technologique	Niveau de <i>lock-in</i>	Évaluer la dépendance à des fournisseurs ou plateformes spécifiques
Résilience	Capacité de fonctionnement en mode dégradé	Mesurer la robustesse du système en cas de panne ou défaillance

C. Gouvernance : pilotage, transparence et responsabilité

Le troisième axe de la grille d'analyse porte sur les enjeux de gouvernance, entendus comme l'ensemble des modalités de pilotage, de décision et de responsabilité encadrant l'intégration des systèmes d'intelligence artificielle dans les projets architecturaux. Au-delà des performances techniques et des impacts environnementaux, la littérature souligne que les choix relatifs au numérique sont fondamentalement des choix organisationnels et politiques, impliquant une répartition des responsabilités entre concepteurs, exploitants, institutions et fournisseurs de technologies.

Un premier ensemble de critère concerne la question du **pilotage et du contrôle des systèmes**. Il s'agit ici d'évaluer dans quelle mesure les concepteurs et exploitants conservent une capacité d'intervention sur les dispositifs d'IA, ou au contraire dépendent de solutions clés en main proposées par des prestataires externes. Ce critère permet de questionner le degré d'autonomie des acteurs du projet et leur capacité à orienter les choix techniques en fonction d'objectifs environnementaux et d'usage.

La **transparence des systèmes** est également abordée à travers la capacité à comprendre le fonctionnement des algorithmes, les logiques de décision et les données mobilisées constitue un enjeu central, tant du point de vue éthique qu'opérationnel. Dans des environnements de plus en plus automatisés, l'opacité des modèles peut limiter la capacité des acteurs à interpréter les résultats, à contester certaines décisions ou à ajuster les systèmes en fonction des objectifs du projet (Dignum, 2019).

Un autre enjeu central concerne la **gestion des données personnelles**, notamment en termes d'accès, de propriété et de traçabilité. Dans les bâtiments intelligents, la collecte et le traitement de données liées aux usages et aux comportements des occupants soulèvent des questions de responsabilité, de protection de la vie privée et de gouvernance des flux d'information (UNESCO, 2021 ; Pluchart & Bonnet, 2022). L'analyse de ces dimensions permet d'élargir la réflexion au-delà des seules performances techniques, en intégrant des enjeux éthiques et juridiques.

Enfin, cet axe vise à interroger **le rôle de l'architecte et des acteurs du projet dans les arbitrages** liés à l'intégration de l'IA. Loin d'être de simples choix techniques, ces arbitrages engagent des visions du projet, des priorités en matière de durabilité et des formes de dépendance ou d'autonomie vis-à-vis des technologies. La gouvernance apparaît ainsi comme une condition essentielle pour articuler de manière cohérente les objectifs de performance environnementale et les exigences de sobriété numérique. Cette grille intègre également des critères relatifs à la **résilience organisationnelle**, en lien avec la capacité des acteurs à maintenir le fonctionnement du bâtiment en cas de défaillance des systèmes numériques. Cette dimension prolonge les enjeux de réversibilité abordés dans l'axe *Green IT*, en les replaçant dans une perspective de gouvernance : qui est responsable en cas de panne ?

quelles marges de manœuvre sont prévues ? quelles procédures de secours existent ?

L'ensemble de ces critères permet de compléter l'analyse en introduisant une dimension souvent absente des approches purement techniques : celle du pilotage des systèmes et de la responsabilité des acteurs. Ils contribuent à faire de la grille non seulement un outil d'évaluation, mais également un support de réflexion critique sur les conditions d'intégration de l'intelligence artificielle dans les projets architecturaux.

Tableau 3 : Critères de l'axe gouvernance

Domaine	Critères	Observations
Rôle humain et pilotage des systèmes	Degré d'autonomie de la décision	Définir si l'humain est "dans", "sur" ou "hors" de la boucle de décision.
Transparence	Explicabilité des modèles	Comprendre les logiques de décision et les données mobilisées
Gouvernance des données personnelles	Respect de la vie privée (RGPD). Accès, propriété et traçabilité des données	Analyser le niveau d'intrusion et l'anonymisation des données collectées.
Interopérabilité	Standardisation des flux (OpenBIM, IFC)	Garantir que les données restent utilisables si l'on change de logiciel ou d'outil.
Résilience organisationnelle	Capacité de mode manuel dégradé	Assurer que le bâtiment reste fonctionnel en cas de panne du système numérique.

5.3 Justification de l'approche par critères d'analyse

Le choix d'une formalisation sous forme de critères d'analyse répond à un enjeu méthodologique : rendre comparables des dimensions qui sont généralement traitées séparément, à savoir les bénéfices environnementaux de l'IA, l'empreinte du socle numérique et les conditions de gouvernance des systèmes. Dans le cadre d'un projet architectural, les décisions relatives au niveau d'instrumentation, à l'architecture numérique ou au recours à l'IA s'inscrivent dans des arbitrages concrets entre performance, coût, confort, durabilité et responsabilité. Ces arbitrages restent souvent implicites et peu documentés.

L'approche par critères est donc mobilisée comme un support d'analyse et d'aide à la décision, destiné à expliciter les tensions entre *IT for Green*, *Green IT* et gouvernance, sans prétendre produire une évaluation exhaustive. Afin de tester la pertinence de cette grille, elle est appliquée à trois études de cas représentatives de différentes formes d'intégration de l'IA dans le bâti.

6 Étude de cas – Mise à l'épreuve de la grille d'analyse

Les études de cas mobilisent principalement des sources secondaires de nature variée (rapports institutionnels, publications professionnelles, communications d'entreprises et articles spécialisés). Les types de données disponibles et leur niveau de transparence diffèrent toutefois fortement selon les projets étudiés, ce qui nécessite une mise en perspective critique propre à chaque cas.

6.1 CAS 1 – *The Edge*



Figure 2 : *The Edge*, Amsterdam — vue extérieure de la façade vitrée et du volume compact. Source : PLP Architecture, 2015



Figure 3 : *The Edge*, Amsterdam – atrium central et espace de circulation intérieure, qui structurent la relation entre lumière, usages et sociabilité. Source : PLP Architecture, 2015

L'analyse du cas *The Edge* repose principalement sur des sources secondaires issues de documents institutionnels, de rapports de certification environnementale, de publications produites par les acteurs du projet (PLP Architecture, Schneider Electric, EDGE Technologies)

ainsi que d'articles spécialisés consacrés au *smart building*. Ces sources documentent largement les performances énergétiques et les dispositifs numériques du bâtiment, mais elles présentent également une forte dimension promotionnelle et communiquent peu de données détaillées relatives aux impacts matériels, énergétiques et organisationnels des infrastructures numériques. L'analyse proposée s'appuie donc sur une mise en perspective critique de ces documents, en croisant les informations disponibles avec la littérature scientifique sur les enjeux du *Green IT*, *IT for Green* et de la gouvernance numérique.

6.1.1 Présentation générale du cas

The Edge, situé à Amsterdam, est un immeuble de bureaux conçu par PLP Architecture et développé par OVG Real Estate, aujourd'hui EDGE Technologies. Livré en 2015, il accueille notamment le siège de Deloitte et s'inscrit parmi les réalisations de référence en matière de bureaux tertiaires à haute performance environnementale (PLP Architecture, 2015 ; EDGE Technologies, s.d. ; Schneider Electric, 2015). D'une surface d'environ 40 000 m², il a obtenu une certification BREEAM Outstanding avec un score de 98,36%, ce qui traduit une ambition forte en matière de performance énergétique, de flexibilité d'usage et de qualité environnementale globale (Building Research Establishment [BRE Group], 2016).

Ce qui retient d'abord l'attention dans *The Edge*, d'un point de vue architectural, ce n'est pas seulement sa réputation de bâtiment "intelligent", mais la manière dont sa forme construit déjà une partie de la performance. Le projet repose sur une morphologie compacte en U ouverte au nord, autour d'un atrium central qui structure la lumière, les circulations et la lecture de l'espace (PLP Architecture, 2015). Cette configuration donne au bâtiment une présence très lisible : elle organise les plateaux, favorise les apports de lumière naturelle et limite les excès thermiques, tout en produisant un cœur spatial qui articule le collectif et l'exploitation quotidienne du bureau. La performance ne dépend donc pas uniquement des équipements techniques ; elle est aussi inscrite dans la géométrie même du projet (AFPRO Filters, 2024 ; PLP Architecture, 2015).



Figure 4 : The Edge, Amsterdam – vue d’ensemble du bâtiment dans son contexte urbain, entre image de performance et architecture tertiaire. Source : ArchInspires, 2024.

La coupe nord-sud montre bien cette logique. L’atrium central favorise la pénétration de la lumière diffuse, tandis que l’ouverture de la masse bâtie et les dispositifs de façade contribuent à une meilleure gestion des apports solaires et des échanges d’air (PLP Architecture, 2015). Ce qui paraît intéressant ici, c’est que la qualité du bâtiment ne tient pas à un geste formel spectaculaire, mais à une série d’arbitrages précis entre compacité, orientation, profondeur des plateaux et confort lumineux. Le projet donne ainsi à voir une architecture qui cherche moins à s’imposer comme image qu’à optimiser les conditions d’usage et de performance.



Figure 5 : Figure 6.4 : *The Edge* – morphologie en U ouverte au nord, atrium central et organisation des plateaux autour d'un cœur collectif. Source : PLP Architecture, 2015

Cette base architecturale est prolongée par un système de gestion technique du bâtiment fondé sur la plateforme EcoStruxure de Schneider Electric, qui constitue le cœur du dispositif de pilotage numérique (Schneider Electric, 2015 ; Jalia et al., 2018).

Ce qui est particulièrement intéressant dans ce cas, c'est la tension entre une architecture qui semble d'abord sobre, cohérente et presque discrète, et l'épaisseur technique très forte qui la rend performante au quotidien. *The Edge* ne peut pas être réduit à un exemple de "*smart building*" : il montre surtout que la performance contemporaine d'un bureau tertiaire résulte d'un assemblage entre forme, enveloppe, pilotage et exploitation. Autrement dit, le bâtiment ne se contente pas d'être équipé ; il est pensé comme un système où l'architecture prépare, accompagne et conditionne l'efficacité des dispositifs numériques (Massachusetts Institute of Technology [MIT], 2023 ; Swissroc, 2017).

6.1.2 Dispositifs d'intelligence artificielle et d'instrumentation

Le fonctionnement de *The Edge* repose sur un maillage de plus de 28 000 capteurs *IoT*, connectés via un réseau *PoE* et répartis dans l'ensemble du bâtiment. Ces capteurs mesurent principalement la présence des usagers, la température, l'humidité, le CO₂ et la luminosité, afin d'adapter en continu les systèmes de chauffage, de ventilation, de climatisation et d'éclairage aux conditions réelles d'occupation (Jalia et al., 2018 ; AFPRO Filters, 2024). D'un point de vue architectural, ce qui est intéressant n'est pas seulement le nombre d'équipements, mais la manière dont l'espace bâti devient lisible et pilotable par la donnée, c'est-à-dire un environnement où le confort n'est plus produit par une régulation uniforme mais par une lecture fine des usages.

Les luminaires LED alimentés par *PoE* ne servent pas uniquement à l'éclairage. Ils participent aussi à la collecte de données environnementales et d'usage, en lien avec la présence et l'activité dans les espaces. Les données ainsi récoltées sont ensuite traitées par la gestion technique du bâtiment, puis agrégées dans des environnements numériques pour soutenir le suivi d'exploitation, l'ajustement des consignes et certaines fonctions de maintenance prédictive (Schneider Electric, 2015 ; Kumar, 2025). Ce type de dispositif ne relève donc pas d'une IA générative ou d'une optimisation structurelle, mais d'un pilotage algorithmique appliqué à l'exploitation quotidienne du bâtiment (Jalia et al., 2018).

Les algorithmes mobilisés servent ici à trois types d'opérations. Ils appliquent d'abord des règles déterministes pour ouvrir ou fermer certains dispositifs, comme les stores ou les fenêtres, en fonction de l'ensoleillement et du niveau d'occupation. Ils utilisent ensuite des modèles prédictifs pour anticiper les pics de consommation liés au chauffage et à la ventilation. Enfin, ils exploitent les historiques d'occupation pour ajuster l'éclairage et la climatisation, tout en identifiant des anomalies susceptibles d'annoncer une défaillance technique (Kumar, 2025 ; MIT, 2023). Autrement dit, la donnée n'est pas seulement stockée : elle sert à produire une réactivité du bâtiment, qui devient capable d'ajuster ses comportements aux rythmes d'usage.

Les usagers interagissent avec ce système par une application mobile qui leur permet de réserver un poste, de personnaliser certains paramètres de confort comme la température ou l'éclairage, et de localiser des espaces disponibles (Subramanian, 2025 ; Swissroc, 2017). Cette interface donne une place active à l'occupation humaine dans le fonctionnement du bâtiment, mais elle enrichit aussi la base de données d'usage, ce qui pose indirectement la question de la collecte, de l'exploitation et de la maîtrise des informations produites. Le confort ressenti est ici davantage présumé à travers la personnalisation des ambiances qu'évalué par une mesure indépendante, ce qui invite à garder une lecture prudente des effets réels du dispositif (Swissroc, 2017).

6.1.3 Bénéfices environnementaux observés (*IT for Green*)

The Edge illustre de manière très nette la logique *IT for Green*, en montrant comment un bâtiment tertiaire peut être piloté pour réduire ses consommations en phase d'exploitation (Jalia et al., 2018 ; Schneider Electric, 2015). Les dispositifs de gestion numérique permettent d'ajuster les usages en fonction de l'occupation réelle, de la température, de la luminosité et de la qualité de l'air, ce qui contribue à limiter les surconsommations liées à un fonctionnement uniforme des espaces (AFPRO Filters, 2024 ; Kumar, 2025). Du point de vue architectural, cette performance ne tient pas seulement au système technique : elle s'appuie aussi sur une forme bâtie cohérente, une bonne compacité et une logique bioclimatique qui réduisent déjà les besoins avant même l'action des capteurs.

Les sources mobilisées indiquent également une forte performance énergétique globale, avec des consommations réduites d'environ 70% par rapport à un immeuble tertiaire équivalent, soit autour de 45 kWh/m².an (AFPRO Filters, 2024 ; BRE Group, 2025). Le projet intègre en outre une surface importante de panneaux photovoltaïques et un système géothermique qui contribue à couvrir une part très élevée des besoins annuels, ce qui renforce son positionnement de bâtiment à énergie positive (Schneider Electric, 2015). Ces éléments montrent que la performance du cas repose sur une combinaison entre stratégies passives, production d'énergie et pilotage numérique, plutôt que sur un seul dispositif isolé.

L'intérêt du cas, pour cette recherche, est précisément de montrer qu'un pilotage par données peut soutenir une amélioration réelle des performances d'exploitation. En revanche, les données mobilisées ne permettent pas à elles seules d'évaluer le confort ressenti de manière indépendante, ni d'attribuer au seul système numérique les résultats observés. Le score BREEAM-NL atteste d'une excellence environnementale globale, mais il ne constitue pas une mesure directe du confort vécu par les usagers (Jalia et al., 2018 ; BRE Group, 2025). Il faut donc distinguer la performance environnementale certifiée de l'expérience d'usage, même si les deux peuvent être liées dans le fonctionnement quotidien du bâtiment.

