



***OptiBioNum* : Le BIM au service de la prise en compte de la biodiversité dans les projets de construction de bâtiments et d'infrastructures.**

Sylvestre Jonathan TOURE

MASTERE SPECIALISE GP-BIM

Le BIM pour la gestion intégrée des constructions

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Mastère Spécialisé GP-BIM

12/01/2026

- Tuteur Entreprise : M. Sylvain MOULHERAT
- Référent Académique : Mme Gaëlle BAUDOUIN

REMERCIEMENTS

La réalisation de cette thèse professionnelle n'aurait été possible sans la contribution de plusieurs personnes, à qui je voudrais en ces mots témoigner ma gratitude.

Je tiens tout d'abord à adresser mes sincères remerciements à **Sylvain MOULHERAT**, Directeur R&D et mon tuteur au sein de TerrOïko, pour sa disponibilité et son suivi minutieux tout au long de mon stage et pendant la rédaction de cette thèse professionnelle. Ses idées, ses explications et son implication constante, ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail, et je lui en suis infiniment reconnaissant. Je remercie également la direction de TerrOïko, avec à sa tête Catherine De Roince, pour m'avoir offert l'opportunité d'intégrer cette équipe jeune et dynamique, au sein de laquelle j'ai beaucoup appris, tant humainement que professionnellement. Ce fut une expérience enrichissante !

Ensuite, je souhaiterais remercier **Madame Gaëlle BAUDOUIN** pour son encadrement lors de l'élaboration de ce travail, et pour avoir fait preuve de disponibilité à m'accompagner à toutes les étapes. Il en est de même pour **Madame Aurélie TALON** ainsi qu'au corps pédagogique, et à l'ensemble des intervenants du Ms GP – BIM, dont je tiens à saluer le professionnalisme et la qualité des différentes interventions, qui ont nourri ma culture du numérique et de ses implications multiformes dans le domaine de la construction.

Enfin, je ne saurais terminer sans exprimer ma reconnaissance à mes collègues et amis de la **7^{ème} promotion (2024 – 2025)** du Mastère Spécialisé GP – BIM de Polytech Clermont – Ferrand. Votre sympathie et votre amabilité ont rendu cette expérience particulièrement intéressante, et j'en garderai certainement de très beaux souvenirs.

A toutes et à tous, du fond du cœur...Merci !

RESUME

L'urbanisation et le développement des infrastructures constituent aujourd'hui l'un des principaux facteurs de dégradation des écosystèmes et de perte de biodiversité. Face à ces enjeux, les projets de construction sont soumis à des exigences réglementaires croissantes en matière d'évaluation environnementale, notamment à travers la séquence Éviter – Réduire – Compenser (ERC). Toutefois, les méthodes mobilisées restent majoritairement qualitatives et interviennent souvent tardivement dans le processus de conception, limitant la capacité des acteurs à comparer objectivement des variantes de projet du point de vue de la biodiversité.

Dans le même temps, le Building Information Modeling (BIM) s'est imposé comme un standard dans le secteur de la construction pour la gestion et la coordination de l'information tout au long du cycle de vie des ouvrages. Si le BIM est aujourd'hui largement mobilisé pour l'analyse des coûts, des délais ou de l'empreinte carbone, son potentiel pour la prise en compte de la biodiversité demeure peu exploité. Ce mémoire s'inscrit dans ce contexte et s'intéresse au rôle que le BIM peut jouer dans l'intégration opérationnelle des enjeux de biodiversité dans les projets de bâtiments et d'infrastructures.

L'objectif de ce travail est de définir et d'expérimenter un processus BIM – SIG permettant d'intégrer des indicateurs de performance écologique relatifs à la biodiversité au sein des maquettes numériques, afin de soutenir la comparaison de scénarios de conception dès les phases amont des projets. La démarche repose sur un état de l'art croisant BIM, infrastructures, convergence SIG – BIM et ingénierie écologique, ainsi que sur l'analyse des travaux de recherche et développement menés par TerrOïko.

Sur cette base, un processus méthodologique est proposé, structurant les interactions entre données écologiques, données territoriales et données de conception. Ce processus intègre la préparation des données issues des études écologiques, la construction de maquettes numériques hybrides BIM – SIG, la simulation écologique et le calcul d'indicateurs de biodiversité, ainsi que leur restitution sous une forme exploitable pour l'aide à la décision. La formalisation du workflow vise à assurer la cohérence des échanges de données et la reproductibilité de la démarche.

Le processus est appliqué à un cas d'étude réel : le Centre d'Exploitation de Champigny – sur – Marne, dans le cadre du projet du Grand Paris Express (GPE). Plusieurs variantes de

conception sont simulées et comparées à l'aide d'indicateurs de biodiversité, mettant en évidence des différences de performance selon les types de milieux intégrés et leur organisation spatiale. Cette application permet d'évaluer la pertinence du processus proposé et d'illustrer son apport pour l'arbitrage environnemental à l'échelle du site et du bâtiment.

Ce mémoire met ainsi en lumière les apports et les limites de l'intégration du BIM dans l'évaluation de la performance écologique des projets, en soulignant le rôle central des processus, de la structuration de la donnée et de l'articulation entre expertise écologique et outils numériques.

Mots-clés : Biodiversité, BIM, SIG, Evaluation environnementale, Indicateurs écologiques, OptiBioNum, SimOïko, BPMN, Séquence ERC

ABSTRACT

Urbanization and the development of buildings and infrastructures are among the main drivers of biodiversity loss, particularly through land take, habitat fragmentation and the alteration of ecological functions. In response, construction projects are increasingly subject to environmental assessment requirements, notably through the Avoid–Reduce–Compensate (ERC) sequence. However, the operational integration of biodiversity considerations into design processes remains limited, as ecological assessments are often qualitative, fragmented, and conducted too late to effectively influence design decisions.

At the same time, Building Information Modeling (BIM) has become a standard approach in the construction sector for managing and coordinating information throughout the project lifecycle. While BIM is widely used to address cost, scheduling, and energy or carbon performance, its potential contribution to biodiversity assessment and ecological decision-making is still largely underexplored. This thesis addresses this gap by investigating how BIM, in combination with Geographic Information Systems (GIS) and ecological modelling tools, can support a more operational integration of biodiversity into construction and infrastructure projects.

The objective of this work is to define and test a BIM–GIS-based process enabling the integration of ecological performance indicators related to biodiversity within digital models, in order to support the comparison of design scenarios at early project stages. The methodological approach is based on a comprehensive review of the literature at the intersection of BIM, infrastructure projects, GIS–BIM convergence and ecological engineering, as well as on the analysis of research and development work conducted by TerrOïko.

Building on this foundation, a structured process is proposed to manage interactions between ecological data, territorial data and design data. The process covers data preparation from ecological studies, the construction of hybrid BIM–GIS models, ecological simulations and the calculation of biodiversity indicators, as well as their representation in a form suitable for decision support. The workflow is formalized using a BPMN-based approach, ensuring data consistency, traceability and reproducibility.

The proposed process is applied to a real and complex case study: the Champigny-sur-Marne operations and maintenance facility, developed as part of the Grand Paris Express project.

Several design scenarios are simulated and compared using biodiversity indicators, highlighting significant differences in ecological performance depending on the types of habitats integrated and their spatial organization. This application makes it possible to assess the relevance of the proposed process and to illustrate its contribution to environmental arbitration at both site and building scales.

Overall, this work highlights both the potential and the limitations of using BIM as a support for biodiversity assessment in construction projects. It emphasizes the central role of data structuring, process design and the articulation between ecological expertise and digital tools in improving the consideration of biodiversity within environmental assessment practices.

Keywords: Biodiversity, BIM, GIS, Environmental Assessment, Ecological Indicators, OptiBioNum, SimOïko, BPMN, ERC Sequence.

LISTE DES ACRONYMES ET ABREVIATIONS

Acronyme / Abréviation	SIGNIFICATION
ACP	Analyse en Composantes Principales
ACV (ou LCA)	Analyse du Cycle de Vie
ADEME	Agence de la Transition Écologique
AFNOR	Association française de normalisation
APS	Avant – Projet Sommaire
BCF	BIM Collaboration Format
BD Alti	Base de données altimétrique (IGN)
BIM	Building Information Modeling
BISON	Biodiversity and Infrastructure Synergies and Opportunities for European Transport Networks.
BIM Infra	Application du BIM aux infrastructures
BPMN	Business Process Model and Notation
BTP	Bâtiment et Travaux Publics
CAO / DAO	Conception Assistée par Ordinateur / Dessin Assisté par Ordinateur
CDE	Common Data Environment (Environnement Commun de Données)
CIM	City Information Modeling
CO₂	Dioxyde de carbone
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DIUO	Dossier d'Interventions Ultérieures sur l'Ouvrage
DOE	Dossier des Ouvrages Exécutés
DT	Digital Twin (Jumeau Numérique)
EES	Ecological Engineering Studio
EES (procédural)	Évaluation Environnementale Stratégique
EI	Étude d'Impact
ELCD	European Life Cycle Database
ERC	Éviter – Réduire – Compenser
EU / UE	Union Européenne