6.1.4 Coûts numériques et impacts associés (*Green IT*)

Le fonctionnement du bâtiment repose sur une logique de pilotage *data-driven*, dans laquelle les systèmes de gestion énergétique exploitent en continu les données issues des capteurs afin d'ajuster l'éclairage, la ventilation, le chauffage et l'occupation des espaces en temps réel. La consommation annuelle du système *IT* (*PoE*, serveurs locaux, stockage cloud) est estimée entre 3 et 5 MWh/an (estimation sectorielle), à quoi s'ajoute la maintenance du réseau de 28 000 capteurs (MIT, 2023). Le volume de données généré avoisinerait 20 To/an, impliquant des besoins de stockage et de bande passante non négligeables (Kumar, 2025). Par ailleurs, l'obsolescence des équipements (capteurs, serveurs) et la dépendance au *cloud* induisent des remplacements fréquents peu compatibles avec les temporalités longues du bâti. Les rapports de certification BREEAM associés au projet ne publient toutefois pas de données détaillées relatives à la consommation spécifique des infrastructures numériques. Cette absence met en évidence une limite récurrente des démarches d'évaluation environnementale du smart building : les gains énergétiques du bâtiment sont largement documentés, tandis que les impacts liés au socle numérique demeurent peu visibles et rarement intégrés de manière explicite dans les méthodes classiques de certification.

6.1.5 Gouvernance, pilotage et arbitrage

La gouvernance du système repose sur une supervision humaine assurée par les équipes d'exploitation et de *facility management*, les systèmes numériques étant mobilisés comme outils d'aide à la décision plutôt que comme dispositifs entièrement autonomes (Jalia et al.,

2018 ; MIT, 2023). Les données d'usage sont pseudonymisées et les usagers disposent d'un certain contrôle via l'application mobile associée au bâtiment, ce qui semble contribuer à l'acceptabilité du dispositif.

Le projet repose néanmoins sur une dépendance importante à des fournisseurs spécialisés de solutions logicielles et de plateformes *cloud*. Si les documents du cas ne détaillent pas explicitement les enjeux liés à la gouvernance des données ou à la transparence algorithmique, la littérature sur les systèmes numériques et l'intelligence artificielle souligne régulièrement les questions de pérennité, d'interopérabilité et de maîtrise des données associées à ces infrastructures (Dignum, 2019 ; OECD, 2019). L'analyse du cas permet ainsi de mettre en évidence une tension entre l'optimisation opérationnelle permise par les systèmes connectés et la dépendance croissante à des infrastructures techniques et logicielles complexes.

6.1.6 Limites, tensions et enseignements du cas

Le cas *The Edge* illustre de manière exemplaire le potentiel des systèmes numériques et du pilotage intelligent pour améliorer la performance énergétique et le confort d'usage en phase d'exploitation. Il met cependant en évidence une tension centrale entre les gains obtenus grâce aux dispositifs connectés et aux logiques d'optimisation (*IT for Green*) et les coûts énergétiques, matériels et organisationnels associés au socle numérique (*Green IT*).

L'analyse du cas montre que la durabilité réelle du modèle dépend fortement de la qualité des données, du paramétrage des systèmes de pilotage, des stratégies de maintenance et des choix de gouvernance. La transférabilité des performances observées à d'autres projets apparaît ainsi conditionnée à des prérequis importants en matière d'infrastructure technique, de compétences spécialisées et de ressources financières.

The Edge constitue à ce titre une référence pionnière du bâtiment tertiaire intelligent, combinant excellence environnementale et infrastructure numérique avancée. Son modèle révèle toutefois les prémices d'une dette numérique et matérielle encore peu visible dans les bilans environnementaux classiques. La performance observée tient autant aux qualités architecturales et énergétiques du bâtiment (photovoltaïque, géothermie, optimisation des usages) qu'à la finesse du pilotage fondé sur les données et les systèmes connectés.

Ce premier cas, centré sur la phase d'exploitation, met ainsi en lumière les conditions dans lesquelles les technologies numériques peuvent constituer un levier pertinent de durabilité, tout en soulignant la nécessité d'outils capables d'arbitrer explicitement entre bénéfices environnementaux, coûts numériques et enjeux de gouvernance. Ces enseignements serviront de base d'observation pour les cas suivants, consacrés à la phase de conception puis à la fin de vie du bâtiment, dans une lecture globale du cycle de vie.

6.1.7 Synthèse du cas 1

Les tableaux suivants synthétisent les principaux éléments d'analyse du cas *The Edge* à partir de la grille multicritère développée dans ce travail, en distinguant les dimensions *IT for Green*, *Green IT* et gouvernance des systèmes numériques.

Tableau 4 : Analyse du cas The Edge à partir de la grille IT for Green

Domaine	Critères	Observation
Performance énergétique	Consommation kWh/m ² /an	Réduction estimée d'environ 70 % par rapport à un immeuble tertiaire conventionnel. (45 kWh/m ² /an)
Gestion des pics	Effacement de charge	Optimisation CVC/Éclairage temps réel
Confort d'usage	% satisfaction usagers	Personnalisation du confort via application mobile ; satisfaction usager revendiquée élevée
Efficacité spatiale	Taux d'occupation m ²	Bureaux non attribués (Hotdesking)
Sobriété matérielle	Économie de ressources	Faible sur ce cas : focus exploitation)
Circularité	Réutilisation composants	(Non documenté pour ce cas)

Tableau 5 : Analyse du cas The Edge à partir de la grille Green IT

Domaine	Critères	Observation
Consommation IT	KWh liés au numérique	Données de consommation IT non publiées dans les documents du projet.
Matérialité numérique	Densité de capteurs	28 000 capteurs (réseau PoE)
Donnée	Volume Big Data	Collecte continue de données avec stockage local et cloud.
Architecture système	Temps réel / Latence	Analyse instantanée des flux
Dépendance technologique	Lock-in fournisseur	Forte dépendance à un écosystème propriétaire de fournisseurs et de solutions logicielles.
Résilience	Niveau de dépendance aux systèmes numériques	Dépendance élevée aux systèmes numériques pour le maintien du confort et des performances opérationnelles.

Tableau 6 : Analyse du cas The Edge à partir de la grille gouvernance

Domaine	Critères	Observation
Rôle humain et pilotage des systèmes	Degré d'autonomie IA	Supervision / Ajustement via App
Transparence	Accès aux algorithmes	Propriétaire (Boîte noire Schneider)
Gouvernance des données usagers	Protection des données et vie privée	Données pseudonymisées mais gestion largement propriétaire (Boîte noire Schneider)
Interopérabilité	Protocoles	Standardisation des échanges

	(BACnet/IP)	
Résilience organisationnelle	Limitée	Forte dépendance à des systèmes complexes et à des acteurs spécialisés, avec une capacité d'intervention des usagers et gestionnaires relativement réduite

6.2 CAS 2 - Siège d'Autodesk Research

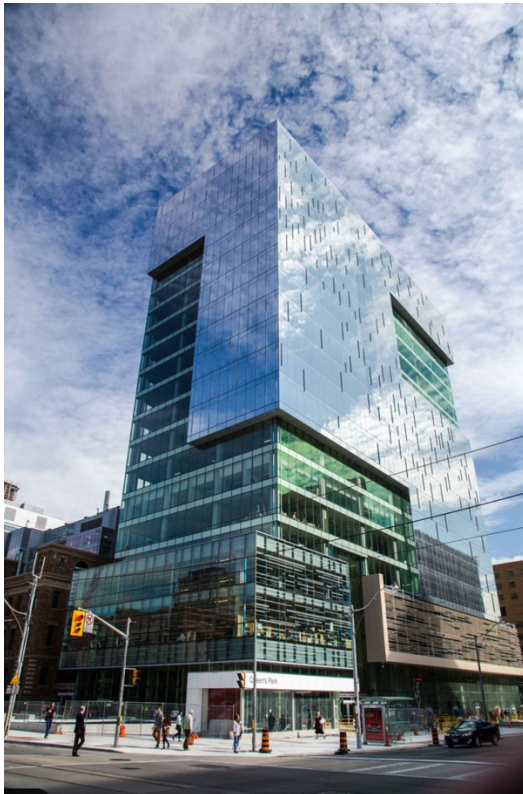


Figure 6 : Vue extérieure du MaRS Discovery District à Toronto, où est implanté le siège d'Autodesk Research. Le projet s'inscrit dans un environnement dédié à l'innovation technologique et à la recherche appliquée. Source : Autodesk News, 2015.

L'analyse du cas Autodesk Toronto repose principalement sur des documents produits par Autodesk, Autodesk Research et Autodesk University, complétés par des articles professionnels spécialisés dans le design génératif et la conception computationnelle. Ces sources permettent de documenter le fonctionnement des outils et les logiques de conception du projet, mais elles relèvent souvent d'une communication institutionnelle ou démonstrative. Les performances présentées sont majoritairement simulées et les données post-occupation ou les impacts environnementaux du calcul *cloud* restent peu documentés. L'analyse croise donc ces documents avec la littérature académique afin de maintenir une lecture critique du projet et des promesses associées au design génératif.

6.2.1 Présentation générale du cas

Livré en 2017 au sein du MaRS Discovery District à Toronto, le siège d'*Autodesk Research* constitue l'un des projets emblématiques associés au développement du design génératif appliqué à l'architecture intérieure. Le projet est fréquemment présenté par Autodesk comme une démonstration du potentiel des outils computationnels pour optimiser l'organisation spatiale des environnements de travail (Autodesk, 2018 ; Nagy et al., 2017). Cette communication fortement orientée vers l'innovation technologique nécessite toutefois d'être replacée dans une lecture plus critique des effets réels du dispositif sur l'espace architectural et sur le rôle du concepteur. Cette approche s'inscrit plus largement dans un contexte de transformation numérique du secteur AEC, où les outils computationnels et l'intelligence artificielle sont présentés comme des leviers croissants d'optimisation et de durabilité (Autodesk, 2025).

D'un point de vue spatial, le projet se caractérise par une organisation intérieure ouverte et flexible, structurée autour des interactions entre équipes, de l'accès à la lumière naturelle et de la modularité des espaces de travail. Comme l'illustre la figure 7, les plateaux privilégient des espaces collaboratifs relativement fluides, dans lesquels la répartition des postes, des zones de réunion et des circulations cherche à favoriser les échanges et l'adaptabilité des usages (BrainStation, 2017). Ce qui paraît particulièrement intéressant ici, est que le projet ne cherche pas à produire une forme spectaculaire ou iconique, mais plutôt une organisation spatiale optimisée à partir de critères comportementaux et fonctionnels. L'espace de bureau devient ainsi un objet d'ajustement permanent entre densité, confort, efficacité et flexibilité.

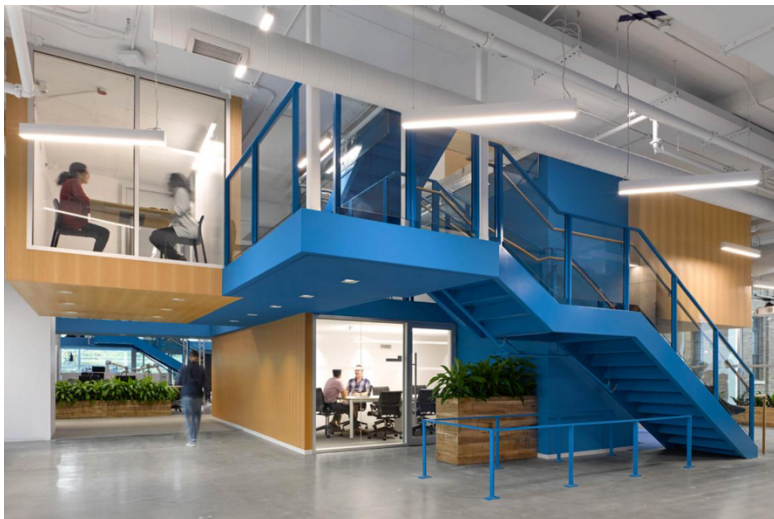


Figure 7 : Vue intérieure des espaces de travail du siège Autodesk Toronto, caractérisés par une organisation ouverte et collaborative issue du processus de design génératif. Photographie : Ben Rahn / A-Frame Inc. Source : BrainStation, 2017

Le projet, couvrant environ 5 600 m² de bureaux, repose sur l'utilisation d'algorithmes génétiques capables de générer et d'évaluer plusieurs milliers de configurations spatiales à partir de contraintes fixes telles que les noyaux techniques, les circulations verticales, les façades ou les ouvertures. Plus de 250 employés ont participé à la définition des variables

prises en compte dans le processus, notamment l'accès à la lumière naturelle, les vues extérieures, le niveau sonore ou les proximités fonctionnelles entre collaborateurs (BrainStation, 2017). Le processus génératif, illustré dans la figure 8, s'appuie sur une logique d'exploration multi-scénarios dans laquelle les outils computationnels produisent une grande diversité de solutions ensuite évaluées selon différents critères de performance (Nagy et al., 2017 ; Benjamin & Testai, 2020).

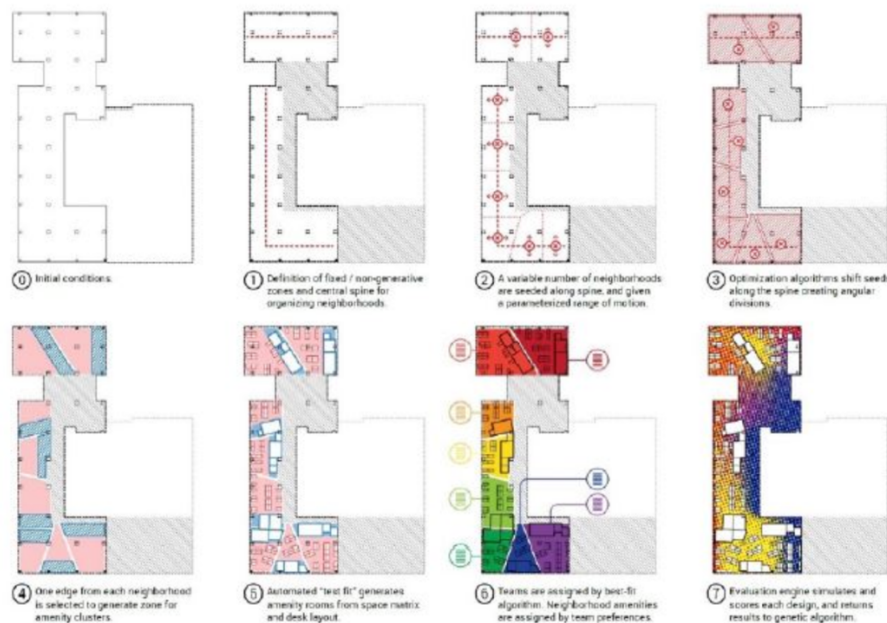


Figure 8 : Le système géométrique : (0) intègre les contraintes ; (1) définit les zones génératives et non génératives ; (2–3) subdivise l'espace en quartiers fonctionnels ; (4) génère des espaces partagés ; (5) produit des configurations tests ; (6) attribue les équipes ; (7) évalue les solutions générées. Workflow du processus de design génératif utilisé pour le projet Autodesk Toronto. Source : Nagy et al., 2017.

Ce qui semble particulièrement significatif dans ce cas est le déplacement du rôle de l'architecte au sein du processus de conception. Les outils génératifs ne remplacent pas la décision architecturale mais modifient la manière dont les choix spatiaux sont produits et arbitrés. Comme le montrent les différentes configurations générées (figure 9), l'architecte n'élabore plus uniquement une solution unique ; il définit également les paramètres, les objectifs et les contraintes à partir desquels le système computationnel explore des alternatives possibles. Les solutions finales restent ensuite sélectionnées, interprétées et retravaillées par les concepteurs, ce qui rappelle que le processus demeure fondé sur des arbitrages humains malgré l'importance accordée aux outils algorithmiques (Benjamin & Testai, 2020 ; Nagy et al., 2017).

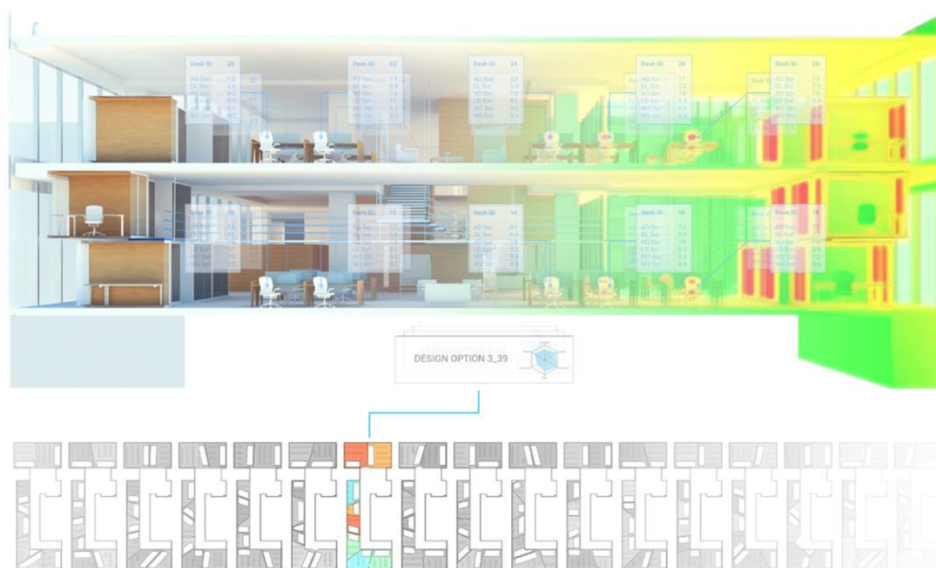


Figure 9 : Variantes spatiales générées dans le cadre du processus de design génératif du siège Autodesk Toronto. Source : Benjamin & Testai, 2020

L'intérêt de ce cas réside principalement dans sa capacité à illustrer la manière dont les outils algorithmiques interviennent dès la phase de conception pour orienter les choix spatiaux et organisationnels. Ce projet permet d'interroger les effets du numérique en amont du cycle de vie, au moment même de la production du projet architectural.

6.2.2 Dispositifs d'intelligence artificielle et d'instrumentation

Le projet s'appuie sur la plateforme *Project Discover*, puis sur les développements ultérieurs associés à *Project Rediscover*, développés au sein d'*Autodesk Research* et *The Living*. Il ne s'agit pas ici d'une intelligence artificielle autonome appliquée à l'exploitation du bâtiment, comme dans certains systèmes de *smart building*, mais plutôt d'un dispositif de conception computationnelle fondé sur la génération, l'évaluation et la comparaison de multiples scénarios spatiaux (Nagy et al., 2017 ; Benjamin & Testai, 2020).

Le workflow associe un modèle paramétrique développé dans l'environnement Revit/Dynamo, des objectifs de performance spatiale et environnementale, ainsi qu'un moteur d'optimisation permettant de générer et de hiérarchiser des configurations d'aménagement intérieur. Les sources disponibles mentionnent notamment l'usage d'outils Autodesk liés à la simulation et à l'optimisation, mais ces éléments relèvent en partie de documents produits par Autodesk ou par des sources professionnelles spécialisées. Ils doivent donc être lus comme des éléments descriptifs du processus, et non comme une évaluation indépendante de ses performances (Benjamin & Testai, 2020 ; Pierce, 2020).

Le principe repose principalement sur des algorithmes évolutionnaires, proches des

algorithmes génétiques : le système génère une population initiale de configurations, puis les fait évoluer par sélection, combinaison et variation, en fonction de critères définis en amont. Ces critères concernent notamment la compacité, les apports de lumière naturelle, les vues, le voisinage acoustique et les distances fonctionnelles entre équipes. Chaque option est ainsi évaluée selon un ensemble de contraintes et d'objectifs spatiaux, ce qui permet de produire en quelques heures plusieurs milliers de variantes d'aménagement.

Cette approche rejoint les principes de la conception computationnelle présentés dans l'état de l'art (section 3): l'architecte ne se limite plus à dessiner directement une solution finale, mais définit un espace de possibilités à partir de paramètres, de contraintes et de critères d'évaluation. Ces démarches transforment le rôle du concepteur en l'amenant à formuler les règles du système, à interpréter les résultats générés et à arbitrer entre plusieurs scénarios possibles (de Boissieu, 2022)

La décision finale reste donc humaine : les concepteurs, notamment *B+H Architects* et *The Living*, sélectionnent, interprètent et ajustent les options issues du calcul en fonction de leur expertise, des contraintes du projet et des retours des usagers. Le processus peut ainsi être compris comme une forme de co-conception entre outils computationnels, concepteurs et utilisateurs, dans laquelle la machine élargit le champ des possibles sans se substituer au jugement architectural (de Boissieu, 2022).

6.2.3 Bénéfices environnementaux observés (*IT for Green*)

Les bénéfices associés au projet concernent principalement des performances projetées issues du processus de conception générative, ainsi que certains retours d'usage post-occupation relatifs à la qualité des espaces de travail.

Le processus de design génératif a permis d'explorer plus de 10 000 variantes spatiales afin d'optimiser simultanément la compacité des espaces, les apports de lumière naturelle, les distances fonctionnelles entre équipes et certains indicateurs de performance énergétique simulée (Autodesk Research, 2019). Les scénarios retenus auraient notamment conduit à une réduction estimée de 20 à 25 % des surfaces par poste de travail, soit environ 6 à 7 m² par personne, ainsi qu'à une amélioration projetée de 15 à 20 % des performances énergétiques liées à la compacité et à l'organisation spatiale.

Les documents du projet mettent également en avant une augmentation de l'exposition à la lumière naturelle de l'ordre de 30 à 35 %, présentée comme un facteur de réduction du recours à l'éclairage artificiel. D'un point de vue architectural, cette recherche d'optimisation ne repose pas uniquement sur la technologie mais aussi sur une logique d'organisation spatiale visant à rapprocher les équipes collaborant fréquemment, à fluidifier les circulations et à améliorer les conditions d'usage quotidiennes. Les distances parcourues entre certains

groupes de travail auraient ainsi diminué d'environ 20 % selon les scénarios évalués (Autodesk Research, 2019).

Contrairement aux indicateurs énergétiques principalement simulés, certains éléments relèvent davantage du retour d'expérience post-occupation. Les enquêtes réalisées après l'installation des équipes signalent un niveau élevé de satisfaction concernant la luminosité, les vues, l'acoustique et les proximités fonctionnelles entre collaborateurs. Ces résultats restent toutefois issus des acteurs directement impliqués dans le projet et ne constituent pas une évaluation indépendante du confort réel ou des performances environnementales du bâtiment (Autodesk Research, 2019).

Ce cas met ainsi en évidence la capacité du design génératif à intégrer simultanément des paramètres environnementaux, organisationnels et spatiaux dès les premières phases de conception. En revanche, les bénéfices environnementaux au sens strict (notamment en matière d'énergie ou de carbone) demeurent souvent indirects et largement fondés sur des simulations ou des hypothèses liées à la compacité, à l'éclairage naturel et aux stratégies d'occupation des espaces (Benjamin & Testai, 2020).

6.2.4 Coûts numériques et impacts associées (*Green IT*)

Dans ce cas, l'empreinte numérique apparaît moins liée à une infrastructure déployée sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment (comme dans *The Edge*) qu'à une forte intensité de calcul concentrée sur la phase de conception. La génération, l'évaluation et le stockage de plusieurs milliers de variantes spatiales impliquent un coût computationnel réel, bien que celui-ci soit rarement détaillé de manière précise dans les documents publics produits autour du projet.

Les sources disponibles indiquent qu'environ 10 000 simulations ont été calculées via des infrastructures *cloud* afin de produire et d'évaluer les différentes configurations spatiales (Benjamin & Testai, 2020). Ce processus génère une quantité importante de données et mobilise des ressources computationnelles significatives, notamment pour les opérations de simulation, d'optimisation et de stockage intermédiaire des résultats.

Les documents liés au projet ne fournissent toutefois pas de données détaillées concernant la consommation énergétique réelle du calcul ou des infrastructures *cloud* mobilisées. L'évaluation de cette empreinte doit donc s'appuyer sur des ordres de grandeur issus de la littérature consacrée au calcul intensif, au *machine learning* et aux impacts environnementaux du numérique (Strubell et al., 2019). Ces travaux montrent que les phases d'entraînement, de simulation et d'exploration computationnelle peuvent représenter des consommations énergétiques non négligeables, même lorsqu'elles interviennent uniquement durant la phase de conception.

L'analyse du cas met également en évidence une dépendance importante à des plateformes propriétaires telles qu'Azure ou Autodesk *Cloud*. Si les documents Autodesk présentent principalement ces infrastructures comme des outils d'optimisation et de collaboration, la littérature sur les environnements numériques et les plateformes *cloud* souligne plus largement les enjeux associés à la gouvernance des données, à l'interopérabilité et au manque de transparence énergétique des infrastructures de calcul (Strubell et al., 2019 ; Dignum, 2019 ; OECD, 2019). Ces dimensions ne sont pas explicitement discutées dans les documents du projet, mais elles apparaissent comme des limites importantes dans une perspective *Green IT*.

Ce cas montre ainsi que les outils computationnels mobilisés pour optimiser un projet architectural « durable » reposent eux-mêmes sur des infrastructures numériques énergivores et largement externalisées.

6.2.5 Gouvernance, pilotage et arbitrage

Le processus de design génératif mobilisé dans le projet *Autodesk Toronto* soulève plusieurs enjeux liés à la gouvernance des outils computationnels, à la maîtrise des données et à la place du concepteur dans le processus décisionnel.

Les critères utilisés pour générer, hiérarchiser et évaluer les différentes configurations spatiales reposent sur des systèmes de pondération définis en amont du processus. Si ces paramètres sont théoriquement configurables par les concepteurs, leur traduction computationnelle et leurs effets sur les résultats produits demeurent partiellement opaques, notamment dans les environnements propriétaires de calcul et d'optimisation. Cette relative opacité limite la traçabilité complète du raisonnement algorithmique et soulève des questions d'explicabilité et d'auditabilité des choix produits par le système (Dignum, 2019 ; OECD, 2019).

Le projet met également en évidence une forte dépendance à des infrastructures numériques propriétaires, en particulier aux environnements *cloud* et aux outils développés par Autodesk. Cette centralisation des modèles, des calculs et des données pose des questions de souveraineté numérique, notamment concernant la propriété des modèles générés, la pérennité des formats, l'accès futur aux données et les possibilités d'interopérabilité avec d'autres plateformes.

Les données mobilisées dans le cadre du projet (notamment celles liées aux usages, aux préférences spatiales ou aux relations fonctionnelles entre équipes) semblent avoir été collectées de manière anonymisée. Leur traitement via des plateformes externes et des infrastructures *cloud* soulève néanmoins des interrogations plus larges concernant la confidentialité, la gouvernance des données et le contrôle exercé par les acteurs du projet sur les informations produites.

Enfin, ce cas montre que les outils génératifs ne peuvent être réduits à de simples instruments d'assistance technique. Le système participe activement à la structuration du champ des possibles architecturaux en orientant les scénarios explorés, les critères évalués et les arbitrages envisageables. Les architectes conservent la responsabilité de la décision finale, mais leur rôle se transforme : ils doivent désormais définir les paramètres du système, interpréter les résultats générés et exercer un regard critique sur les biais, les limites et les présupposés intégrés dans les modèles computationnels. Cette évolution rejoint les réflexions développées dans l'état de l'art sur la conception computationnelle et la redéfinition contemporaine du rôle du concepteur (de Boissieu, 2022 ; Dignum, 2019).

6.2.6 Limites, tensions et enseignements du cas

Le cas *Autodesk Toronto* illustre la capacité des outils de design génératif à élargir fortement l'exploration des solutions en phase de conception et à rendre plus explicites certains arbitrages entre contraintes spatiales, organisationnelles et environnementales. Il met toutefois en évidence plusieurs limites importantes liées à l'usage des outils computationnels dans le processus architectural.

Une première limite concerne le caractère essentiellement projeté des performances environnementales avancées dans le projet. Les bénéfices mis en avant reposent principalement sur des simulations, des hypothèses de conception et des scénarios générés par les outils d'optimisation. Les données de performance post-occupation publiées demeurent relativement limitées, notamment concernant les consommations énergétiques réelles ou les gains carbone effectifs à long terme. Les outils génératifs permettent ainsi surtout d'optimiser des modèles et des paramètres de projet, sans garantir automatiquement les performances réelles du bâtiment une fois construit et occupé.

Le cas met également en évidence une externalisation partielle des impacts numériques. L'exploration computationnelle de milliers de variantes mobilise des infrastructures *cloud*, des capacités de calcul intensif et des opérations de stockage rarement documentées de manière précise dans les publications Autodesk. L'empreinte environnementale liée au calcul demeure donc difficile à évaluer, ce qui limite la possibilité d'établir un bilan complet entre bénéfices environnementaux et coûts numériques.

Par ailleurs, la transférabilité du modèle apparaît fortement dépendante de la disponibilité de données fiables concernant les usages, les proximités fonctionnelles entre équipes, les préférences spatiales ou les conditions environnementales recherchées. Le projet s'inscrit dans un contexte très spécifique : celui d'une entreprise technologique disposant d'importantes ressources numériques et d'un accès privilégié aux outils développés par Autodesk. Cette situation limite en partie la généralisation du modèle à d'autres contextes architecturaux moins instrumentés.

Enfin, ce cas montre que les outils génératifs ne constituent pas uniquement des instruments d'assistance technique, mais participent à structurer les possibilités mêmes du projet architectural. Les choix ne disparaissent pas ; ils se déplacent en partie vers la définition des paramètres, des critères d'évaluation et des systèmes de pondération qui orientent les scénarios produits. *Autodesk Toronto* apparaît ainsi comme un projet à la fois expérimental et démonstrateur, développé par un acteur majeur du logiciel architectural. (Royan, 2021).