EUNIS	European Nature Information System
FEREC	Fondation d'entreprise Recherche collective pour la construction et les infrastructures
GDAL	Geospatial Data Abstraction Library
GMAO	Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur
GPE	Grand Paris Express
GUID	Globally Unique Identifier
IFC	Industry Foundation Classes
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
INIES	INformations sur les Impacts Environnementaux et Sanitaires
INPN	Inventaire National du Patrimoine Naturel
IPBES	Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques
ISO	International Organization for Standardization
ITF	International Transport Forum
LGV	Ligne à Grande Vitesse
LiDAR	Light Detection and Ranging
LOD	Level of Development
LOI	Level of Information
MEP	Mécanique, Électricité et Plomberie
MNT	Modèle Numérique de Terrain
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NF	Norme Française
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency
OCAPI	Observation de la biodiversité par des CApteurs Plus Intelligents
OGC	Open Geospatial Consortium
OSM	OpenStreetMap
OptiBioNum	Projet R&D : « <i>Optimisation de la capacité d'accueil de biodiversité des bâtiments et ouvrages par l'usage d'indicateurs écologiques standardisés embarqués dans les maquettes numériques</i> » porté par TerrOïko

PCC	Poste de Commandement Centralisé
PIB	Produit Intérieur Brut
POS	Plan d'Occupation du Sol
PTNB	Plan de Transition Numérique du Bâtiment
QML	Qt Meta-object Language
R&D	Recherche et Développement
SCALES	«Securing the conservation of biodiversity across administrative levels and spatial, temporal, and ecological scales»
SETE	Station d'Ecologie Théorique et Expérimentale
SGP	Société des Grands Projets
SIG (ou GIS)	Système d'Information Géographique
SimOïko	Plateforme de simulation écologique développée par TerrOïko
SMR	Site de maintenance et de remisage
SNCF	Société Nationale des Chemins de fer Français
SRC	Systèmes de Référence de Coordonnées
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
STEP	Standard for the Exchange of Product model data
TAXREF	Référentiel Taxonomique National Français, pour la faune, la flore et la fonge de France métropolitaine et d'outre-mer
UIM	Modèle d'Informations Urbaines
UML	Unified Modelling Language
VRT	Virtual Raster Tile
XML	Extensible Markup Language
ZEE	Zone d'Emprise Ecologique
ZNIEFF	Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique

TABLE DE MATIERES

REMERCIEMENTS	2
RESUME.....	3
ABSTRACT	5
LISTE DES ACRONYMES ET ABREVIATIONS	7
TABLE DE MATIERES.....	10
CHAPITRE I : INTRODUCTION	14
1 L'URBANISATION, UNE MENACE POUR LA BIODIVERSITE	14
1.1 CONSEQUENCES DE LA CROISSANCE DES VILLES SUR LA BIODIVERSITE	14
1.2 INTEGRER URBANISATION ET BIODIVERSITE	15
2 LE MONDE DE LA CONSTRUCTION FACE AU DEFI DU CHANGEMENT ...	15
2.1 LE NUMERIQUE DANS LA CONSTRUCTION	16
2.2 LE BIM, UNE OPPORTUNITE POUR LES ACTEURS DE LA CONSTRUCTION	16
2.3 BIM INFRA.....	18
3 BIODIVERSITE ET BIM : UN ENJEU POUR L'ENVIRONNEMENT	18
3.1 L'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE DANS LA CONSTRUCTION	18
3.1.1 Contexte et évolution réglementaire	18
3.1.2 Objectifs et déclinaisons de l'évaluation environnementale.....	19
3.2 LES ACTEURS DE LA CONSTRUCTION FACE AU DEFI ENVIRONNEMENTAL.....	20
3.2.1 Au niveau des pouvoirs publics	20
3.2.2 Au niveau des professionnels de la construction	21
3.3 LE BIM ET LA GESTION ENVIRONNEMENTALE DES PROJETS	23
3.3.1 Le BIM pour l'ACV des bâtiments et infrastructures.....	23
3.3.2 Focus sur le projet « <i>OptiBioNum</i> »	25
3.4 DES INTERROGATIONS PERSISTENT !	27
3.5 STRUCTURE DE LA THESE	29
CHAPITRE II : ETAT DE L'ART	30
4 GENERALITES SUR LA THEMATIQUE	30
4.1 DEVELOPPEMENT BIM VERS BIM INFRA VERS CIM / DT	30

4.1.1	<i>Extension du BIM vers le BIM – Infra</i>	30
4.1.2	<i>Le BIM pour les territoires</i>	31
4.2	CONVERGENCE SIG – BIM	32
4.2.1	<i>SIG et BIM : nécessité d'une intégration réussie</i>	32
4.2.2	<i>Premiers pas vers l'interopérabilité</i>	34
4.2.2.1	Développement d'un format adapté aux modèles SIG	34
4.2.2.2	Evolution des connaissances scientifiques	35
5	ET LA BIODIVERSITE DANS TOUT ÇA ?	37
5.1	APPROCHE METIER D'UNE ETUDE ECOLOGIQUE	37
5.1.1	<i>Fondements réglementaires</i>	37
5.1.2	<i>La séquence ERC, pilier de l'approche métier</i>	38
5.1.2.1	Contexte	38
5.1.2.2	Mise en application	38
5.2	TRAVAUX DE TERROÏKO SUR LE NUMERIQUE ET LA BIODIVERSITE	41
5.2.1	<i>La plateforme SimOïko</i>	41
5.2.2	<i>Développement des Indicateurs de biodiversité</i>	43
5.2.3	<i>Travaux de Recherche – Action sur l'intégration numérique des données de biodiversité dans le domaine des infrastructures</i>	44
6	SYNTHESE DE L'ETAT DE L'ART	45
CHAPITRE III : ELABORATION DU PROCESSUS BIM – SIG DANS LE PROJET		47
7	PHASE PRELIMINAIRE AU PROCESSUS	47
7.1	ETUDE ECOLOGIQUE	47
7.1.1	<i>Cycles de vie des écotypes</i>	47
7.1.1.1	Identification des espèces	47
7.1.1.2	Collecte des données	48
7.1.1.3	Construction des cycles de vie	48
7.1.2	<i>Compilation de la carte d'occupation du sol et paramétrage des interactions des espèces avec la matrice paysagère</i>	49
7.2	SELECTION DES GARES ET CENTRES TECHNIQUES	49
7.2.1	<i>Constitution d'un gradient d'urbanisation sur la zone</i>	49
7.2.2	<i>Choix des sites pilo</i>	50

8	INTEGRATION BIM – SIG DANS LE PROCESS D’OPTIMISATION A L’ECHELLE DU SITE/BATIMENT.....	51
8.1	CONSTRUCTION DU CAS D’USAGE BIM.....	51
8.1.1	<i>Objectif de l’étude</i>	52
8.1.2	<i>La dualité BIM – SIG dans le projet</i>	52
8.1.3	<i>Usage BIM - SIG</i>	53
8.1.3.1	Etape 01 : Préparation des données écologiques.....	54
8.1.3.2	Etape 02 : Manipulations SIG – BIM.....	55
8.1.3.3	Etape 03 : Calcul des indicateurs	56
8.1.3.4	Etape 04 : Choix et optimisations	56
8.1.4	<i>Modalités de collaboration et gestion de la donnée</i>	56
8.2	SPECIFICATION DES DONNEES D’ENTREE	57
8.2.1	<i>Maquette SIG du site</i>	57
8.2.1.1	Constitution d’un MNT 3D	57
8.2.1.2	Création d’un modèle IFC des parcelles de l’OccSol et Fusion avec le MNT 3D	63
8.2.2	<i>Maquette BIM de référence</i>	65
8.2.2.1	Format de fichier	65
8.2.2.2	Contenu et niveau de détail	65
8.2.2.3	Maquette fédérée	66
8.3	PROCESSUS DE SIMULATION	66
8.3.1	<i>Processus de scénarisation</i>	67
8.3.1.1	Maquette BIM – SIG de base	67
8.3.1.2	Proposition de scénarios de conception	68
8.3.1.3	Simulation des écologiques dans SimOïko.....	70
8.3.2	<i>Calcul des indicateurs</i>	70
8.3.3	<i>Résultats</i>	72
8.3.4	<i>Formalisation du BPMN général</i>	74
9	APPLICATION DE LA DEMARCHE SUR LE CENTRE D’EXPLOITATION DE CHAMPIGNY	76
9.1	PREAMBULE	76
9.1.1	<i>Mode de collaboration</i>	77

9.1.1.1	Les acteurs.....	77
9.1.1.2	Plateforme collaborative	78
9.1.2	<i>Présentation du Centre d'exploitation de Champigny</i>	79
9.1.2.1	Description	79
9.1.2.2	Enjeux écologiques liés au projet.....	79
9.2	REALISATION DE LA MAQUETTE BIM – SIG DE BASE	80
9.2.1	<i>Préparation des données</i>	80
9.2.1.1	MNT 3D du site.....	80
9.2.1.2	Paramétrage des données d'occupation du Sol	81
9.2.2	<i>Maquette fédérée BIM – SIG de base</i>	82
9.2.2.1	Maquette SIG 3D du site	82
9.2.2.2	Fusion avec la Maquette BIM de référence	82
9.3	PROCESSUS BIM – SIG LIE AU CAS D'USAGE	83
9.3.1	<i>Discussions préalables</i>	83
9.3.1.1	Définition des différentes variantes.....	83
9.3.1.2	Choix du logiciel de modélisation.....	84
9.3.2	<i>Scénarisation des variantes</i>	84
9.3.2.1	Modélisation.....	84
9.3.2.2	Résultat du calcul des indicateurs	86
9.3.2.3	Arbitrage des résultats	89
CHAPITRE IV : CONCLUSION		92
SYNTHESE DE L'ETUDE		92
LIMITES ET DIFFICULTES RENCONTREES		94
PERSPECTIVES.....		95
TABLE DES ILLUSTRATIONS		96
LISTE DES TABLEAUX		97
BIBLIOGRAPHIE / WEBOGRAPHIE		98

CHAPITRE I : INTRODUCTION

1 L'URBANISATION, UNE MENACE POUR LA BIODIVERSITE

1.1 CONSEQUENCES DE LA CROISSANCE DES VILLES SUR LA BIODIVERSITE

La pression environnementale induite par l'urbanisation galopante des villes et territoires, est une des causes majeures de la perte progressive de la biodiversité (Sanderson et al., 2018). Dès 1972, le rapport Meadows commandité par le Club de Rome, a mis en évidence les limites de la croissance et des conséquences écologiques de l'expansion humaine, alertant sur la nécessité d'une gestion plus durable (Meadows et al., 1972).