6.2.7 Synthèse du cas 2

Tableau 7: Analyse du cas Autodesk Toronto à partir de la grille IT for Green

Domaine	Critères	Observations
Performance énergétique	Simulations thermiques	Optimisation de l'enveloppe et des apports
Gestion des pics	(Non prioritaire ici)	Focus sur la géométrie et non le pilotage temps réel
Confort d'usage	Niveaux d'éclairement	Maximisation de la lumière naturelle et des vues
Efficacité spatiale	Ratio m ² /usager	Optimisation de la compacité et adéquation aux usages
Sobriété matérielle	Rationalisation spatiale	Réduction des surfaces et optimisation des usages plutôt que réduction documentée des matériaux
Circularité	(Non documenté)	Focus sur l'aménagement intérieur et l'usage

Tableau 8 : Analyse du cas Autodesk Toronto à partir de la grille Green IT

Domaine	Critères	Observations
Consommation IT	Intensité computationnelle	Calcul cloud et simulations massives peu documentés énergétiquement
Matérialité numérique	Cloud Computing	Utilisation de plateformes cloud (Azure/Autodesk)
Donnée	Volume de données	Plusieurs centaines de Go (10 000 simulations)
Architecture système	Calcul cloud centralisé	Workflow computationnel dépendant des infrastructures cloud Autodesk
Dépendance technologique	Lock-in technologique	Forte dépendance au Cloud du fournisseur
Résilience	Moyenne	Dépendance importante aux plateformes numériques mais impacts limités après la phase de conception

Tableau 9 : Analyse du cas Autodesk Toronto à partir de la grille gouvernance

Domaine	Critères	Observations
Rôle humain et pilotage des systèmes	Co-conception computationnelle	L'architecte définit les paramètres puis arbitre entre les variantes générées
Transparence	Explicabilité	Opacité partielle des critères de pondération
Gouvernance des	Donnée d'enquête	Utilisation de préférences usagers anonymisées

données usagers		
Interopérabilité	Formats propriétaires	Dépendance à l'écosystème logiciel Autodesk
Résilience organisationnelle	Contexte expérimental favorable	Projet développé dans un environnement fortement instrumenté et maîtrisé techniquement

6.3 CAS 3 – TU Delft

Conformément à la démarche itérative de ce travail, ce troisième cas déplace l'analyse vers la dernière phase ultime du cycle de vie du bâtiment : la déconstruction et le réemploi. En mobilisant les axes *IT for Green*, *Green IT* et Gouvernance, l'étude de l'écosystème de la *TU Delft* permet d'évaluer comment l'intelligence artificielle peut transformer un bâtiment en "banque de matériaux" tout en questionnant la durabilité de la donnée sur le temps long.

La phase de chantier et de construction n'est pas abordée comme étude de cas autonome dans ce travail. Les usages de l'intelligence artificielle et des outils numériques y sont aujourd'hui nombreux (planification, suivi de chantier, robotisation, vision par ordinateur ou encore sécurité) mais ils couvrent des applications très hétérogènes, souvent centrées sur des tâches spécifiques et difficiles à comparer dans une même grille d'analyse. Le choix a donc été fait de privilégier des cas davantage structurés autour d'une phase identifiable du cycle de vie du bâtiment, afin de permettre une lecture comparative plus cohérente des enjeux *IT for Green*, *Green IT* et de gouvernance.

Le choix de ce cas reflète également une limite importante du domaine étudié : les applications de l'IA à la déconstruction et au réemploi restent aujourd'hui largement expérimentales et peu documentées à l'échelle de chantiers réels. Les retours d'expérience consolidés demeurent rares, tandis que les pratiques observées relèvent souvent de démonstrateurs académiques, de prototypes ou de projets pilotes. Dans ce contexte, l'écosystème de *TU Delft* constitue un terrain particulièrement intéressant, car il rassemble plusieurs recherches explorant l'usage du numérique dans une perspective d'économie circulaire appliquée au bâtiment existant.

L'analyse du cas *TU Delft* repose principalement sur des articles scientifiques issus des domaines du *scan-to-BIM*, du *H-BIM*, de la vision par ordinateur et de l'économie circulaire appliquée au bâtiment (Automation in Construction, Applied Sciences, ISPRS Archives), complétés par des travaux de recherche et chapitres académiques produits dans l'écosystème de *TU Delft*.

Contrairement aux deux premiers cas, davantage documentés par des sources institutionnelles ou professionnelles, ce troisième cas s'appuie majoritairement sur une littérature expérimentale et méthodologique, centrée sur des workflows de recherche, des démonstrateurs et des études pilotes. Certaines sources institutionnelles et sectorielles ont également été mobilisées afin de contextualiser les enjeux de circularité numérique et les freins organisationnels du secteur. Cette diversité de sources implique toutefois plusieurs limites : les

résultats publiés demeurent souvent partiels, simulés ou appliqués à des bâtiments tests, avec peu de retours d'expérience à grande échelle sur des opérations réelles de déconstruction et de réemploi.

6.3.1 Présentation générale du cas

Le troisième cas s'appuie sur des projets pilotes et expérimentations menés dans l'écosystème de *TU Delft*, qui explorent l'usage du *scan-to-BIM* et de techniques d'intelligence artificielle pour accompagner la déconstruction sélective, le diagnostic matière et le réemploi lors de transformations ou de démolitions de bâtiments existants (Gordon et al., 2023 ; Çetin et al., 2022). Ces travaux développent des workflows semi-automatisés combinant relevés 3D, segmentation de nuages de points et classification d'éléments de construction, dans la perspective d'une économie circulaire du bâtiment (Çetin et al., 2022 ; De Wolf et al., 2024 ; Gordon et al., 2023).

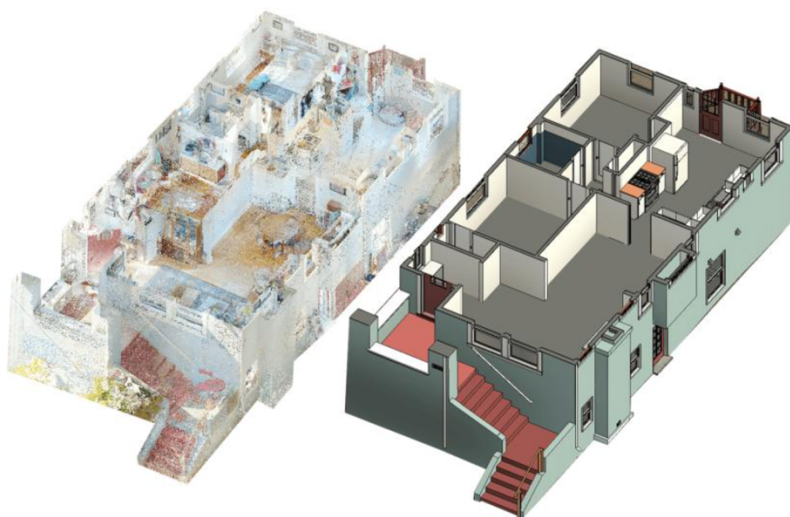


Figure 10 : Relevé par nuage de points utilisé dans un workflow *scan-to-BIM* appliqué à un bâtiment existant. Source : Gordon et al., 2023.

Contrairement aux deux premiers cas, il ne s'agit pas d'un bâtiment emblématique unique, mais d'un terrain institutionnel où différents bâtiments du patrimoine universitaire ou assimilé servent de supports à des démonstrateurs technologiques : détection d'éléments pour planification de la déconstruction, génération d'inventaires matière automatisés, modèles *H-BIM* enrichis, etc. (Gordon et al., 2023 ; Croce et al., 2023 ; Croce et al., 2021). Cette dimension est importante d'un point de vue architectural : les recherches portent moins sur la production d'un objet neuf optimisé que sur la lecture, l'interprétation et la documentation d'un bâti déjà construit, souvent hétérogène, transformé au fil du temps et parfois insuffisamment documenté.



Figure 11 : Bâtiment existant utilisé comme support de relevés numériques et d'expérimentations liées au réemploi et à la déconstruction sélective. Source : TU Delft / Circular Built Environment publications, 2021–2023.

Ce déplacement du regard modifie profondément la place du numérique dans le processus architectural. L'enjeu n'est plus seulement d'optimiser un projet futur, mais de rendre lisibles les matériaux, les assemblages et les possibilités de réemploi d'un bâtiment existant avant sa transformation ou sa déconstruction. Le bâtiment devient alors une forme de "banque de matériaux", dont les composants doivent être identifiés, localisés, qualifiés et potentiellement valorisés dans d'autres cycles constructifs.

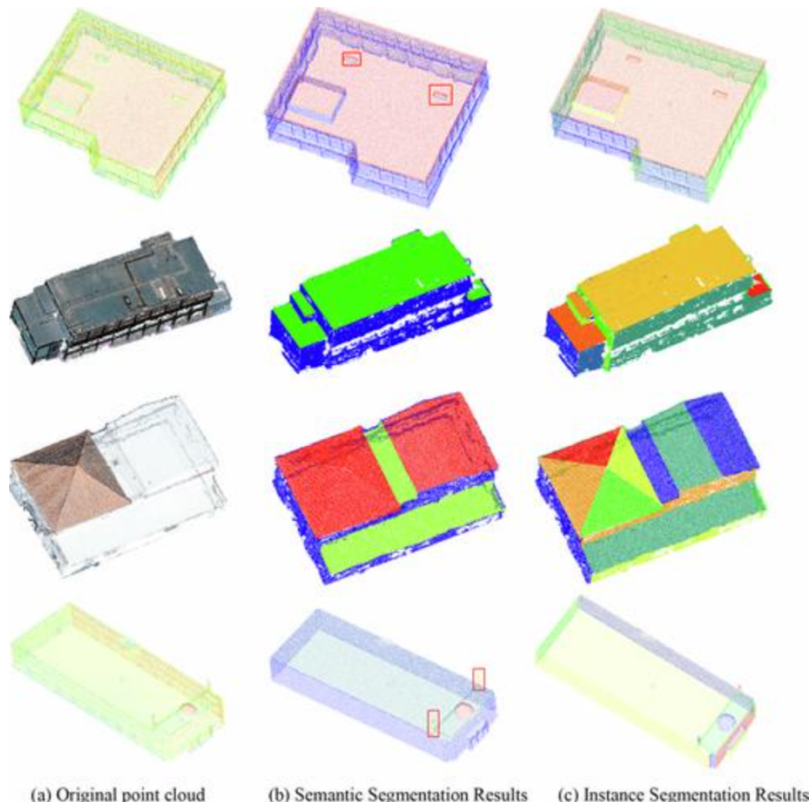


Figure 12 : (a) Nuages de points originaux ; (b) résultats de segmentation sémantique ; (c) résultats de segmentation par instances. Segmentation et classification automatisée d'éléments constructifs à partir d'un nuage de points appliqué à un bâtiment existant. Source : Croce et al., 2023

Les recherches menées à *TU Delft* témoignent ainsi d'un état de maturité encore émergent des outils d'intelligence artificielle appliqués à la fin de vie du bâtiment. La littérature sur la numérisation pour l'économie circulaire souligne que ces approches demeurent aujourd'hui largement expérimentales, avec des niveaux variables d'automatisation, de fiabilité et d'interopérabilité (Çetin et al., 2022 ; Mullen, 2023 ; Setaki & van Timmeren, 2022).

6.3.2 Dispositifs d'intelligence artificielle et d'instrumentation

Les travaux associés à *TU Delft* s'inscrivent dans une chaîne numérique intégrée, typique des approches *scan-to-BIM* augmentées par l'IA (Gordon et al., 2023 ; Croce et al., 2023).

- Acquisition : les bâtiments existants sont relevés par scan 3D (laser scanner, LiDAR), produisant des nuages de points denses contenant plusieurs millions de points (Gordon et al., 2023 ; Croce et al., 2021).
- Prétraitement et segmentation : les nuages de points sont nettoyés, filtrés et segmentés pour isoler les surfaces et volumes pertinents (murs, dalles, escaliers, menuiseries) du bruit et des éléments parasites (Gordon et al., 2023).
- Reconnaissance automatisée d'éléments : des algorithmes de vision par ordinateur et de réseaux de neurones convolutifs (CNN) classifient les segments en catégories constructives, selon leurs caractéristiques géométriques, topologiques et contextuelles (Croce et al., 2023 ; Croce et al., 2021).
- Intégration *H-BIM* : les éléments reconnus sont convertis en objets *BIM* structurés pour le patrimoine (*Historic BIM* ou *H-BIM*), enrichis d'attributs géométriques, matériels et fonctionnels, produisant un inventaire matière numérique exploitable pour la planification de déconstruction (Croce et al., 2023 ; Cotella, 2023)
- Planification de déconstruction et de réemploi : ces inventaires alimentent des outils de simulation qui aident à définir les séquences de démontage, l'accessibilité des éléments, les stocks potentiels de matériaux réemployables et les flux vers les filières de réutilisation (Gordon et al., 2023 ; Çetin et al., 2022).

Dans ce dispositif, l'IA joue un rôle central de réduction du temps, de la subjectivité et des coûts de la classification manuelle. Elle permet de traiter des volumes de données massifs (nuages de points de plusieurs centaines de Mo à plusieurs Go) et de produire des inventaires systématiques et reproductibles, qui seraient difficilement atteignables avec des méthodes entièrement manuelles (Gordon et al., 2023 ; Croce et al., 2023). L'IA devient ainsi un instrument de lecture et de mise en visibilité des ressources matérielles incorporées dans le bâti existant, au service d'une stratégie de déconstruction sélective et de réemploi circulaire.

6.3.3 Bénéfices environnementaux observés (*IT for Green*)

Les travaux scientifiques convergent sur plusieurs bénéfices potentiels de ces workflows pour l'*IT for Green* (Gordon et al., 2023 ; Çetin et al., 2022). D'abord, l'automatisation de la détection d'éléments permet d'améliorer l'exhaustivité et la précision des inventaires matière par rapport à des relevés manuels, en identifiant une plus grande part de composants pertinents pour le réemploi (Gordon et al., 2023).

Ensuite, ces inventaires structurés soutiennent la planification de déconstruction sélective, en hiérarchisant les éléments selon leur potentiel de démontabilité, de réutilisation ou de recyclage de qualité, ce qui peut réduire les flux de déchets de construction et démolition (Croce et al., 2023 ; Çetin et al., 2022).

Enfin, en reliant les inventaires matière à des bases de données d'Analyse de Cycle de Vie, plusieurs travaux montrent qu'il devient possible d'estimer les impacts environnementaux évités (kg CO₂, consommation de ressources) en comparant différents scénarios de démolition, réemploi ou recyclage (Çetin et al., 2022 ; Cotella, 2023). Ces bénéfices demeurent pour l'instant en grande partie modélisés et prospectifs, les études portant souvent sur des bâtiments tests ou des sections de bâtiments, avec des scénarios d'impact simulés plutôt que des mesures ex-post sur des chantiers à grande échelle (Gordon et al., 2023 ; Croce et al., 2023). Mais ils indiquent clairement le potentiel de l'IA comme outil d'aide à la décision pour des maîtres d'ouvrage, ingénieurs et démolisseurs engagés dans une démarche de circularité.

6.3.4 Coûts numériques et impacts associés (*Green IT*)

Les workflows de déconstruction assistée par *scan-to-BIM* et IA impliquent des coûts numériques significatifs liés à l'acquisition, au traitement et au stockage de grandes masses de données. Les nuages de points issus de campagnes de *laser scanning* peuvent atteindre plusieurs dizaines de gigaoctets, auxquels s'ajoutent les modèles *H-BIM*, les résultats de classification et les jeux d'entraînement des réseaux de neurones (Gordon et al., 2023 ; Croce et al., 2023). La littérature sur la numérisation et l'économie circulaire rappelle que ces volumes de données, lorsqu'ils sont hébergés et traités sur des infrastructures *cloud*, induisent une consommation énergétique non négligeable, rarement intégrée aux bilans environnementaux des projets (Çetin et al., 2022 ; Zhou, 2025).

En l'absence de données précises pour chaque expérimentation, l'analyse s'appuie sur des ordres de grandeur issus des travaux sur l'empreinte énergétique du calcul intensif et du stockage numérique. Ceux-ci situent la consommation de workflows de *scan-to-BIM* dans une fourchette allant de quelques centaines de kWh pour une campagne complète (acquisition, traitement, classification, stockage à court terme), à davantage lorsque les données sont conservées durablement ou ré-analysées (Cotella, 2023 ; Strubell et al., 2019). Ces coûts restent modestes à l'échelle d'un parc immobilier, mais ils deviennent non négligeables dès

lors que les pratiques se généralisent, et soulignent la nécessité d'intégrer la dimension *Green IT* dans l'évaluation de ces dispositifs.

6.3.5 Gouvernance, pilotage et arbitrage

Les travaux sur la digitalisation et la circularité du secteur du bâtiment insistent sur le rôle central de la gouvernance des données et des compétences dans la réussite de ces approches (Çetin et al., 2022). Les projets pilotes liés à *TU Delft* montre que les dispositifs *IA-scan-to-BIM* pour la déconstruction supposent une coordination étroite entre universités, maîtres d'ouvrage, bureaux d'études, entreprises de déconstruction et plateformes de réemploi, chacun ayant des attentes et des capacités différentes face aux outils numériques (Gordon et al., 2023 ; Mullen, 2023).

Les études sur les barrières à la circularité rappellent également que la gouvernance ne se limite pas à la technique : elle concerne la répartition des responsabilités, la propriété et l'accès aux données (modèles, inventaires matière), ainsi que la capacité à arbitrer entre coûts numériques, gains potentiels de circularité et contraintes réglementaires (Nordregio, 2023 ; Setaki & van Timmeren, 2022). Dans ce contexte, l'IA ne remplace pas les décisions humaines mais transforme la nature et l'échelle des arbitrages. Les acteurs doivent désormais décider quels éléments documenter en priorité, quelles données conserver et pendant combien de temps, ou encore quel niveau d'investissement consacrer à la qualité des relevés, des modèles et des infrastructures numériques pour espérer des bénéfices réels en matière de réemploi. Par rapport à des pratiques plus traditionnelles de diagnostic ou d'inventaire, la numérisation introduit ici des volumes de données beaucoup plus importants, des coûts de stockage et de traitement supplémentaires, ainsi qu'une dépendance accrue à l'interopérabilité des plateformes et à la gouvernance des données sur le temps long.

6.3.6 Limites, tensions et enseignements du cas

Les travaux étudiés mettent en évidence plusieurs limites qui nuancent le potentiel actuel des approches *IA-scan-to-BIM* appliquées à la déconstruction et au réemploi. Sur le plan technique, la qualité des résultats reste fortement dépendante de la précision des relevés 3D, de la complexité géométrique du bâti existant et de la disponibilité de jeux de données d'entraînement suffisamment représentatifs. Les performances de classification et de segmentation demeurent ainsi variables selon les contextes constructifs, ce qui limite aujourd'hui la transférabilité des modèles d'un bâtiment à l'autre (Croce et al., 2021 ; Croce et al., 2023).

Au-delà des aspects techniques, ces approches se heurtent également à des freins organisationnels, économiques et culturels importants : manque de compétences numériques, faible standardisation des données, inertie des pratiques conventionnelles de

démolition ou encore incertitudes économiques autour des filières de réemploi (Çetin et al., 2022). Le passage d'un bâtiment existant à un véritable « stock de matériaux » réutilisables ne dépend donc pas uniquement des capacités de détection ou de classification de l'IA, mais aussi de la capacité des acteurs à organiser concrètement le démontage, la logistique, le stockage et la réutilisation effective des composants identifiés.

Le cas *TU Delft* met ainsi en évidence une tension structurante entre *IT for Green* et *Green IT*. D'un côté, les outils numériques permettent de mieux documenter le bâti existant, de produire des inventaires matière détaillés et d'envisager des scénarios de déconstruction plus sélectifs et circulaires (De Wolf et al., 2024). De l'autre, ces workflows reposent sur des infrastructures numériques lourdes (scans 3D, stockage massif de données, calculs de classification et plateformes *cloud*) dont les impacts environnementaux restent encore peu visibles dans les indicateurs classiques de durabilité (Zhou, 2025 ; Mullen, 2023).

Ce cas montre finalement que l'intelligence artificielle appliquée à la fin de vie du bâtiment demeure aujourd'hui moins un outil de circularité pleinement opérationnel qu'un dispositif de lecture, de documentation et de mise en visibilité du bâti existant. Ces expérimentations constituent davantage un laboratoire méthodologique qu'un modèle stabilisé, mais elles révèlent déjà les transformations profondes qu'implique la numérisation du réemploi : nouvelles dépendances aux données, enjeux de gouvernance et de standardisation, montée en compétence des acteurs et nécessité d'intégrer simultanément ambitions circulaires et sobriété numérique (Setaki & van Timmeren, 2022).

Synthèses du cas 3

Tableau 10 : Analyse du cas TU Delft à partir de la grille IT for Green

Domaine	Critères	Observations
Performance énergétique	(Non prioritaire ici)	Focus sur l'énergie grise, pas l'exploitation
Gestion des pics	(Non applicable)	Pas de gestion de flux énergétiques en temps réel
Confort d'usage	(Non applicable)	Focus sur la structure et les matériaux
Efficacité spatiale	(Non applicable)	Non pertinent dans ce contexte
Sobriété matérielle	Volume de matière réemployée	Éviter la production de matériaux neufs
Circularité	Taux de réemploi (BIM)	Soutenir le réemploi via des inventaires matière numériques et des scénarios de déconstruction sélective

Tableau 11 : Analyse du cas TU Delft à partir de la grille Green IT

Domaine	Critères	Observations
Consommation IT	Énergie des calculs de vision	Traitement lourd des nuages de points (CNN)
Matérialité numérique	Matériel de scan (Lidar)	Empreinte des scanners et drones utilisés
Donnée	Poids des nuages de points	Stockage massif de données 3D haute résolution
Architecture système	Intensité computationnelle ponctuelle	Calcul fortement concentré lors des phases d'acquisition et de traitement des données
Dépendance technologique	Logiciels de vision	Dépendance à des workflows spécialisés de scan-to-BIM et de classification automatisée
Résilience	Possible en mode dégradé	Les workflows restent possibles manuellement, mais avec une perte importante de rapidité et de précision

Tableau 12 : Analyse du cas TU Delft à partir de la grille gouvernance

Domaine	Critères	Observations
Rôle humain et pilotage des systèmes	Vérification experte	L'IA assiste l'identification des composants, mais la validation reste assurée par des experts du bâti et du réemploi
Transparence	Algorithmes de vision	Difficulté d'évaluer la fiabilité et les biais des classifications automatisées
Gouvernance des données usagers	(Non applicable)	Pas de données privées (focus technique/matière)
Interopérabilité	OpenBIM / IFC	Standardisation des fiches "matériaux"
Résilience organisationnelle	Capacité d'intervention limitée	Dépendance à des compétences spécialisées et à des chaînes numériques complexes

L'analyse des trois cas permet désormais de dégager des tendances transversales et de comparer les résultats selon les axes définis.

7 Synthèse et discussion transversale

7.1 Objectifs et cadre de l'analyse

Cette synthèse vise à mettre en regard les trois études de cas afin d'identifier les logiques communes, les différences structurantes et les tensions récurrentes liées à l'intégration de l'intelligence artificielle dans le cycle de vie du bâtiment. L'objectif n'est pas de résumer chaque cas, mais de dégager des enseignements transversaux.

Plutôt que de comparer des performances absolues, l'analyse s'appuie sur une lecture qualitative et transversale des dispositifs d'IA, de leurs bénéfices environnementaux revendiqués et des coûts numériques associés. Les trois cas étudiés couvrent volontairement des phases distinctes du cycle de vie (conception, exploitation et fin de vie) afin d'observer comment la tension entre optimisation environnementale et empreinte numérique se reconfigure selon les temporalités, les infrastructures mobilisées et les modes de gouvernance.

Cette approche vise à interroger sur des conditions de pertinence, des seuils de bénéfice et des points de vigilance propres à chaque phase.

7.2 Analyse transversale : une IA aux visages multiples

La lecture transversale des trois études de cas révèle que les rapports entre bénéfices environnementaux et coûts numériques sont fortement dépendants du contexte d'usage et des choix de conception des systèmes (OECD, 2022 ; IEA, 2023).

Dans le cas *Autodesk Toronto*, l'IA est mobilisée en phase de conception comme outil d'exploration et d'optimisation multicritère (Pierce, 2020 ; Nagy et al., 2017). Les bénéfices *IT for Green* sont principalement anticipés et modélisés : amélioration de la compacité spatiale, meilleure exposition à la lumière naturelle, adéquation accrue aux usages (Gordon et al., 2023 ; Suphavarophas et al., 2024). Les coûts *Green IT* sont concentrés dans le temps, liés au calcul intensif et au stockage de données sur des infrastructures *cloud*, et restent peu visibles dans les bilans environnementaux du projet (Strubell et al., 2019 ; OECD, 2022).

À l'inverse, *The Edge* illustre une IA déployée en continu en phase d'exploitation (Jalia et al., 2018 ; Schneider Electric, 2015). Les bénéfices environnementaux y sont mesurés et documentés (réduction des consommations, confort, efficacité d'usage), mais ils reposent sur une infrastructure numérique dense et pérenne (AFPRO Filters, 2024). Les coûts *Green IT* sont ici diffus, récurrents et structurels, intégrés dans le fonctionnement quotidien du bâtiment, sans être explicitement distingués dans les indicateurs de performance énergétique (IEA, 2023 ; OECD, 2022).

Le cas *TU Delft* se situe dans une logique différente, tournée vers la fin de vie et la transformation du bâti existant. L'IA y agit comme un outil de révélation des ressources matérielles et de soutien à la déconstruction sélective (Gordon et al., 2023 ; Croce et al., 2023). Les bénéfices *IT for Green* relèvent principalement de scénarios prospectifs de circularité, tandis que les coûts numériques sont liés à la production, au traitement et à la conservation de grandes masses de données issues du *scan-to-BIM* (Çetin et al., 2022 ; Mullen, 2023).

Pris ensemble, les trois cas montrent que l'IA ne produit ni un gain environnemental ni un coût homogène, mais reconfigure différemment l'équilibre entre bénéfices et impacts selon la phase du cycle de vie, la temporalité des usages et la nature des infrastructures numériques mobilisées.

7.3 Enseignements clés et levier de durabilité

Plusieurs enseignements structurants émergent de l'analyse. Premièrement, l'IA apparaît moins comme un moteur autonome de durabilité que comme un amplificateur de stratégies existantes. Dans les trois cas, les gains environnementaux reposent d'abord sur des choix architecturaux, énergétiques ou organisationnels préalables, comme la compacité et qualité spatiale en conception, des dispositifs énergétiques performants en exploitation, le potentiel matériel du bâti existant en fin de vie. L'IA optimise, accélère ou rend visibles ces stratégies, sans s'y substituer. Cette lecture rejoint les analyses proposées dans la littérature, qui soulignent le rôle d'appui de l'IA plutôt que de substitution dans les démarches de conception durable (Elwy & Hagishima, 2024).

À titre d'exercice de pensée, il est toutefois possible d'envisager une situation inverse, dans laquelle l'intelligence artificielle jouerait un rôle moteur dans la définition même des stratégies de durabilité. Dans un tel scénario, les choix architecturaux et techniques pourraient être largement guidés, voire déterminés, par des systèmes d'optimisation algorithmique, reconfigurant le rôle de l'architecte vers une posture davantage orientée vers le cadrage des objectifs, l'interprétation des résultats et l'arbitrage entre différents scénarios de projet.. Plus les systèmes deviennent capables d'intégrer des critères multiples (énergie, flux, coûts, circularité, confort), plus la frontière entre assistance, co-conception et automatisation décisionnelle devient floue. Si cette configuration pourrait théoriquement conduire à des performances optimisées selon certains critères, elle soulèverait des questions importantes en termes de dépendance technologique, de perte de maîtrise du projet et de réduction de la diversité des réponses architecturales.

Cette hypothèse met en évidence que le rôle attribué à l'IA (outil d'amplification ou moteur décisionnel) constitue en lui-même un choix de projet, aux implications environnementales, organisationnelles et éthiques. La littérature sur la conception computationnelle souligne ainsi

que ces dispositifs transforment moins la figure de l'architecte qu'ils ne redéfinissent les relations entre calcul, conception et prise de décision.

Deuxièmement, les coûts *Green IT* présentent des profils très contrastés. Ils sont ponctuels mais intensifs en conception, continus et cumulés en exploitation, et intermittents mais massifs en fin de vie. Cette diversité rend toute évaluation globale particulièrement complexe sans outils spécifiques. Cette difficulté d'évaluation explique en partie leur faible intégration dans les pratiques courantes d'analyse environnementale, qui restent encore largement centrées sur les consommations opérationnelles du bâtiment plutôt que sur les externalités numériques, les infrastructures de calcul ou les coûts environnementaux des données (IEA, 2023 ; OECD, 2022).

Troisièmement, la gouvernance apparaît comme un facteur déterminant de la durabilité réelle des dispositifs. Les choix relatifs à l'architecture des systèmes (*edge* ou *cloud*), à la fréquence de collecte des données, à la dépendance aux plateformes propriétaires et à l'explicabilité des modèles conditionnent autant l'impact environnemental que la performance technique (Çetin et al., 2022 ; Panissod, 2019). Dans tous les cas, l'IA demeure durable uniquement lorsqu'elle reste pilotable, compréhensible et réversible (Dignum, 2019).