En effet, les grands projets de construction d'infrastructures de transport, d'approvisionnement en eau et en énergie, ainsi que l'aménagement territorial à petite et moyenne échelle, dans une dynamique de densification des centres villes et leur déploiement vers les zones périurbaines et rurales, s'accompagnent de coûts environnementaux importants, accentuant les pressions sur la biodiversité (Barrientos et al., 2021; Rytwinski & Fahrig, 2012). Bien que ces opérations puissent s'avérer nécessaires à la satisfaction des besoins essentiels de l'humanité, il n'en demeure pas moins que l'étalement urbain est à la base de la fragmentation des habitats et la perte de la biodiversité. Cet état de fait est également mis en lumière par le rapport de la Plateforme Intergouvernementale Scientifique et Politique sur la Biodiversité et les Services Écosystémiques (IPBES), qui attribue le déclin de la biodiversité à la destruction et la dégradation des milieux naturels (Sol et mer), notamment dues à l'intensification de l'activité agricole, mais aussi et surtout à l'expansion des villes (IPBES, 2019; Maxwell et al., 2016; Newbold et al., 2015; Seto et al., 2012).

Les nombreuses pressions anthropiques dues à l'étalement urbain, dont la pollution lumineuse, acoustique et chimique, dégradant la qualité de l'air, des eaux, des sols, la prédation des animaux domestiques, etc. Crooks et al., 2017; Fahrig, 2003), entraînent une altération du paysage par la fragmentation et la réduction des patches d'habitat et du degré de connectivité des espèces entre – elles (Crooks et al., 2017; Fahrig, 2003) (Halfwerk & Jerem, 2021; Sordello et al., 2022).

1.2 INTEGRER URBANISATION ET BIODIVERSITE

La dynamique d'intégration de la biodiversité dans le développement urbain a été théorisée par McHarg (McHarg, 1969). Architecte, Urbaniste et paysagiste, il a jeté les premières bases de la planification écologique comme support d'aide à la décision pour l'aménagement territorial. Pointant du doigt la tendance « humano – centrée » de la planification urbaine, il alerte sur l'urgence de la préservation de la biodiversité, et invite au « Design with Nature », dont l'intérêt serait un développement urbain harmonieux alliant bien – être humain et impact écologique amoindri (McHarg, 1969).

Pour accompagner la réduction de la fragmentation et la dégradation des écosystèmes à l'échelle territoriale par l'intégration de la nature dans les espaces publics (Mainguy & Zari, 2014), il serait nécessaire de mettre en œuvre des process multidisciplinaires et des technologies digitales adaptées aux échelles de conception locales et à l'aménagement territorial (Catalano et al., 2021a).

2 LE MONDE DE LA CONSTRUCTION FACE AU DEFI DU CHANGEMENT

Les transformations socio – économiques et techniques post révolution industrielle du XVIIIème siècle, ont entraîné un bouleversement des pratiques, notamment dans les métiers de la construction et du développement urbain (*L'industrialisation et ses conséquences*, s. d.). En effet, face aux besoins grandissants de la société moderne en termes d'infrastructures socio-économiques indispensables à son bon fonctionnement, les professionnels du cadre bâti se doivent d'adapter leurs méthodes et moyens de production, en vue de répondre valablement aux exigences croissantes en matière d'efficacité et de durabilité grâce à l'innovation, notamment technologique. En 2024, le secteur de la construction en Europe représentait environ 9% du PIB (Produit Intérieur Brut) de l'Union Européenne (UE), et les prévisions de Eurostat semblent optimistes avec un marché de la rénovation des bâtiments en Europe qui à lui seul, devrait augmenter de 55,6 Milliards de dollars entre 2021 et 2026 (NGUYEN, 2024) et à l'échelle mondiale, des investissements de plus de 100 000 Milliards d'Euros ont été annoncés durant l'Infraweek 2024, montrant ainsi l'importance accordée par les décideurs, les investisseurs et les professionnels, au développement de ce secteur.

Répondant à la logique d'intégration de l'écologie dans le développement urbain comme indiqué dans la section précédente, les pouvoirs publiques ainsi que les professionnels du

secteur se tournent vers certains principes vertueux, dont la circularité, la décarbonation, mais aussi le numérique et la biodiversité.

2.1 LE NUMERIQUE DANS LA CONSTRUCTION

L'introduction du numérique a par ailleurs marqué une avancée significative dans les métiers de la construction par la transformation des méthodes de conception, de réalisation et de gestion de projet (*Handbook – EU BIM Task Group*, 2017). Dans cette dynamique, l'État français a mis sur pied le Plan de Transition Numérique du Bâtiment (PTNB), doté d'une enveloppe financière de 20 Millions d'euros répartis dans l'intervalle de 2015 à 2018, dédiés à accompagner la mutation numérique du secteur du bâtiment en France à travers les axes suivants :

- Convaincre et donner envie ;
- Accompagner la montée en compétences et développer des outils adaptés ;
- Apporter de la confiance dans le numérique.

Au regard des résultats probants obtenus (*Bilan 2018 PTNB*, 2018), et dans la continuité de ce PTNB, le gouvernement français a lancé le Plan BIM 2022 dont l'objectif est de généraliser la pratique du Building Information Modeling (BIM). Ce plan vise à généraliser la commande en BIM dans l'ensemble de la construction, et déployer le BIM dans les territoires, en créant un écosystème innovant d'outils numériques, accessibles à tous les acteurs de la filière de la construction (Ministère de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités locales, 2018)

2.2 LE BIM, UNE OPPORTUNITE POUR LES ACTEURS DE LA CONSTRUCTION

La pratique du BIM se distingue par une approche intégrée, qui permet de fluidifier le processus de collaboration entre les différents acteurs d'un projet de construction. Elle vise à optimiser la gestion de la donnée pendant le cycle de vie de l'infrastructure, mais aussi et surtout facilite la prise de décision depuis les phases les plus amont d'un projet de construction, en guidant les choix conceptuels au travers de la maquette numérique (Fountain & Langar, 2018). Patrick MacLeamy, Architecte et co – fondateur de l'organisation buildingSMART International, a développé et conceptualisé les avantages et la mise en œuvre du processus BIM tout le long du cycle de vie d'un projet.

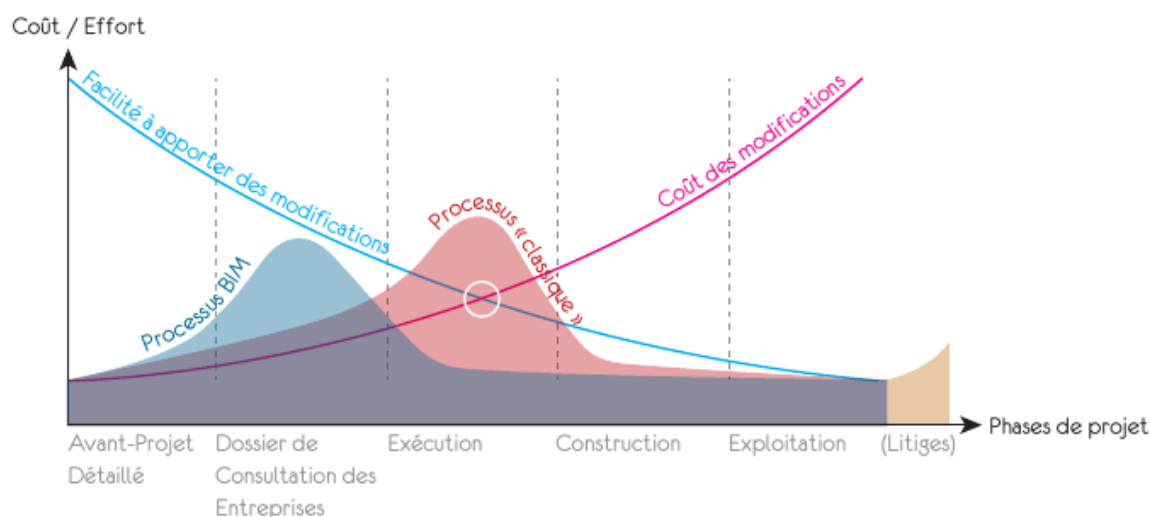


Figure 1: *Courbes de MacLeamy* (Mor, 2015)

Dans son analyse synthétisée sur la figure ci-dessus, MacLeamy met en perspective les efforts et les coûts associés à chacune des phases d'un projet de construction mené d'une part selon un processus dit "classique", et d'autre part, dans le cadre d'une démarche BIM. Il en ressort qu'en déployant plus d'efforts lors des phases initiales de conception de projets, il est tout à fait possible pour les concepteurs et les Maîtres d'ouvrages de faire les meilleurs choix techniques et conceptuels possibles, et par là, améliorer la gestion de l'information lors des phases avancées du projet et anticiper d'éventuels litiges. Ceci passe par l'évaluation de plusieurs scénarios de conception, rendue possible grâce aux processus BIM et aux outils de simulation numérique (Mor, 2015).

Bien qu'il n'existe à ce jour aucune obligation BIM harmonisée à l'échelle européenne, on observe une convergence des politiques urbaines vers l'intégration du BIM dans les grands projets publics. La Directive européenne 2014/24/UE sur les marchés publics autorise les Etats membres à exiger l'utilisation d'outils numériques spécifiques tels que le BIM, dans les marchés financés par fonds publics (Directive 2014/24/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 février 2014 sur la passation des marchés publics et abrogeant la directive 2004/18/CE Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE, 2014). Cet acte a servi de base légale pour la mise en place de réglementations nationales imposant le BIM dans certains pays européens comme le Danemark, l'Italie, les Pays – bas, le Royaume – Uni, ainsi que de créer un cadre fortement incitatif dans d'autres pays comme à l'instar de Allemagne (FOLLEZ et al., 2025).

2.3 BIM INFRA

Initialement dédié aux métiers du bâtiment, la complexification des systèmes de transport et de mobilité urbaine a amené les acteurs et professionnels du domaine des infrastructures, à s'approprier les processus BIM, donnant ainsi naissance au concept de “*BIM Infra*” (Aaron et al., 2018). Il s'agit en effet d'un cadre méthodologique qui englobe l'ensemble des phases d'un projet, allant de la conception, à la construction et la gestion des infrastructures complexes telles que les routes, les ponts, les tunnels, les réseaux de transport et les installations de service publics. Le BIM Infra se base sur la création de maquettes numériques intégrant des données géométriques, techniques et fonctionnelles sur la base d'une collaboration interdisciplinaire, à l'instar du BIM dans le domaine du bâtiment (Pirdavani et al., 2023).

L'intégration du BIM dans les infrastructures vise à l'utilisation efficace des ressources, l'amélioration la planification stratégique des travaux via des outils numériques « data – driven » et la maintenance des infrastructures à moyen et long terme. Cette approche permet de visualiser en 3D, la coordination interdisciplinaire, ainsi que la Gestion – Exploitation – Maintenance des ouvrages pendant leur utilisation (ITF, 2021). Le développement urbain implique par ailleurs une approche plus holistique, qui réside dans l'intégration du BIM Infra, avec d'autres technologies géospatiales et numériques, notamment les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) et le City Information Modeling (CIM) (adatt, 2021), amenant les acteurs à tenir compte du contexte territorial et environnemental dans la conception et la réalisation de ces infrastructures.

3 BIODIVERSITE ET BIM : UN ENJEU POUR L'ENVIRONNEMENT

3.1 L'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE DANS LA CONSTRUCTION

3.1.1 Contexte et évolution réglementaire

L'urbanisation est un des facteurs principaux du réchauffement climatique subi par la planète ces dernières décennies. En France comme partout en Europe, le secteur du bâtiment (Architecture – Ingénierie – Construction) participe à environ 32% des émissions de CO₂, et 25% de déchets générés par an (van Eldik et al., 2020).

Ces constats scientifiques, combinés aux catastrophes environnementales médiatisées et documentées, ont poussé les décideurs à reconnaître l'urgence d'intégrer des outils de prévention dans la planification des projets de construction, marquant ainsi un tournant dans la gestion des impacts environnementaux. Cette prise de conscience a conduit à l'établissement de **l'évaluation environnementale** comme un mécanisme essentiel pour anticiper et atténuer les dommages écologiques des projets d'infrastructures. En Europe, la *Directive 85/337/CEE* adoptée en 1985, consécutivement à la Loi du 10 Juillet 1976, a institutionnalisé cette pratique en la rendant obligatoire pour certains projets publics et privés, avec pour objectif d'intégrer les considérations écologiques dès les premières étapes de leur conception (Renaudiere, 1991). Cet outil a été enrichi par des révisions et études successives, permettant de mieux concilier le développement infrastructurel et la préservation de la biodiversité, en s'appuyant sur une approche systématique et préventive. La réforme apportée le 3 août 2016 à la réglementation existante, intime désormais aux porteurs de projets, en plus de la justification des moyens, d'effectuer un suivi dans le temps des mesures environnementales d'Évitement – Réduction – Compensation (ERC), une obligation de résultats (Vincent, 2024).

3.1.2 Objectifs et déclinaisons de l'évaluation environnementale

La visée de l'évaluation environnementale est d'analyser les effets des projets (aménagement urbain, programme d'aménagement, action stratégique) sur l'environnement, **mesurer** leur acceptabilité environnementale et **éclairer** les décideurs (Djema, 2021). Plus spécifiquement, il s'agit de :

- Intégrer l'aspect environnemental tout au long du projet ;
- Informer le public et le faire participer ;
- Rendre compte des effets potentiels du projet sur l'environnement ;
- Justifier des choix retenus ;
- Assurer les engagements du Maître d'Ouvrage ;
- Éclairer l'autorité publique tout au long du processus de décision.

Il existe deux (02) niveaux d'évaluation environnementale à savoir :

- **L'Évaluation Environnementale Stratégique (EES)** : Il s'agit d'un processus qui évalue les incidences environnementales potentielles des plans, programmes et politiques avant leur adoption. Elle est encadrée en Europe par la Directive 2001/42/CE;
- **L'Étude d'Impact (EI)** : C'est une analyse spécifique des effets environnementaux d'un projet précis. Régie en Europe par la *Directive 2011/92/UE* et modifiées par la

Directive 2014/52/UE, elle examine les impacts dudit projet sur l'air, l'eau, les sols, la biodiversité et la santé humaine, en y proposant des mesures d'atténuation.

3.2 LES ACTEURS DE LA CONSTRUCTION FACE AU DEFI ENVIRONNEMENTAL

Au regard des impacts des projets de construction sur la préservation de l'environnement et la gestion de la biodiversité, des dispositions sont prises à multiples échelles.

3.2.1 Au niveau des pouvoirs publics

En addition à l'arsenal réglementaire européen, et des décrets d'application au plan local qui en découlent, l'État français adopte en 2016 la « LOI BIODIVERSITE » (LOI n° 2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages, 2016). Elle stipule une obligation stricte de résultats, et renforce les pratiques en imposant des mesures comme la compensation écologique et la protection des espèces, incitant les professionnels à concevoir des projets qui puisse favoriser la biodiversité, tels que l'adoption de toitures végétalisées ou encore de corridors écologiques entre autres.

A travers cette loi, les pouvoirs publics entreprennent également de faire la promotion de la gestion numérique des données environnementales en mettant en place des référentiels techniques et des gabarits types, afin de permettre à tous les porteurs de projet d'y reverser leurs données brutes au moyen de plateformes numériques libres d'usage (Djema, 2021).

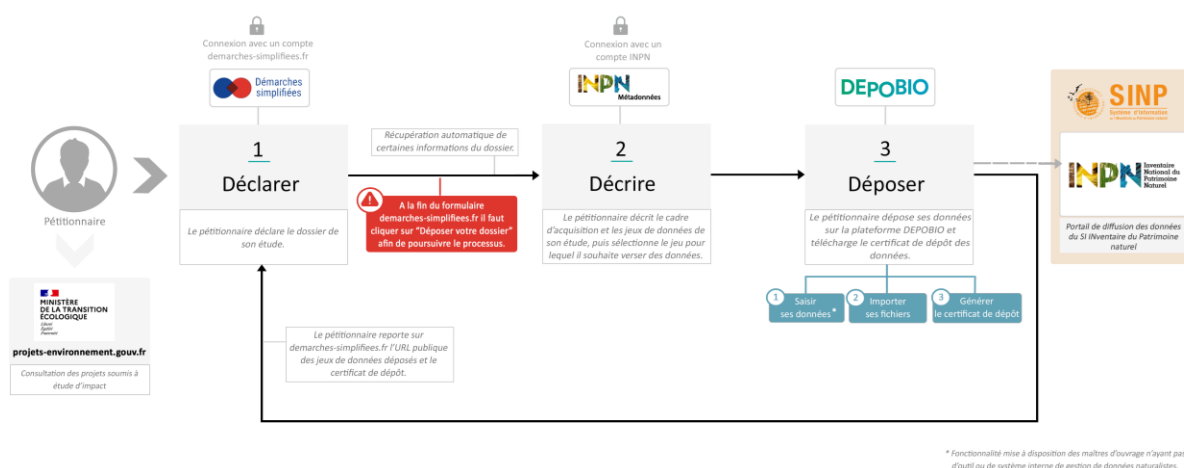


Figure 2 : Processus de dépôt légal de données brutes de biodiversité
(Normandie, 2021)

Le dépôt légal des données brutes de biodiversité, instauré par la loi du 8 août 2016, impose aux maîtres d'ouvrage réalisant des études d'impact, des projets d'aménagement ou de planification de transmettre les observations naturalistes collectées (espèces, habitats, milieux). Ce dépôt s'effectue via la plateforme nationale DepoBio, qui alimente directement l'Inventaire National du Patrimoine Naturel (INPN). Le processus consiste à déclarer le projet, renseigner les métadonnées décrivant le cadre d'acquisition, saisir ou importer les données brutes, puis verser l'ensemble afin d'obtenir un certificat de dépôt. Celui-ci doit être réalisé avant la mise à disposition au public. Cette démarche vise à améliorer la connaissance collective de la biodiversité en rendant accessibles, gratuites et réutilisables des données jusqu'alors dispersées ou peu exploitables.