Enfin, les études de cas montrent que la durabilité de l'IA ne peut être réduite à des indicateurs énergétiques seuls. Elle implique également des dimensions organisationnelles, culturelles et informationnelles : capacité des acteurs à interpréter les résultats, à maintenir les systèmes et les inventaires numériques dans le temps, à assurer la qualité et la transmissibilité des données, ainsi qu'à adapter les méthodes à d'autres contextes de projet. (Sawhney et al., 2020; Nordregio, 2023).

7.4 Analyse par axes (*IT for Green*, *Green IT*, Gouvernance)

1. Analyse des bénéfices environnementaux (*IT for Green*)

Les bénéfices environnementaux associés à l'intelligence artificielle apparaissent fortement dépendants de la phase du cycle de vie dans laquelle elle est mobilisée.

Dans le cas de *The Edge*, l'IA intervient principalement en phase d'exploitation, sous la forme de systèmes de pilotage énergétique adaptatifs. Les bénéfices *IT for Green* sont ici mesurables et continus : réduction des consommations énergétiques, meilleure adéquation entre offre énergétique et usages réels, amélioration du confort thermique et visuel. L'IA agit comme un levier d'optimisation opérationnelle, venant renforcer un socle architectural et énergétique déjà performant. La valeur environnementale repose sur des indicateurs observables (kWh/m².an, confort, taux d'occupation utile), ce qui confère à ce cas une forte lisibilité en termes de performance.

À l'inverse, dans le cas *Autodesk Toronto*, l'IA est mobilisée en amont, dans la phase de conception. Les bénéfices environnementaux relèvent davantage d'une performance projetée que d'une performance mesurée. Le *design* génératif permet d'optimiser la compacité, l'accès à la lumière naturelle, l'efficacité spatiale et l'adéquation aux usages, avec des gains environnementaux potentiels en exploitation future. L'IA agit ici comme un outil d'exploration et de révélation de compromis, en rendant visibles des solutions plus sobres que celles issues d'un processus conventionnel. Toutefois, ces bénéfices restent conditionnés à la traduction fidèle des hypothèses de conception dans le bâtiment livré et exploité.

Le cas *TU Delft*, centré sur la fin de vie du bâtiment, met en lumière des bénéfices *IT for Green* encore plus indirects et conditionnels. L'IA contribue principalement à la mise en visibilité des ressources matérielles incorporées dans le bâti existant, en facilitant l'identification de gisements réemployables et la planification de déconstruction sélective. Les gains environnementaux relèvent ici d'un potentiel de circularité : réduction des déchets, diminution des impacts carbone liés à la production de nouveaux matériaux. Ces bénéfices sont majoritairement modélisés et prospectifs, dépendants de la structuration effective des filières de réemploi.

Cette analyse montre que l'IA ne génère pas un bénéfice environnemental homogène : elle produit des gains mesurés en exploitation, des gains projetés en conception et des gains potentiels en fin de vie. Toute évaluation globale de sa contribution à la durabilité architecturale doit donc intégrer cette diversité de temporalités et de niveaux de certitude.

2. Analyse des coûts numériques et impacts associés (*Green IT*)

L'analyse des coûts numériques révèle que les impacts *Green IT* sont présents dans les trois cas, mais sous des formes et des temporalités très différentes.

Dans le cas *The Edge*, les coûts numériques sont diffus, continus et structurels. Ils résultent de l'instrumentation dense du bâtiment (capteurs, réseau *PoE*), du fonctionnement permanent des systèmes de gestion technique, et du recours à des infrastructures *edge* et *cloud* pour le traitement et le stockage des données. Ces coûts sont rarement visibles dans les bilans énergétiques du bâtiment, car ils sont intégrés au fonctionnement normal du système, mais ils s'inscrivent dans la durée et soulèvent des enjeux d'obsolescence et de renouvellement du matériel.

Pour *Autodesk Toronto*, les coûts numériques sont au contraire ponctuels mais intensifs. L'essentiel de l'impact *Green IT* est concentré sur la phase de conception, lors des calculs massifs nécessaires à la génération et à l'évaluation de milliers de variantes spatiales. Bien que ces consommations restent faibles rapportées à la durée de vie du bâtiment, elles illustrent la matérialité énergétique du calcul algorithmique et posent la question de la sobriété computationnelle des workflows de conception.

Dans le cas *TU Delft*, les coûts numériques sont principalement liés à la gestion de données volumineuses : acquisition de nuages de points, stockage, traitement et re-analyse potentielle des données. Ces coûts sont variables selon les choix d'architecture numérique (local ou *cloud*) et selon la durée de conservation des données. À mesure que ces pratiques se généraliseraient, leur impact cumulé pourrait devenir significatif, notamment dans des patrimoines immobiliers étendus.

Cette analyse montre que les impacts *Green IT* ne sont ni anecdotiques ni uniformes. Ils varient selon la phase du cycle de vie, mais constituent dans tous les cas une externalité environnementale réelle, souvent absente ou faiblement prise en compte dans les référentiels environnementaux classiques du bâtiment (BREEAM, HQE, LEED), historiquement centrés sur les consommations opérationnelles, les matériaux ou la performance thermique, mais encore peu adaptés à l'évaluation des infrastructures numériques, du stockage des données et des coûts computationnels associés à l'IA.

3. Analyse des enjeux de gouvernance et de pilotage

Au-delà des dimensions énergétiques et matérielles, l'application de notre grille d'analyse met en évidence le rôle central de la gouvernance dans la durabilité réelle des systèmes d'IA.

Dans *The Edge*, la gouvernance repose sur une forte intégration des systèmes et sur un pilotage centralisé, avec un rôle humain principalement orienté vers la supervision et l'ajustement des paramètres. Si cette configuration permet une efficacité opérationnelle élevée, elle soulève des questions de dépendance aux fournisseurs, de transparence algorithmique et de maîtrise à long terme du système numérique.

Le cas *Autodesk Toronto* présente une gouvernance plus explicitement collaborative. L'IA y est conçue comme un outil d'aide à la décision, laissant aux architectes et aux équipes projet un rôle central dans l'arbitrage final. Toutefois, la dépendance aux plateformes logicielles propriétaires et l'opacité partielle des modèles d'optimisation interrogent non seulement la reproductibilité et la transférabilité de cette approche, mais aussi la fiabilité et la vérifiabilité des évaluations produites par les algorithmes.

Dans le cas *TU Delft*, la gouvernance apparaît comme un enjeu critique et encore instable. Les projets reposent sur des collaborations multi-acteurs et sur des données partagées entre institutions, chercheurs et opérateurs. Les questions de propriété des modèles, de standardisation des formats et de responsabilité dans les décisions de déconstruction sont centrales, et conditionnent largement la capacité de ces outils à dépasser le stade expérimental.

Cette analyse confirme que la durabilité de l'IA en architecture ne dépend pas uniquement de ses performances techniques, mais de la manière dont elle est pilotée, comprise et encadrée.

L'absence de cadres explicites de gouvernance limite aujourd'hui la capacité des acteurs à arbitrer entre bénéfices environnementaux attendus et coûts associés aux infrastructures numériques : consommation énergétique du calcul, stockage massif des données, dépendance au *cloud*, renouvellement des équipements ou encore opacité des plateformes et des algorithmes. Les enjeux de gouvernance concernent ainsi autant les choix techniques que la répartition des responsabilités, la maîtrise des données et la capacité à rendre visibles des impacts encore largement absents des référentiels classiques d'évaluation environnementale.

L'analyse des études de cas met en évidence que les décisions relatives à l'intégration de l'intelligence artificielle dans les projets architecturaux sont rarement formalisées comme telles. Le choix du niveau d'instrumentation, de l'architecture numérique (*edge* ou *cloud*), de la fréquence de collecte des données ou de la durée de conservation des informations relève souvent d'arbitrages implicites, répartis entre différents acteurs du projet.

La grille d'analyse proposée dans ce travail vise précisément à rendre ces arbitrages visibles et discutables. Elle permet de déplacer la question du « **peut-on le faire ?** » vers celle du « **faut-il le faire, et à quelles conditions ?** ». En articulant bénéfices environnementaux et coûts numériques, elle offre un support pour discuter et structurer la gouvernance des décisions tout au long du cycle de vie du bâtiment.

Dans cette perspective, la gouvernance du numérique devient une composante à part entière du projet architectural. Elle implique le maître d'ouvrage, les concepteurs, les exploitants et, indirectement, les usagers. La grille peut ainsi servir de support de dialogue pour définir des objectifs de durabilité réalistes, fixer des seuils de suffisance numérique et éviter une surenchère technologique peu compatible avec les principes de sobriété.

Afin de synthétiser les principaux résultats de cette analyse transversale, le tableau suivant propose une lecture des trois études de cas selon les critères clés de la grille.

Tableau 13 : Analyse des trois études de cas

Critères d'analyse	Cas 1 : The Edge (exploitation)	Cas 2 : Autodesk Toronto (conception)	Cas 3 : TU Delft (fin de vie)
Logique dominante	Optimisation opérationnelle : Réduction immédiate des flux (énergie, confort).	Exploration générative : Optimisation de la forme et de la compacité.	Révélation des ressources : Identification des gisements pour la circularité.
Temporalité du	Immédiate et	Différée et projetée :	Conditionnelle :

bénéfice	continue : Mesurable en temps réel (kWh/m ² .an).	Potentiel de gain sur la vie future du bâtiment.	Dépendante de la structuration des filières de réemploi.
Profil de coût Green IT	Diffuse et structurelle : Instrumentation dense, flux de données permanents.	Intensive et concentrée : Pics de calcul massif (Cloud) durant la conception.	Massive et intermittente : Traitement lourd de données (nuages de points).
Rôle de l'humain (gouvernance)	Superviseur : L'IA gère l'autonomie, l'humain ajuste les consignes.	Arbitre : L'IA propose des variantes, l'architecte tranche les compromis.	Expert : L'IA classe, l'ingénieur valide la réutilisabilité structurelle.
Angle mort majeur	Obsolescence matérielle : Durée de vie des capteurs < Durée de vie du bâti.	Opacité du calcul : Coût énergétique du Cloud invisible dans le projet.	Responsabilité juridique : Fiabilité des données pour la sécurité structurelle.

7.5 Limites récurrentes

Malgré leurs apports, les trois études de cas présentent des limites récurrentes qui éclairent les angles morts actuels de l'intelligence artificielle appliquée à l'architecture durable. Un premier angle mort concerne la quantification précise et transparente des coûts numériques. Les consommations énergétiques liées au calcul, au stockage des données et aux infrastructures *cloud*, ainsi que la durée de vie et le renouvellement des équipements numériques, restent rarement documentés de manière exhaustive (OECD, 2022 ; IEA, 2023). Cette opacité empêche une mise en regard rigoureuse entre les gains environnementaux revendiqués côté bâtiment (*IT for Green*) et les impacts propres du numérique (*Green IT*) (Pachot & Patissier, 2022).

Un second point aveugle réside dans la désynchronisation des temporalités : alors que le bâti s'inscrit dans des cycles de vie de plusieurs décennies, les infrastructures numériques et les plateformes logicielles évoluent rapidement, générant des phénomènes d'obsolescence, de dépendance technologique et d'incertitude quant à l'amortissement environnemental réel des systèmes d'IA. Mais aussi un manque de continuité entre les différentes phases de vie du bâtiment (Çetin et al., 2022).

Par ailleurs, les critères mobilisés dans les projets restent majoritairement centrés sur la performance technique ou énergétique, au détriment de critères de sobriété numérique, de suffisance fonctionnelle ou de pertinence d'usage (OECD, 2022). Le risque est alors de légitimer une sur-instrumentation au nom de l'optimisation, sans seuil explicite de bénéfice environnemental ni arbitrage documenté (Babinet, 2024).

Enfin, les cas étudiés révèlent des limites fortes en matière de gouvernance des données et des dispositifs algorithmiques. La transparence des modèles, la lisibilité des critères de pondération, la propriété des données et leur interopérabilité restent souvent partielles.

L'application de la grille d'analyse aux trois études de cas montre qu'elle permet de rendre visibles des dimensions souvent fragmentées ou implicites dans les projets architecturaux intégrant de l'IA. Elle révèle que la contribution de l'IA à la durabilité ne peut être évaluée ni uniquement à partir de performances énergétiques, ni indépendamment de son socle numérique et organisationnel.

En articulant *IT for Green*, *Green IT* et gouvernance, la grille offre un cadre de lecture capable d'éclairer les choix de conception, d'exploitation et de transformation du bâti. Elle ne vise pas à hiérarchiser les projets entre eux, mais à expliciter les conditions de pertinence de l'IA selon les contextes et les phases du cycle de vie.

Cette application comparative confirme enfin la nécessité de disposer d'outils intermédiaires, situés entre l'évaluation environnementale et le discours technologique, pour piloter de manière plus responsable l'intégration de l'intelligence artificielle dans l'architecture durable (Dignum, 2019 ; Panissod, 2019). À ces enjeux s'ajoutent des dimensions encore peu abordées dans les projets analysés, telles que l'acceptabilité sociale des dispositifs de collecte, les questions de souveraineté numérique ou les implications en termes de justice environnementale (Nordregio, 2023).

Ces angles morts soulignent la nécessité de cadres de pilotage explicites, capables d'intégrer à la fois les dimensions techniques, environnementales et socio-politiques de l'IA dans le projet architectural (Floridi, 2023).

7.6 Retour critique sur la grille d'analyse proposée

A. Apports et limites de la grille

1. Apports de la grille

Un premier apport majeur de la grille est de rendre visibles des externalités souvent invisibles. En intégrant des critères liés aux coûts numériques (consommation énergétique des infrastructures *IT*, volumes de données, obsolescence des équipements) elle permet de déplacer le regard au-delà des seuls gains *IT for Green*, et d'interroger la durabilité réelle des dispositifs d'IA à l'échelle du projet architectural. Son principal apport réside dans la capacité à structurer une lecture transversale des projets, en dépassant une approche strictement technico-énergétique pour intégrer des dimensions de sobriété numérique et de gouvernance.

La grille offre également un cadre d'analyse commun pour des situations pourtant très hétérogènes. En s'appliquant à des projets de conception, d'exploitation et de fin de vie, elle montre que l'IA ne constitue pas une solution homogène, mais un ensemble de fonctions aux impacts différenciés selon les phases du cycle de vie. Cette capacité à comparer sans homogénéiser constitue un levier important pour éclairer les décisions de maîtrise d'ouvrage et de conception.

Un troisième apport réside dans l'intégration explicite de la dimension de gouvernance. En évaluant le rôle de l'humain, la transparence des algorithmes, la dépendance aux plateformes et l'interopérabilité des systèmes, la grille souligne que la durabilité ne se réduit pas à des critères physiques ou énergétiques, mais repose aussi sur des choix organisationnels, éthiques et stratégiques. Elle contribue ainsi à repositionner l'architecte et les acteurs du projet comme des décideurs responsables des usages numériques qu'ils mobilisent.

Enfin, la grille se veut un outil d'aide à la décision en plus d'un outil d'analyse. Sa souplesse (combinant critères quantitatifs, estimatifs et qualitatifs) la rend applicable dans des contextes où les données sont partielles ou hétérogènes, ce qui correspond à la réalité actuelle des projets intégrant de l'IA. Cette approche favorise le dialogue entre acteurs et la prise de conscience des arbitrages plutôt que la production d'un score unique.