3.2.2 *Au niveau des professionnels de la construction*

Au regard des impacts avérés des constructions sur l'environnement, les professionnels du secteur, chacun dans son domaine d'expertise, mettent en place des méthodes et moyens tendant à s'aligner au cadre réglementaire mis en place par les pouvoirs publics.

Les entreprises de constructions, responsables de la mise en œuvre des projets, entreprennent des actions en vue de limiter l'impact de leurs opérations sur l'environnement en adoptant une gestion durable, notamment par l'utilisation de machine à faible consommation énergétique pour réduire les émissions de CO2 dans l'air. En France, les constructeurs parviennent déjà à trier, mais aussi et surtout recycler environ 70% des déchets issus du BTP, bien que l'objectif européen de 90% à l'horizon 2030 reste encore à atteindre (Huc et al., 2022). Ces résultats encourageants observés, quant à la réduction de l'impact des constructions sur les émissions de gaz à effet de serre en France, sont dus entre autres à :

- L'adoption en interne de chartes environnementales strictes, incluant des audits pour limiter la pollution sonore et hydrique (HUILLARD & Comité d'experts Européens de VINCI, 2023) ;
- L'utilisation de matériaux écoresponsables comme le Béton bas – carbone ou les matériaux recyclés (*Construction bas carbone*, 2022);
- La réutilisation des matériaux issus de la déconstruction, s'inscrivant par la même occasion dans une logique d'économie circulaire.

En sus, afin de protéger la biodiversité, des mesures spécifiques sont mises en place, telles que des clôtures pour éviter l'intrusion d'espèces protégées ou la création de mares temporaires pour les amphibiens, comme lors de la construction de la LGV Sud – Europe – Atlantique, qui a restauré environ 1200 hectares d'habitats naturels (QUADRANT Conseil et al., 2022).

Les concepteurs de projet (Architectes, ingénieurs) quant à eux, intègrent de plus en plus dans les réflexions de départ, des principes de conception bioclimatiques et écologiques en vue d'améliorer l'impact de leurs projets sur l'environnement. Il s'agit en effet de l'intégration de matériaux durables comme le bois et d'autres matériaux biosourcés, ou intégrant des principes de toitures et murs végétalisés pour améliorer l'isolation thermique tout en créant des habitats pour la faune urbaine, comme les oiseaux et les pollinisateurs (Oberndorfer et al., 2007).

Le groupe scolaire des Sciences et de la Biodiversité à Boulogne – Billancourt, conçu par l'agence ChartierDalix, constitue l'un des exemples les plus avancés en France d'intégration de la biodiversité directement dans l'architecture urbaine. Livré en 2014, cet équipement public de près de 6 800 m², comprenant une école primaire de 18 classes et un gymnase, a été pensé non seulement comme un bâtiment éducatif mais aussi comme un écosystème vivant capable d'accueillir et de favoriser le développement de la faune et de la flore locales dans un contexte urbain dense. L'ambition du projet fut de recréer un paysage primaire sur et autour du bâtiment, en transformant la toiture en espace naturel structurant et les façades en "murs habités" dotés d'anfractuosités, interstices et cavités favorables à la colonisation par des espèces végétales et animales. Cette démarche ne se limite pas à une simple toiture végétalisée : elle repose sur une co – conception avec des écologues, qui ont défini des substrats, des palettes végétales régionales et des dispositifs d'accueil de la faune (nichoirs intégrés, reliefs spécifiques, textures variées) en fonction des orientations, hauteurs et conditions microclimatiques du site. Cette stratégie a permis, au fil des années, l'installation spontanée d'une biodiversité comparable à celle d'un parc urbain, avec des inventaires recensant plusieurs centaines d'espèces animales et végétales directement sur l'enveloppe du bâtiment et ses abords. L'école fonctionne ainsi à la fois comme outil pédagogique pour les élèves, favorisant l'observation directe des dynamiques naturelles, et comme modèle d'architecture écologique, démontrant que l'intégration de milieux naturels dans le bâti peut aller bien au-delà de la simple végétalisation, en structurant des habitats réellement fonctionnels pour le vivant dans les villes (ChartierDalix, 2025).

Ces initiatives de collaboration entre concepteurs et écologues sont de plus en plus régulières dans le domaine des infrastructures, et ont pour but d'intégrer des solutions fondées sur la sauvegarde de l'environnement naturel et la protection des espèces, comme les corridors écologiques et les passages à faunes, à l'instar de ceux installés sur l'autoroute A75 pour permettre la circulation d'espèces comme les cerfs ou les blaireaux (NOWICKI et al., 2021).

Un des projets marquant à l'échelle française, dans le domaine du génie écologique appliqué aux infrastructures, est le projet dénommé « **Stratégie de restauration et de suivi de**

fonctionnalité des continuités écologiques le long du réseau ferré classique en Occitanie » (TerrOïko, 2023). Il s'agit en effet d'un projet mené par le Bureau d'étude en écologie TerrOïko, sur initiative de la Direction territoriale Occitanie de la SNCF Réseau, visant à anticiper et réduire les risques de collision des trains avec la faune sauvage, notamment grâce à la simulation numérique des dynamiques démographiques et des déplacements des espèces (sangliers, chevreuils, cerfs).

Les exemples énoncés ci – dessus dénotent en effet de l'importance grandissante des sujets de la biodiversité dans les projets de construction. De ce fait l'écologue devient un intervenant additionnel de tous les projets de construction avec un rôle prépondérant. Cependant, les processus BIM déjà mis en place dans ces projets de construction, n'incluent pas cette expertise métier qui au lieu d'être partie intégrante du processus technique, n'est souvent voué qu'à un rôle consultatif.

3.3 LE BIM ET LA GESTION ENVIRONNEMENTALE DES PROJETS

3.3.1 *Le BIM pour l'ACV des bâtiments et infrastructures*

L'ISO 14040 définit l'ACV (Analyse du Cycle de Vie) comme étant une méthode pour évaluer l'impact environnemental des matériaux, produits et systèmes constructifs, pendant tout le cycle de vie d'un projet (iTeh STANDARD PREVIEW, 2006). Une des difficultés majeures de l'ACV a pendant longtemps été due au fait que, requérant des données précises sur les matériaux, caractéristiques et quantités, cette analyse ne pouvait se faire qu'après la phase de conception (van Eldik et al., 2020), limitant ainsi son importance dans le processus d'élaboration d'un projet de construction.

Comme mentionné au point 2.2, le BIM apparaît comme un ensemble de moyens et de process, pour anticiper et faciliter, via la maquette numérique, la simulation et la prise en compte d'un plus grand nombre de paramètres dès les phases amont des projets. Aujourd'hui, une profusion d'outils "BIM – Compatibles" ont vu le jour, et permettent de nourrir cette réflexion sur l'intégration de l'impact environnemental via l'ACV (Hollberg et al., 2019), depuis même la phase d'APS (Avant – Projet Sommaire). Cet usage défini par Wong et Zhou sous le concept de "*Green BIM*" (Johnny & Zhou, 2015), peut se décliner selon deux (02) approches :

- La première approche consiste à créer une connexion directe entre le modèle natif dans le logiciel BIM, et l'outil d'ACV (Antón & Diaz, 2014). Cette méthode permet

d'exploiter directement toutes les informations nécessaires depuis la maquette pour en réaliser l'analyse. Par exemple, un des logiciels d'ACV les plus prolifiques sur le marché américain, appelé "*Tally*" (Building Transparency, KT Innovations, thinkstep, and Autodesk, 2025), est conçu pour créer une connexion directe et en temps réel avec tout modèle fait dans *Autodesk Revit*. Il permet de réaliser l'ACV, mais aussi proposer, sous forme de rapport, des solutions conceptuelles et techniques concrètes pour l'amélioration de l'impact environnemental dudit projet. Bien que très intéressante, cette approche se retrouve assez limitée du fait qu'elle est soumise à la barrière de l'interopérabilité obligatoire entre le l'outil d'ACV et le logiciel BIM ;

- La seconde approche, quant à elle, est basée sur l'utilisation du modèle IFC (van Gemert, 2019). Plus spécifiquement, il s'agit tout d'abord d'insérer dans les différents objets d'une maquette numérique, des paramètres environnementaux nécessaires. Ensuite, la maquette configurée depuis le modèle natif est exportée en format IFC et récupérée dans un logiciel ACV comme *OneClick LCA* ou *Elodie By CYPE* (du CSTB) par exemple. La principale limite de cette méthode est due au fait qu'elle soit assujettie à l'action humaine, notamment pour le bon renseignement des P-sets et même de l'IFC (van Eldik et al., 2020). Des méthodes alternatives sont cependant possibles, à travers l'automatisation de ce processus à l'aide, entre autres, d'applications de programmation telles que *Dynamo* (dans *Autodesk Revit*) ou même *Microsoft Excel* (Bueno et al., 2018).

Ces approches permettent d'évaluer les impacts environnementaux, notamment le coût carbone des projets, en allant de la fabrication, le transport et le stockage des matériaux, au processus d'exécution pendant le chantier, l'utilisation de l'ouvrage pendant la phase d'Exploitation – Maintenance, ainsi que la fin de vie de l'ouvrage par sa démolition. Ils exploitent des bases de données diverses, qui elles, définissent les caractéristiques des matériaux (leur facteur émissif en l'occurrence), mais aussi celles des systèmes et réseaux techniques MEP. Les principales bases de données sont :

- La base INIES et la base Carbone de l'ADEME en France ;
- L'ELCD (European Reference Life Cycle Database à l'échelle européenne ;
- L'Ecoinvent au niveau international ;

Aujourd'hui des outils d'ACV intègrent également les infrastructures. En France, on peut citer **DIOGEN**/**CIOGEN** qui sont deux outils complémentaires développés pour permettre la réalisation d'Analyses du Cycle de Vie (ACV) fiables et adaptées aux ouvrages d'art. **DIOGEN**

constitue une base de données environnementales dédiée aux matériaux du génie civil, couvrant uniquement la phase de l'extraction des matières premières à la sortie d'usine. Elle fournit des données représentatives du marché français, construites ou adaptées lorsque les bases internationales (comme Ecoinvent) sont insuffisantes. Ces données sont évaluées selon des critères de représentativité, puis mises à disposition sous forme de fiches téléchargeables pour guider les concepteurs et ingénieurs dans leurs choix de matériaux. **CIOGEN**, de son côté, est un outil de calcul ACV conçu pour agréger les données DIOGEN avec les processus réels de **transport, mise en œuvre, construction et entretien** des ouvrages. La version actuelle (V1) couvre les modules A1 à A5 (production, transport et construction) pour les ouvrages d'art courants en béton ou mixtes acier/béton, à partir des ratios mesurés lors de chantiers représentatifs et les prochaines évolutions (V2) devraient intégrer les phases d'exploitation et la fin de vie. Ensemble, DIOGEN et CIOGEN offrent une méthodologie structurée, spécifique au contexte français, permettant d'évaluer et comparer l'impact environnemental global d'un ouvrage d'art tout au long de son cycle de vie (Cerema, 2017).

Cependant, tous ces outils d'ACV sont principalement tournés vers l'évaluation de l'empreinte carbone des constructions, sans pour autant traiter de la biodiversité présente et de ses interactions avec les autres éléments de l'ACV (Liu et al., 2018).

3.3.2 Focus sur le projet « *OptiBioNum* »

Dans le but d'accompagner la prise en compte de la biodiversité dans la conception et l'adaptation des territoires, des villes et de leurs infrastructures, il paraît nécessaire de comparer différentes variantes d'un projet ou différents projets entre eux (Moulherat et al., 2022a; Seiler et al., 2022). Dans la continuité du projet BioBIM (Moulherat et al., 2019), *OptiBioNum* est un projet de Recherche et Développement (R&D) destiné à développer des outils permettant de réaliser de manière fine l'évaluation des capacités d'accueil de bâtiments et infrastructures pour la biodiversité, et d'optimiser la qualité environnementale des projets dès les phases les plus amont de leur planification et conception.

Le projet est prévu pour se dérouler en trois (03) étapes principales :

- **Développement des indicateurs relatifs au fonctionnement des réseaux écologiques, par l'utilisation de la simulation numérique** : Les simulations numériques permettent d'évaluer de manière standardisée le fonctionnement des réseaux écologiques dès la phase de conception de projets, qu'il s'agisse de nouveaux

aménagements ou de réhabilitations (Catalano et al., 2021a; Djema, 2021). Elles facilitent la comparaison objective de différentes variantes de projets (Moulherat, 2017). Depuis 2022, TerrOïko développe des indicateurs nationaux standardisés, issus de simulations, pour comparer les performances d'accueil de la biodiversité à l'échelle des collectivités ou des quartiers. Ces indicateurs évaluent, par exemple, le « potentiel d'accueil » d'un site pour diverses espèces, hors contexte paysager, ou sa « responsabilité » dans le réseau écologique, en tenant compte des pressions anthropiques comme l'éclairage ou le bruit. Bien que prometteurs, ces indicateurs expérimentaux nécessitent encore des ajustements pour être appliqués à des échelles plus fines, comme les bâtiments ou les infrastructures linéaires, constituant l'objectif initial du projet ;

- **Intégration des indicateurs dans les maquettes numériques hybrides combinant SIG (Réseaux écologiques définis à large échelle) et BIM (Éléments 3D du bâti modélisés à l'échelle fine)** : Le projet OptiBioNum vise à adapter les indicateurs pour évaluer la biodiversité à l'échelle des bâtiments et des infrastructures linéaires, comme les réseaux de transport. Il nécessitera l'utilisation de maquettes numériques hybrides combinant SIG et BIM pour intégrer explicitement les éléments 3D dans l'évaluation des indicateurs et analyser le rôle des éléments à fine échelle (BIM) dans les réseaux écologiques définis à grande échelle (SIG) (Moulherat et al., 2022a). La seconde tâche du projet consistera à automatiser et intégrer les traitements des indicateurs issus de la première tâche dans l'outil open core de TerrOïko, Ecological Engineering Studio (EES) en cours de développement, qui permet déjà de représenter et manipuler des objets SIG et BIM dans un environnement unifié ;
- **Réalisation d'un démonstrateur sur les gares et/ou centres techniques du réseau de transports du Grand Paris Express (GPE)** : La troisième tâche consistera à développer un démonstrateur appliqué à des gares et/ou centres techniques du Grand Paris Express (GPE). Pour cela, les maquettes BIM génériques de gares et centres techniques, fournies par la Société des Grands Projets (SGP), seront simulées le long d'un gradient d'urbanisation dans un rayon d'environ 5 km autour des sites. Chaque gare ou centre technique existant sera remplacé virtuellement par ces maquettes, déclinées en 2 à 4 variantes (par exemple : surfaces végétalisées, aménagements des parvis, types d'éclairage, à définir précisément en début de projet). Les indicateurs de biodiversité seront ensuite calculés et intégrés à chacune de ces maquettes génériques.

Le projet OptiBioNum a en effet été lauréat de l'appel à projets 2024, de la Fondation FEREC (Fondation d'entreprise, Recherche collective pour la Construction et les infrastructures). Il vise à produire des indicateurs permettant d'évaluer les rapports de Coûts – bénéfices financiers et pour la biodiversité à l'aide d'outils numériques utilisés par les Maîtres d'ouvrage, concepteurs et gestionnaires d'infrastructures. Il constitue un pas important dans le domaine de l'ingénierie écologique et des infrastructures.

3.4 DES INTERROGATIONS PERSISTENT !

Dans un contexte global marqué par des enjeux environnementaux de plus en plus importants, l'on assiste à une prise de conscience collective, et des actions subséquentes sont entreprises à diverses échelles, en vue de leur prise en compte. Comme démontré dans les sections précédentes, les activités du secteur de la construction et des infrastructures présentent de manière significative, de nombreux impacts négatifs sur l'environnement et la préservation des espèces. Les acteurs de ce secteur, guidés par un arsenal réglementaire favorisant et/ou imposant l'intégration de mesures strictes, sont désormais contraints de se conformer aux exigences environnementales, notamment à travers l'application stricte de la séquence ERC.

Parallèlement à ce fait, l'intégration du numérique dans le domaine de la construction a apporté de profonds changements dans les processus et la manière de conduire les projets d'infrastructures. Le BIM permet en réalité, de simuler des scénarios dès les phases de conception de projets, par la réalisation de maquettes numériques. A travers les plateformes SIG mises à disposition par les pouvoirs publics et les organisations professionnelles, l'intégration des données environnementales dans le domaine de la construction et des infrastructures est de plus en plus facilitée.

Des observations et analyses faites dans les sections introductives, il ressort que les activités principales menées par les professionnels de la construction grâce au numérique, notamment au BIM, et allant dans le sens de l'environnement, sont pour la plupart tournées vers la recherche de moyens pour prioriser l'impact positif de la nature sur le bien – être de l'humain (Catalano et al., 2021a). Cependant, le constat est que les initiatives en faveur de la préservation des écosystèmes et de la biodiversité, en proie à un risque de disparition massive (IPBES, 2019) due à la construction d'infrastructures de plus en plus importantes, restent encore très faibles au regard du potentiel qu'offre le BIM et la simulation numérique. Il n'en demeure pas moins que les besoins en comparabilité entre variantes de projets gagnent en importance, répondant

ainsi à la problématique de prise en compte de la biodiversité dans la conception et l'adaptation des territoires, villes et les infrastructures qui y sont développées.

De tout ce qui précède, la question fondamentale qui se pose est la suivante :

Comment le BIM peut – il contribuer à l'optimisation de la capacité d'intégration de la biodiversité, dans les projets de bâtiments et d'infrastructures ?

L'objectif visé étant de limiter, à travers le BIM, l'impact néfaste des projets de construction de bâtiments et d'infrastructures sur la biodiversité et les écosystèmes naturels environnants, il s'agira pour nous de répondre plus spécifiquement, par nos travaux, aux questions suivantes :

- Comment intégrer les indicateurs de performance environnementale en matière de biodiversité dans les maquettes numériques ?
- Quels processus BIM mettre en place, en vue de réaliser les simulations des différents scénarios de conception, basées sur l'évaluation de la capacité d'accueil en biodiversité ?

Cette thèse professionnelle, rentre en effet dans le sillage du projet de Recherche et Développement (R&D) « OptiBioNum » porté par *TerrOiko*, bureau d'études spécialisé dans le développement de technologies numériques innovantes, appliquées à la biodiversité. Elle traite essentiellement du volet lié à la mise en place d'un cas d'usage BIM spécifique à la biodiversité dans le projet, ainsi qu'aux différents processus et méthodes qui en découlent.