2. Limites de la grille

Malgré ces apports, la grille présente plusieurs limites qu'il convient d'explicitier. La première tient à la disponibilité et à la fiabilité des données. De nombreux critères, en particulier ceux liés aux coûts numériques, reposent sur des ordres de grandeur issus de la littérature ou sur des estimations qualitatives. Cette incertitude limite la précision des comparaisons et souligne la nécessité d'une meilleure transparence de la part des fournisseurs de solutions numériques et des exploitants.

Une seconde limite concerne la difficulté de quantifier certains enjeux de gouvernance et de sobriété. Des notions telles que la suffisance numérique, la qualité du pilotage humain ou l'acceptabilité sociale des dispositifs ne se prêtent pas facilement à une mesure standardisée. Leur évaluation reste en partie subjective et dépendante du contexte institutionnel et culturel du projet.

Par ailleurs, la grille ne prétend pas couvrir l'ensemble des impacts environnementaux et sociaux du numérique à l'échelle macro. Elle se situe volontairement à l'échelle du projet architectural et n'intègre que de manière indirecte des dimensions plus larges telles que la géopolitique des ressources, les politiques énergétiques ou les conditions de production des équipements numériques. Elle doit donc être comprise comme un complément aux outils d'évaluation environnementale existants, et non comme un substitut.

Enfin, l'application de la grille suppose un niveau minimal de maturité numérique des acteurs du projet. Sans compétences pour comprendre les logiques algorithmiques, interpréter les critères et arbitrer les usages, le risque est que la grille reste un exercice formel sans effet réel sur les décisions. Sa pertinence dépend donc fortement de la capacité des institutions et des équipes à s'approprier ces outils de manière critique.

B. Positionnement de la grille dans le projet de recherche :

En dépit de ces limites, la grille proposée constitue une contribution pertinente pour structurer la réflexion sur l'intelligence artificielle et la durabilité architecturale. Elle met en évidence que la question n'est pas de savoir si l'IA est « bonne » ou « mauvaise » pour l'environnement, mais dans quelles conditions elle devient pertinente, proportionnée et gouvernable.

Cette approche ouvre la voie à des développements futurs, notamment l'enrichissement de la grille par des données empiriques issues de projets en exploitation, son adaptation à des contextes institutionnels spécifiques (parcs universitaires, patrimoines publics). Elle prépare ainsi la conclusion générale du travail, en recentrant le débat sur le pilotage éclairé et responsable de l'IA dans l'architecture durable.

La grille d'analyse développée dans ce travail se veut un outil d'aide à la décision. Elle repose sur des critères partiellement hétérogènes, combinant des données quantitatives mesurables et des critères qualitatifs liés à la gouvernance, à la transparence ou à la pertinence des usages. Cette hybridation constitue à la fois une force et une limite.

Au-delà des résultats comparatifs, ces observations appellent une mise en perspective plus large, permettant de discuter les implications théoriques et pratiques de l'intégration de l'IA en architecture.

8 Discussion – Mise en perspective

A. Repenser la contribution réelle de l'IA à la durabilité architecturale

L'analyse des études de cas et l'application de la grille d'analyse montrent que l'intelligence artificielle ne constitue ni un levier universel ni une solution autonome pour la durabilité architecturale. Sa contribution dépend fortement du moment où elle est mobilisée, de la nature des usages qu'elle soutient et du cadre organisationnel dans lequel elle s'inscrit. Plutôt que de produire un gain environnemental intrinsèque, l'IA agit comme un amplificateur de stratégies existantes, renforçant des choix architecturaux, énergétiques ou organisationnels déjà orientés vers la sobriété (ou, à l'inverse, accentuant des logiques de complexification technologique).

Cette observation invite à dépasser une lecture solutionniste de l'IA, encore très présente dans les discours sur le *smart building* et la ville intelligente (Dignum, 2019). Les cas étudiés montrent que les bénéfices environnementaux associés à l'IA sont rarement indépendants d'un socle architectural et technique performant. L'IA optimise, ajuste, anticipe, mais ne remplace ni la qualité du projet architectural ni les choix fondamentaux de conception.

B. Le paradoxe numérique : optimiser le bâti en complexifiant le système

Un enseignement central de ce travail réside dans la mise en évidence d'un paradoxe numérique : les dispositifs d'IA visant à améliorer la performance environnementale du bâti reposent eux-mêmes sur des infrastructures énergivores, matérielles et organisationnellement complexes. Ce paradoxe traverse l'ensemble des phases du cycle de vie du bâtiment.

En exploitation, l'optimisation énergétique continue s'accompagne d'une dépendance à une instrumentation dense et à des systèmes de traitement de données permanents. En conception, la recherche de solutions plus sobres mobilise des puissances de calcul importantes, souvent externalisées vers des infrastructures *cloud*. En fin de vie, la promesse de circularité repose sur la production et la gestion de volumes de données considérables.

Ce constat ne conduit pas à disqualifier l'IA, mais à reconnaître que toute optimisation environnementale par le numérique s'accompagne d'un coût propre, souvent invisibilisé bien que documenté dans les travaux sur l'empreinte énergétique des infrastructures numériques et des systèmes de données (IEA, 2023 ; OECD, 2022). La durabilité de l'IA ne peut donc être évaluée uniquement à partir des gains qu'elle génère sur le bâti, mais doit intégrer les impacts du système numérique dans son ensemble.

C. De la performance à la gouvernance : un changement de focale nécessaire

L'un des apports majeurs de ce travail est de montrer que la question de la durabilité de l'IA en architecture ne relève pas uniquement de la performance technique, mais de la gouvernance des usages numériques. Les cas étudiés révèlent que les décisions les plus structurantes ne portent pas seulement sur les algorithmes ou les capteurs, mais sur des choix plus fondamentaux : niveau d'instrumentation jugé suffisant, architecture *edge* ou *cloud*, durée de conservation des données, degré de dépendance aux plateformes propriétaires, place laissée à l'arbitrage humain.

Ces dimensions sont aujourd'hui peu outillées dans la pratique architecturale. Les outils d'évaluation existants mesurent principalement des performances énergétiques ou environnementales, sans offrir de cadre explicite pour arbitrer entre gains *IT for Green* et impacts *Green IT*. Ces enjeux s'inscrivent plus largement dans les débats relatifs à l'éthique de l'intelligence artificielle, notamment en matière de transparence, de responsabilité et de gouvernance des systèmes (Commission nationale d'éthique, 2024). La grille proposée dans ce travail s'inscrit précisément dans ce manque, en proposant un cadre intermédiaire de

pilotage.

D. Limites structurelles et risque d'effet rebond

Si les études de cas analysées démontrent que l'intelligence artificielle peut contribuer à une amélioration mesurable de certaines performances environnementales du bâti, elles mettent également en lumière des limites structurelles qui dépassent la simple question de l'efficacité technique. L'IA opère principalement comme un outil d'optimisation, agissant sur des paramètres existants à partir de données historiques ou en temps réel (De Wolf et al., 2024). Cette logique, fondée sur l'amélioration continue, peut entrer en tension avec les exigences de sobriété radicales nécessaires face à l'urgence climatique (Panissod, 2019).

Un premier risque réside dans les effets rebond. Les gains d'efficacité permis par les systèmes intelligents peuvent conduire à une augmentation indirecte des usages : multiplication des capteurs, raffinement excessif des algorithmes, maintien de niveaux de confort élevés ou extension des services numériques. Dans ce cas, l'optimisation locale masque une augmentation globale des consommations, phénomène déjà largement documenté dans les travaux sur les limites de l'efficacité technologique et les effets rebond associés aux systèmes numériques (Pachot & Patissier, 2022).

Par ailleurs, l'intelligence artificielle repose sur des données passées ou observées, ce qui limite sa capacité à anticiper des ruptures profondes de modes de vie ou d'usages. Elle tend ainsi à consolider des schémas existants plutôt qu'à questionner les besoins fondamentaux du bâti. Dans cette perspective, l'IA ne peut se substituer à une réflexion architecturale et politique sur la réduction des surfaces, la mutualisation des espaces ou la remise en question de certains standards de confort.

Enfin, la dépendance aux infrastructures numériques pose une limite matérielle et énergétique difficilement compressible. Même optimisée, l'IA demeure tributaire de réseaux, de serveurs et de dispositifs électroniques dont la fabrication et le renouvellement sont incompatibles avec une vision strictement frugale du bâti. Ces éléments invitent à considérer l'IA non comme un moteur autonome de durabilité, mais comme un outil conditionnel, dont la pertinence dépend étroitement du cadre dans lequel il est mobilisé.

E. Vers une frugalité numérique : questionner le recours à l'intelligence artificielle

Les résultats de ce travail invitent à dépasser une approche centrée uniquement sur l'optimisation des systèmes existants pour interroger plus fondamentalement la place du numérique dans les projets architecturaux. Au-delà des arbitrages entre bénéfices environnementaux et coûts numériques, une question se pose : dans quelle mesure le recours à l'intelligence artificielle est-il toujours nécessaire, pertinent ou proportionné ?

Les travaux récents sur la sobriété numérique et les approches *low-tech* suggèrent que la

durabilité ne peut se limiter à une amélioration de l'efficacité des systèmes, mais implique également une capacité à réduire, voire à éviter certains usages numériques. Cette perspective marque un déplacement important : il ne s'agit plus seulement de rendre l'intelligence artificielle plus performante, mais de questionner les conditions de son déploiement et sa légitimité dans certains contextes (Dautremont, à paraître).

Dans cette optique, la notion de « technologie à bon escient » apparaît centrale. Elle consiste à envisager le recours au numérique non comme une évidence, mais comme un choix situé, devant être justifié au regard des impacts environnementaux et sociaux qu'il implique. Cette approche s'inscrit dans une logique de proportionnalité : toute technologie mobilisée doit produire un bénéfice réel, mesurable et supérieur aux ressources qu'elle mobilise.

Les approches *low-tech* et frugales prolongent cette réflexion en proposant de réduire l'intensité technologique des dispositifs, en privilégiant des solutions robustes, réparables et moins dépendantes d'infrastructures complexes. Dans le domaine architectural, cela peut se traduire par une limitation volontaire du niveau d'instrumentation, un recours accru à des stratégies passives ou encore une attention portée aux usages plutôt qu'aux performances maximisées.

Cette perspective met également en évidence une limite structurelle : la capacité à réduire le recours au numérique ne dépend pas uniquement de la volonté des concepteurs. Elle est conditionnée par des cadres réglementaires, des standards professionnels et des dépendances technologiques qui restreignent les marges de manœuvre des acteurs. La réduction du numérique apparaît ainsi comme un enjeu systémique, dépassant l'échelle du projet architectural pour interroger les modes de production et les référentiels dominants du secteur (Dautremont, à paraître).

Enfin, cette approche ouvre sur une critique des imaginaires associés à l'intelligence artificielle en architecture. Souvent présentée comme un vecteur de performance, d'optimisation et d'innovation, elle tend à invisibiliser ses coûts matériels et environnementaux. À l'inverse, des imaginaires alternatifs, tels que les approches frugales ou les courants comme le solar punk, proposent de réinscrire les technologies dans des logiques de sobriété, de résilience et d'ancrage local.

Dans cette perspective, la durabilité de l'architecture ne repose pas uniquement sur la capacité à intégrer des systèmes intelligents, mais sur la faculté à en arbitrer la nécessité, à en limiter l'usage et à les inscrire dans une approche globale des ressources. L'intelligence artificielle apparaît alors non comme une solution à généraliser, mais comme un outil conditionnel, dont la pertinence doit être continuellement interrogée.

F. Le nouveau rôle de l'architecte face à l'intelligence artificielle : arbitrage et responsabilité

L'intégration croissante de l'intelligence artificielle dans les processus de conception, d'exploitation et de transformation du bâti interroge directement le rôle et la responsabilité de l'architecte. Les cas étudiés montrent que l'IA ne remplace pas la décision humaine, mais reconfigure les modalités de l'arbitrage architectural, en déplaçant une partie de la rationalité décisionnelle vers des modèles algorithmiques.

Dans ce contexte, l'architecte n'est plus uniquement concepteur de formes ou organisateur d'espaces, il est également médiateur entre des objectifs environnementaux, des contraintes numériques et des choix de gouvernance. **Il lui revient de définir les seuils de pertinence de l'IA : quand son apport est-il réellement justifié ? Quand devient-il marginal, voire contre-productif du point de vue environnemental ?** Il lui revient également d'interroger les conditions dans lesquelles le recours à l'IA est réellement pertinent : apporte-t-elle ici une capacité d'analyse inaccessible autrement, ou produit-elle surtout une complexification technique et computationnelle disproportionnée par rapport aux gains environnementaux obtenus ?

Cette responsabilité s'étend également à la lisibilité des choix opérés. Les systèmes d'IA, souvent perçus comme des « boîtes noires », peuvent affaiblir la traçabilité des décisions si leurs critères et pondérations ne sont pas explicités. **Le rôle de l'architecte consiste alors à maintenir une capacité critique face aux résultats produits par les outils numériques**, à en comprendre les limites et à en assumer les conséquences environnementales et sociales. Le rôle de l'architecte consiste alors moins à accepter les résultats produits par les outils numériques qu'à en questionner les critères, les pondérations et les limites : que mesurent réellement les modèles ? quels arbitrages rendent-ils invisibles ? quelles dimensions du projet échappent encore au calcul ? La question n'est donc peut-être pas de savoir si l'IA remplacera la décision architecturale, mais plutôt quelles formes de discernement, de responsabilité et de gouvernance deviennent nécessaires à mesure que les systèmes algorithmiques prennent une place croissante dans les processus de conception et de gestion du bâti.

Ainsi, loin d'automatiser la décision architecturale, l'IA renforce la nécessité d'un pilotage humain éclairé. **La durabilité de l'architecture ne dépend pas seulement de la performance des algorithmes, mais de la capacité des acteurs à en encadrer l'usage dans une logique de responsabilité, de proportionnalité et de discernement.**

L'architecte devient également capable d'arbitrer non seulement le déploiement de l'IA, mais aussi sa limitation ou son absence lorsque celle-ci apparaît disproportionnée. Ces éléments permettent de répondre à la question de recherche et d'ouvrir sur des perspectives pour la pratique architecturale.

9. Conclusion

Ce travail s'est inscrit dans un contexte marqué par une double injonction : d'une part, la nécessité de réduire drastiquement l'empreinte environnementale du secteur du bâtiment ; d'autre part, la montée en puissance des technologies numériques et de l'intelligence artificielle, fréquemment présentées comme des leviers privilégiés de cette transition. À travers l'analyse de bâtiments tertiaires dits « intelligents », ce travail a cherché à dépasser une lecture solutionniste de l'IA pour interroger sa contribution réelle à la durabilité architecturale, en articulant les logiques d'*IT for Green* et de *Green IT* dans une perspective de gouvernance.