Sans se substituer aux besoins de réalisation de terrain spécifique, les outils proposés dans ***OptiBioNum*** offrent l'opportunité d'intégrer les problématiques de préservation de la biodiversité très tôt dans la conception des projets neufs ou de réaménagement de l'existant. À ce titre ils permettent à l'utilisateur de bénéficier de diagnostic très précoce des effets de projet sur la biodiversité pouvant s'avérer utile dès les phases de financement d'un projet.

Ces capacités de diagnostic précoce permettent aussi d'adapter les projets tout au long de leur conception au regard de la séquence éviter-réduire-compenser (ERC) afin d'en minimiser les impacts sur la biodiversité. Pendant la conception du projet puis son exploitation, l'intégration des indicateurs de fonctionnement des réseaux écologiques aux maquettes numériques des infrastructures concernées permet une visualisation des enjeux relatifs à la biodiversité, mais aussi d'illustrer les choix réalisés par la maîtrise d'ouvrage. Il est dès lors plus aisé de présenter les enjeux et choix effectués au grand public, aux salariés travaillant sur site, aux aménageurs en interaction avec les infrastructures concernées ou encore aux services de l'État.

Au-delà des applications possibles au secteur des transports, les travaux conduits dans le projet seront transposables à d'autres secteurs d'activités tels que l'aménagement du territoire ou l'immobilier.

3.5 STRUCTURE DE LA THESE

L'objectif de ce travail est de définir et de conceptualiser un processus permettant d'évaluer la « Performance écologique » des projets de construction, englobant à la fois les bâtiments et des infrastructures, à travers l'utilisation du BIM.

Dans la suite de ce travail, nous ferons en premier lieu un état de l'art sur le sujet. Il s'agit en effet de mettre en évidence les fruits des travaux déjà effectués en rapport avec la Biodiversité et le numérique. Cet état de l'art se base sur les études, articles et revues scientifiques, ainsi que les projets de Recherche et Développement entrepris dans le domaine.

A l'issue de l'état de l'art, l'on s'attellera dans un second temps à la mise en place du processus BIM – SIG dans le projet. Ce sera le lieu de préciser les différentes interactions à mener entre acteurs, le cadre réglementaire et normatif, ainsi que le flux des données durant le processus.

Enfin, la dernière partie consistera en la mise en application du processus sur des gares et centres techniques du projet du Grand Paris Express (GPE). Les résultats obtenus à partir des tests effectués, permettront d'évaluer la viabilité et la fiabilité de notre démarche.

CHAPITRE II : ETAT DE L'ART

4 GENERALITES SUR LA THEMATIQUE

4.1 DEVELOPPEMENT BIM VERS BIM INFRA VERS CIM / DT

4.1.1 Extension du BIM vers le BIM – Infra

La NF EN 16650 - 1, 3.3.14 définit le BIM comme étant l'« Utilisation d'une représentation numérique partagée d'un actif bâti pour faciliter le processus de conception, de construction et d'exploitation et former une base fiable en permettant les prises de décision » (AFNOR, 2018).

Selon le projet National MINnD, le BIM Infra repose sur les principes normalisés édictés par l'ISO 16650 à travers une gouvernance des données qui garantirait la continuité entre les différentes phases projet et l'exploitation de l'actif (Benning et al., 2019). S'appliquant spécifiquement aux infrastructures linéaires relativement complexes, son application efficiente intègre des enjeux importants de géoréférencement, d'interopérabilité SIG – BIM et de modélisation paramétrique pour le respect des formes géométriques et fonctionnelles des ouvrages. Le document précise également la nécessité de formaliser les échanges entre les différents acteurs de la chaîne de production et de gestion des ouvrages, via un Environnement Commun de Données (CDE).

Un ensemble d'usages BIM est recensé et intègre la connaissance de l'existant, la modélisation et la coordination, les revues de maquettes, la planification 4D/5D et la préparation du DOE/DIUO, afin de fournir un modèle riche en informations utile à l'alimentation des outils de GMAO (Benning et al., 2019; Cousin et al., 2017). La revue numérique de projet, permettant d'évaluer la qualité et la complétude du modèle numérique, est décrite par le (Cousin et al., 2017); elle s'appuierait sur un protocole structuré de vérification (préparation, conduite, exploitation et suivi), dans le but de s'assurer de la traçabilité et la conformité des livrables. Le MINnD_TH03_UC02_01 (Hajar et al., 2015) quant à lui définit une matrice complète de métadonnées (Couches caractéristiques, intensité et typologie des trafics, historique des entretiens etc.) et les échanges itératifs de données entre les bases de données routières, le SIG et la maquette BIM. Ces travaux mettent en lumière la nécessité de rendre complémentaires les trois (03) entités sus – mentionnées, par une « *interopérabilité sémantique* » assurant la

cohérence des données échangées tout le long du cycle de vie de l'ouvrage. En sus, ils indiquent un ensemble de verrous dont :

- L'absence d'extensions IFC adaptées et normalisées (IfcRoad, IfcBridge, IfcRail, etc.) ;
- Des systèmes de classification hétérogènes ;
- Un degré de maturité moins avancé ;
- Un contrôle qualité non automatisé.

Tous ces enjeux ont conduit à la prise en main des processus BIM dans la production et l'exploitation des infrastructures (BIM – Infra), avec le développement de logiciels métiers pour la conception et la visualisation de projets. Il s'agit entre autres de :

- Civil3D et InfraWorks, édités par **Autodesk** ;
- Covadis et Mensura, édités par **Sogelink** ;
- Le pack OpenBridge CONNECT Edition (OpenRoads/OpenRail/OpenBridge) de **Bentley**.

4.1.2 Le BIM pour les territoires

Reconnu comme un ensemble de systèmes complexes, le développement du territoire nécessite l'intégration de l'habitat et des infrastructures dans sa gestion. Cette intégration passe nécessairement par une planification territoriale à l'aide d'outils numériques, permettant de prévoir et de gérer l'interconnexion des réseaux à l'aide d'une base de données virtuelle, dans de laquelle l'on retrouve des entités modélisées et géoréférencées. L'idée du CIM (City Information Modeling) est d'allier SIG et BIM pour une meilleure organisation du territoire.

Par extension et dans le but de prendre en compte les enjeux du développement durable par l'optimisation des ressources, il a été déployé le concept de Jumeaux Numériques (Digital Twin) des Territoires. Il s'agit d'une représentation virtuelle, le clone numérique d'un territoire alimenté par un échange synchronisé des données captées en temps réel, et permettant d'anticiper les dynamiques d'évolution grâce à des modèles statistiques ou mécanistes (Koning et al., 2023; Jones et al., 2020). L'exploitation de l'IoT (Internet of Things) et d'autres capteurs mécaniques ou automatisés, permet de produire les données de terrain pour l'actualisation du Jumeau Numérique. Inversement, des opérations urbaines peuvent être planifiées et programmées à partir de ce Jumeau Numérique afin d'en cerner tous les contours, avant la mise en œuvre opérationnelle sur le terrain.

Le flux bidirectionnel entre CIM et données dynamiques de terrain, ouvrent de nombreuses perspectives pour intégrer la dimension environnementale dans la construction et la gestion des

projets de bâtiments, d'infrastructures, et plus largement, dans les stratégies et opérations de développement territorial (Catalano et al., 2021a; Moulherat et al., 2019). Les outils logiciels de conception / intégration urbaine et SIG les plus récurrents sont :

- Civil3D et InfraWorks, édités par **Autodesk** ;
- Civil Design for Fabrication, édités par **Dassault Systèmes** ;
- Tekla Civil Novapoint de **Trimble** ;
- Microstation de **Bentley** ;
- **Esri** ArcGIS ;
- QGIS.

4.2 CONVERGENCE SIG – BIM

4.2.1 SIG et BIM : nécessité d'une intégration réussie

Dans le cadre du développement de modèles numériques de territoires, nécessitant la gestion d'informations aussi variées que complexes (Transports, réseaux d'adduction, assainissements, télécom, planification spatiale, etc.), une approche d'inclusion entre SIG et BIM s'impose (El Mekawy et al., 2021). Cet état de fait a suscité bon nombre de travaux sur le sujet, même si cette intégration souhaitée n'est jusque-là pas encore effective (de Laat & van Berlo, 2011).

La difficulté d'assurer une bonne intégration résiderait dans le fait qu'il existe de nombreuses incompatibilités entre le BIM et le SIG, tant au niveau des échelles d'intervention, que de la quantité et la qualité d'informations requises ou générées (Halbout et al., 2023), mais aussi des outils technologiques différents (de Laat & van Berlo, 2011).