Les études de cas analysées ont mis en évidence que l'intelligence artificielle peut effectivement produire des bénéfices environnementaux mesurables, à condition d'être mobilisée de manière ciblée et contextualisée. En phase de conception, les outils de *design* génératif permettent d'explorer un espace de solutions plus large et d'optimiser la compacité, l'éclairage naturel ou l'adéquation aux usages. En exploitation, les systèmes de pilotage prédictif améliorent l'efficacité énergétique et le confort en ajustant finement les consommations aux usages réels. Enfin, en fin de vie, les approches de *scan-to-BIM* et de classification assistée par IA ouvrent des perspectives nouvelles pour le réemploi et la déconstruction sélective. Toutefois, ces bénéfices restent largement conditionnés par la qualité des données, le niveau d'instrumentation, les compétences mobilisées et les choix de gouvernance effectués en amont. L'analyse montre que la valeur de l'IA réside moins dans son autonomie que dans sa capacité à être un levier d'exploration en conception, d'optimisation en exploitation et de révélation des ressources en fin de vie.

En miroir, l'analyse a rendu visibles des coûts numériques souvent absents des discours sur l'architecture durable. Les infrastructures de calcul, de stockage et de réseau, la multiplication des capteurs, la dépendance au *cloud* et l'obsolescence rapide des équipements constituent une empreinte environnementale propre, rarement intégrée aux outils d'évaluation du bâti. Les trois cas étudiés illustrent ainsi un paradoxe récurrent : les gains obtenus à l'échelle du bâtiment peuvent s'accompagner d'un déplacement des impacts vers le socle numérique, si aucune stratégie explicite de sobriété et de pilotage n'est mise en place. Cette tension ne relève pas uniquement d'un problème technique, mais d'un véritable enjeu de gouvernance des projets architecturaux. Le paradoxe identifié réside dans la tension entre des gains environnementaux souvent différés ou prospectifs et des coûts numériques, eux, bien réels, qu'ils soient ponctuels et intensifs ou diffus et structurels.

L'apport central de ce travail réside dans la formalisation d'une grille de critères articulant *IT for Green* et *Green IT*, conçue comme un outil d'aide à la décision. En structurant conjointement les bénéfices environnementaux recherchés et les coûts numériques induits, cette grille permet de rendre comparables des dimensions habituellement évaluées séparément. Elle offre un cadre pour expliciter les arbitrages, questionner la pertinence des niveaux

d'instrumentation, et soutenir des choix de cas, elle a montré sa capacité à éclairer les décisions tout au long du cycle de vie du bâtiment, tout en restant adaptable à d'autres contextes de projet.

Ce travail présente néanmoins plusieurs limites. Les analyses s'appuient sur des données majoritairement secondaires et sur des ordres de grandeur issus de la littérature, en raison du manque de transparence sur les consommations numériques réelles des projets étudiés. La grille proposée ne prétend donc pas à une mesure exhaustive ou universelle, mais à une lecture critique située. Par ailleurs, la dimension sociale et politique de la transition numérique (en particulier les enjeux de justice environnementale, de souveraineté des données et d'acceptabilité des dispositifs de collecte) mériterait d'être approfondie dans des recherches ultérieures.

Cette réflexion ouvre également la voie à une approche plus radicale de la durabilité, fondée non seulement sur l'optimisation des systèmes numériques, mais aussi sur la capacité à en limiter le recours lorsque celui-ci n'est pas justifié.

9.1 Apports du travail et implications pour la pratique architecturale

Sur le plan académique, ce travail contribue à une lecture plus nuancée de l'IA en architecture durable, en articulant trois dimensions souvent traitées séparément. Il montre que l'IA ne peut être évaluée indépendamment des contextes de projet et des choix organisationnels qui la structurent.

Sur le plan professionnel, les résultats invitent à repositionner l'architecte et les acteurs du projet comme acteurs de gouvernance du numérique, et non comme simples utilisateurs d'outils. Intégrer l'IA de manière responsable suppose de développer une culture critique des technologies numériques, capable de questionner leur pertinence, leur proportionnalité et leurs effets à long terme.

En conclusion, ce travail propose de déplacer le débat sur l'intelligence artificielle en architecture : d'une logique de promesse technologique vers une logique de pilotage éclairé et responsable. L'IA n'y apparaît ni comme une solution miracle ni comme un problème en soi, mais comme un ensemble de dispositifs à encadrer, à dimensionner et à gouverner. C'est dans cette capacité à articuler performance environnementale, sobriété numérique et responsabilité décisionnelle que réside, aujourd'hui, la condition d'une intelligence artificielle réellement compatible avec les ambitions de l'architecture durable.

10. Bibliographie

Ouvrages et articles scientifiques

- Attia, S., Bilir, S., Safy, T., Struck, C., Loonen, R. C. G. M., & Goia, F. (2018). Current trends and future challenges in the performance assessment of adaptive façade systems. *Energy and Buildings*, 179, 165-182
- Babinet, G. (2024). *Green IA*. Odile Jacob.
- Bock, T., & Linner, T. (2015). *Robot-oriented design: Design and management tools for the deployment of automation and robotics in construction*. Cambridge University Press.
- Bourbia, S., Kazeoui, H., & Belarbi, R. (2023). A review on recent research on bio-based building materials and their applications. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 12, 117-139.
- Chaillou, S. (2021). *L'intelligence artificielle au service de l'architecture*. Le Moniteur.
- Pluchart, J.-J., & Bonnet, D. (Eds.). (2022). *Intelligence humaine et intelligence artificielle*. Eska.
- Dagadkar, S., Dagadkar, T., Barhate, A., Tale, A., Dagadkar, A., & Verma, P. (2025). Sustainable architecture and artificial intelligence: A collaborative approach for a greener future. *Journal of Information Systems Engineering & Management*, 10(35s), 591–604.
- Dautremont, C. (à paraître). *Enjeux éthiques, politiques et durables des écosystèmes numériques en général pour la pratique de l'architecture*. Manuscrit non publié, Université de Liège.
- de Boissieu, A. (2022). Introduction to Computational Design: Subsets, Challenges in Practice and Emerging Roles. In: Bolpagni, M., Gavina, R., Ribeiro, D. (eds) *Industry 4.0 for the Built Environment: Methodologies, Technologies and Skills*, 20, 55-75. Springer.
- Dignum, V. (2019). *Responsible artificial intelligence: How to develop and use AI in a responsible way*. Springer.
- Elwy, I., & Hagishima, A. (2024). The artificial intelligence reformation of sustainable building design approach: A systematic review on building design optimization methods using surrogate models. *Energy and Buildings*, 323, 114769.
- Flaih, L. R. (2022). Information Systems governance and green information technologies. *Proceedings of COCOS22*, Cihan University.
- Floridi, L. (2023). *L'éthique de l'intelligence artificielle : Principes, défis et opportunités*. Mimésis.
- Kolarevic, B., & Malkawi, A. M. (Eds.). (2004). *Performative architecture: Beyond instrumentality*. Routledge.
- Li, D., Qi, Z., Zhou, Y., Elchalakani, M., (2025). Machine learning applications in building energy systems: Review and prospects. *Buildings*, 15(4), 648.
- Michalakopoulos, V., Pelekis, S., Kormpakis, G., Karakolis, V., Mouzakitis, S., & Askounis, D. (2023). Data-driven building energy efficiency prediction using physics-informed neural networks. *Energy and Buildings*, 298, 111293.
- Nguyen, A.-T., Reiter, S., & Rigo, P. (2014). A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy*, 113, 1043–1058.
- Pachot, A., & Patissier, C. (2022). Dunod. *Intelligence artificielle et environnement : alliance ou nuisance ?*
- Pan, Y., & Zhang, L. (2021). A BIM-data mining integrated digital twin framework for advanced project management. *Automation in Construction*, 124, 103564.
- Panissod, Q. (2019). *Intelligence artificielle et bâtiment : que se passera-t-il demain ?*

Constructif, 54(3), 58-63.

- Sawhney, A., Riley, M., & Irizarry, J. (Eds.). (2020). *Construction 4.0: An innovation platform for the built environment*. Routledge.
- Schwartz, R., Dodge, J., Smith, N. A., & Etzioni, O. (2020). Green AI. *Communications of the ACM*, 63(12), 54-63.
- Strubell, E., Ganesh, A., & McCallum, A. (2019). Energy and policy considerations for deep learning in NLP. *In Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, 3645–3650.
- Suphavarophas, P., Wongmahasiri, R., Keonil, N., & Bunyarittikit, S. (2024). A systematic review of applications of generative design methods for energy efficiency in buildings. *Buildings*, 14(5), 1311.
- Usman, A., Sobia, B., Mohammad Haris, S., Divyanshu, S., Cathal, H., Wangda, Z., Neil, H., & James, O. (2024). Urban building energy performance prediction and retrofit analysis using data-driven machine learning approach. *Energy and Buildings*, 304, 113928.
- Yu, L., Qin, S., Zhang, M., Shen, C., Jiang, T. & Guan, X., (2021). A Review of Deep Reinforcement Learning for Smart Building Energy Management. *IEEE Internet of Things Journal*, 8 (15), 12046-12063

Rapports et publications institutionnels

- Agence de la transition écologique (ADEME). (2025). *Évaluation de l'impact environnemental du numérique en France*. ADEME.
- Commission nationale d'éthique. (2024). *L'éthique face à l'intelligence artificielle* (Avis CNE).
- International Energy Agency (IEA) (2023). *Electricity market report 2023: Analysis and forecast to 2025*. IEA.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2019). *Artificial intelligence in society*. OECD Publishing.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2022). *Measuring the environmental impacts of artificial intelligence compute and applications* (OECD Digital Economy Papers, No. 336).
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (2021). *Recommandation sur l'éthique de l'intelligence artificielle*.
- United Nations Environment Programme. (UNEP) (2022). *2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector*.
- United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat). (2022). *AI & cities: Risks, applications and governance*.

Publications en ligne, conférences, articles web

- Actualités UQAM. (2025, janvier). *Pour une IA respectueuse de l'environnement*.
- Broadsword Group. (2024, février). *The environmental impact of traditional construction methods*.
- GoodPlanet. (2024, 20 mars). *Les déchets électroniques prolifèrent plus vite que prévu*.
- Hubert, T. (2024, 25 avril). *IA et efficacité énergétique des bâtiments : détection d'anomalies et*

optimisation des performances grâce aux données. Construction21.

- Institut du Numérique Responsable. (2019, 31 mai). *INR | Numérique plus régénérateur, inclusif et éthique.*
- MIT Technology Review. (2019, 6 juin). *Training a single AI model can emit as much carbon as five cars in their lifetimes.*
- Nexa. (2025, 19 décembre). Bilan carbone de l'intelligence artificielle : Analyse et axes d'amélioration.
- Université de Liège. (2025, 6 janvier). *Sobriété numérique, numérique responsable et enjeux de durabilité* [Vidéo]. YouTube.

Sources des études de cas

- AFPRO Filters. (2024, 28 février). *Étude de cas : The Edge, modèle mondial pour l'écologie et les économies d'énergie.*
- ArchInspires. (2024, 11 août). *Case Study: Sustainable Features of The Edge in Amsterdam.*
- Building Research Establishment. (2016). *BREEAM certification report: The Edge Amsterdam.* BRE Group.
- Jalia, A., Bakker, R., & Ramage, M. (2018). *The Edge, Amsterdam: Showcasing an exemplary IoT building.* Centre for Digital Built Britain, University of Cambridge.
- Massachusetts Institute of Technology. (2023). *EDGE: Sustainable real estate in the digital age.* MIT OpenCourseWare.
- Subramanian, N. (2025, 5 avril). *The Edge, Amsterdam: A paradigm of smart and sustainable design.* Parametric Architecture.
- PLP Architecture. (2015). *The Edge, Amsterdam.*
- Schneider Electric. (2015, 17 juin). *Schneider Electric helps make The Edge "the world's most sustainable office building"* [Customer success story]. Schneider Electric.
- Swissroc. (2017, 12 juillet). *The Edge, le bâtiment le plus intelligent du monde ?*
- Kumar, A. (2025, 20 juin). *The Edge Amsterdam: How AI and UX design created the world's smartest green building.* Sys-Core.
- EDGE Technologies. (s.d.). *The Edge.*

Cas 2 Toronto Office Autodesk

- Autodesk. (2018, 23 mars). *How Autodesk used generative design to create their Toronto office* [Vidéo]. Youtube.
- Royan, F. (2021). *Digital sustainability: The path to net zero for design & manufacturing and AEC industries.* Frost & Sullivan, in partnership with Autodesk.
- Autodesk. (2025). *2025 State of Design & Make report.* Autodesk.
- Benjamin, D., & Testai, R. (2020). *Hands-on with Project Rediscover: Generatively designing Autodesk Toronto's office* [Session de conférence]. Autodesk University.
- BrainStation. (2017, 4 octobre). *Autodesk's new Toronto office displays algorithm-driven generative design.*
- Nagy, D., Lau, D., Locke, J., Stoddart, J., Villaggi, L., Wang, R., Zhao, D., & Benjamin, D. (2017, 22 mai). *Project Discover: An application of generative design for architectural space planning.* In *Proceedings of SimAUD 2017 Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design.*

Autodesk Research / The Living.

- Pierce, K. (2020, 23 octobre). *Case study: Autodesk's generative design artificial intelligence*. Consulting-Specifying Engineer (CSEMag).

Cas 3 TU Delft

- Çetin, S., Gruis, V. H., & Straub, A. (2022, aout). Digitalization for a circular economy in the building industry: Multiple-case study of Dutch social housing organizations. *Resources, Conservation and Recycling Advances*, 15, 200110.
- Mullen, M. (2023, December 12). *Deploying digitalisation towards shaping a circular construction sector*. Circular Innovation Lab.
- Cotella, V. A. (2023, aout). From 3D point clouds to HBIM: Application of artificial intelligence in cultural heritage. *Automation in Construction*, 152, 104936.
- Croce, V., Caroti, G., Piemonte, A., De Luca, L., & Véron, P. (2023). H-BIM and artificial intelligence: Classification of architectural heritage for semi-automatic scan-to-bim reconstruction. *Sensors*, 23(5), 2497.
- Croce, V., Bevilacqua, M. G., Caroti, G., & Piemonte, A. (2021, 28 juin). Connecting geometry and semantics via artificial intelligence: From 3D classification of heritage data to H-BIM representations. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B2-2021, 145–152.
- De Wolf, C., Çetin, S., & Bocken, N. (Eds.). (2024). *A circular built environment in the digital age*. Springer.
- Gordon, M., Batallé, A., De Wolf, C., Sollazzo, A., Dubor, A., & Wang, T. (2023). Automating building element detection for deconstruction planning and material reuse: A case study. *Automation in Construction*, 146(1), 104697.
- Nordic Council of Ministers. (2023). Barriers to and opportunities within circular construction. In *Nordic network for circular construction*. Nordisk Ministerråd.
- Setaki, F., & van Timmeren, A. (2022). Disruptive technologies for a circular building industry. *Building and Environment*, 223, 109394.
- Zhou, Y. (2025, mai). AI-driven digital circular economy with material and energy sustainability for industry 4.0. *Energy and AI*, 20, 100508.