Dans (Hbeich et al., 2020), une étude comparative a été faite, révélant les principales différences entre le BIM et le GIS, synthétisées dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Différences entre BIM et GIS, (Hbeich et al., 2020)

	BIM	GIS
Environnement de modélisation	Basé sur le modèle du bâtiment sans tenir compte de son environnement. De plus, le modèle BIM ne tient pas compte de topographie du terrain, ce qui signifie que vous ne savez pas quelle partie est en surface ou en sous-sol. De plus, il est présenté comme un niveau de détail unique (LOD)	Il se concentre sur l'environnement extérieur, où chaque élément est connecté à son environnement. De plus, il contient plusieurs niveaux de développement (LOD) et plusieurs couches (par exemple, occupation du sol, élévation, etc.)
Système de référencement	Utilise des systèmes de coordonnées locaux ayant une unité arbitraire, couvrant une échelle limitée, sans limitation de zone, composés de petits nombres, et ne présentant ni distorsion de projection ni distorsion altimétrique	Utilise des systèmes de coordonnées globaux, tels que les systèmes de coordonnées de référence, ayant comme unité de mesure linéaire le mètre, couvrant l'ensemble du globe, circonscrit par des limitations de zones, comportant un grand nombre de décimales (7 à 8 avant et 2 à 3 après la virgule), et présentant des distorsions de projection et de hauteur
Détails de dessin	Utilisé pour développer des résolutions plus grandes avec un niveau de détail plus élevé	S'appuie sur les informations et les objets existants. Il couvre une grande zone avec moins de détails et à des échelles plus petites
Zone d'application	Le BIM se focalise sur le bâtiment et ses attributs. Il est utilisé dans l'analyse, la documentation, la conception détaillée, la rénovation, le processus de construction, l'exploitation, etc.	Il sert à représenter les zones urbaines et les villes, la gestion des installations, la planification et l'ingénierie urbaine, la gestion des ressources environnementales, etc
Outils utilisés	Revit, Archicad, AllPlan, etc.	ArcGIS, QGIS, etc.
Sémantique	Utilise l'IFCOWL pour représenter les données, entités, concepts et propriétés de construction de bâtiments, du schéma IFC avec le langage d'ontologie Web. Il est mis à jour à chaque nouvelle version de l'IFC.	Utilise les ontologies de l'ISO TC 211 pour représenter les modèles UML de l'ISO/TC 211 avec le langage d'ontologie Web. Cela permet d'exposer l'ISO/TC 211 à d'autres communautés et de relier différents concepts.
Aspects temporels	Même si le BIM contient des attributs et des entités qui représentent le cycle de vie d'un bâtiment, il n'existe aucun lien entre les différentes phases de ce cycle de vie.	Définit des liens entre les représentations géométriques et les propriétés géométriques, il connecte et représente également l'élément dans différentes phases du cycle de vie.

Des études ont été menées pour exploiter les possibilités de convergence entre le BIM et le SIG. (El Mekawy et al., 2021) a fait une revue des axes sur lesquels ces travaux ont été menés, et les classe en quatre (04) groupes :

- Transformations de modèles BIM de bâtiments vers le SIG ;
- Différentes stratégies pour enrichir des modèles SIG et les transformer / convertir en modèles BIM ;
- Unification des modèles BIM et SIG à travers un serveur central indépendant ;
- L'intégration sémantique et l'interopérabilité entre les ontologies à partir d'un mappage des classes ainsi que des normes et standards relatifs au BIM et au SIG.

Il existe par ailleurs des solutions logicielles développées ces dernières décennies, et qui tendent à améliorer cette interopérabilité entre BIM et SIG de manière native à l'intérieur même de ces logiciels, ou entre plusieurs logiciels partageant des formats en commun. Parmi ces logiciels, on distingue principalement dans l'usage quotidien :

- Global mapper pro édité par **Blue Marble Geographics** ;
- **Esri** ArcGIS Pro ;
- FME de chez **Safe Software**.

4.2.2 Premiers pas vers l'interopérabilité

4.2.2.1 Développement d'un format adapté aux modèles SIG

L'Open Geospatial Consortium (OGC) a développé le standard CityGML basé sur le langage GML (Geography Markup Language). Il s'agit d'un format de représentation et d'échange de modèles 3D urbains se présentant sous une forme graphique et mettant l'accent sur la définition et la description sémantique et géométrique de l'espace urbain. Le modèle consiste en la visualisation d'une scène urbaine regroupant un ensemble d'objets et de réseaux urbains.

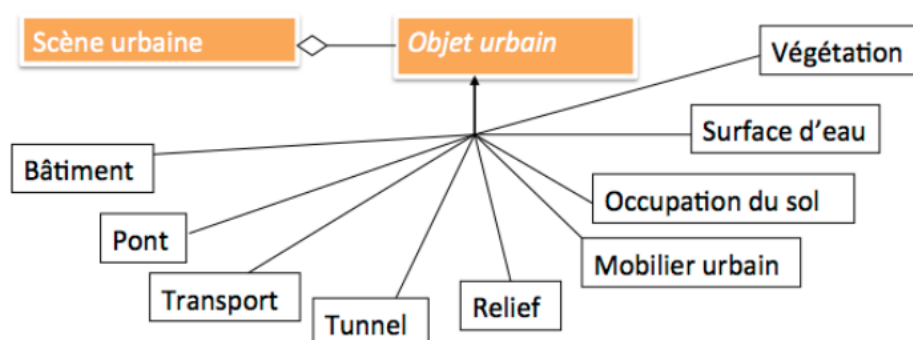


Figure 3 : Eléments de la scène urbaine CityGML, (IGN, 2018)

A l'instar de l'IFC dans le bâtiment, le CityGML dispose d'attributs permettant d'identifier la nature et la fonction des objet. Cependant leurs caractéristiques sont différentes :

Tableau 2 : Comparaison des caractéristiques IFC et CityGML, Extrait de (Hbeich et al., 2020)

	IFC	CityGML
Schéma	Express	UML (Unified modelling language) (ISO 19501, 2004)
Données	STEP (Standard for the Exchange of Product model data) (ISO 10303)	GML3.2 and 3.3. (Geography Markup Language)
Format de fichier	.ifc, .ifcowl, .ifcxml	gml, XML-based
Identifiant	GUID (Global Unique Identifier)	ObjectID (object identifier)
Standard	ISO 16739 (IFC), ISO TC 184/SC4 (Donnée industrielle)	OGC, ISO/TC 211 e.g. The OpenGIS Feature, OGC document 99-105r2 and ISO/TS 19103:2005, Geographic Information Conceptual Schema Language

4.2.2.2 Evolution des connaissances scientifiques

Le sujet de l'interopérabilité entre BIM et SIG a fait l'objet de travaux approfondis au fil du temps. Une étude analytique des plus récents travaux serait nécessaire, afin d'avoir une vue globale des progrès réalisés sur le sujet, ainsi que les atouts et limitations des différentes approches proposées par la communauté scientifique autour du BIM et du SIG. Certaines de ces approches sont mentionnées ci – dessous :

- (de Laat & van Berlo, 2011) : Présente le développement d'une extension du CityGML appelée « GeoBIM » afin d'implémenter des données sémantiques de l'IFC dans un contexte SIG. Cette extension permettrait de transformer 60 à 70 classes depuis l'IFC vers le CityGML, et inversement. Cependant à la pratique, l'on remarque quelques erreurs de géométrie en faisant les conversions ;
- (Mignard & Nicolle, 2014) : Décrit la création d'un Modèle d'Informations Urbaines (UIM) servant de carrefour de données entre les informations géographiques et celles du modèle du bâtiment. Cet UIM permet d'intégrer toutes les informations de la ville, incluant les bâtiments, les réseaux et autres éléments suivant une ontologie commune à partir de la plateforme ACTIVE3D. Ce modèle ne permet pas en revanche de faire un tri raisonné entre des données complexes ;
- (Boguslawski et al., 2015) : Il tend à intégrer une analyse avancée du BIM et du SIG pour améliorer le modèle 3D analytique. L'objectif a été de parvenir à utiliser des

fichiers gbXML, IFC et SIG comme données d'entrée à partir de la structure des modèles. Cette méthode d'analyse permet de générer automatiquement des modèles de navigation intégrant le modèle BIM, mais ne se limite qu'à la structure de l'IFC. Il n'utilise pas les normes SIG, ce qui peut causer des erreurs de lecture d'objets ;

- (Vilgertshofer et al., 2017) : Réussir à connecter un modèle de tunnel représenté à la fois dans CityGML et dans le modèle de données IFC en appliquant la technologie sémantique du web afin de souligner le rôle important des technologies sémantiques dans la coexistence et la cohérence entre les entités des deux normes. Il permet d'identifier les conflits entre les bâtiments/infrastructures existants et les travaux planifiés, exécuter des requêtes itératives entre IFC et CityGML et crée un lien de mappage des LOD et permet d'obtenir une cohérence sémantique entre les deux modèles. Cependant, cette approche également, permet uniquement de connecter l'IFC au standard CityGML, et non l'inverse. Le mappage n'est pas non plus automatique car l'IFC ne permettant pas de gérer les données et fonctionnalités aussi bien que les XML. Cela nécessite donc une intervention humaine pour apporter des corrections sur le modèle ;
- (Kang & Hong, 2018) : Cette recherche a défini une méthode de mappage géométrique entre les LOD de l'IFC vers CityGML. Il a mis en place un algorithme de génération basé sur une structure SB – MP associée. Cependant, une méthode de définition de la règle de mappage LOD, qui permet de déterminer la signification des éléments à mapper en fonction des aspects du LOD, est également nécessaire pour mettre en œuvre le mappage des éléments LOD à l'aide de CityGML dans IFC ;
- (Zhang et al., 2019) : Propose une nouvelle méthode de management urbain à partir d'une combinaison de la grille de code GeoSOT et le BIM, permettant la construction d'une plateforme de visualisation 3D du globe en temps réel, en utilisant la plateforme *Cesium.io*. Cette méthode semble par ailleurs limitée car l'importation dans Cesium ne permet pas de structurer les données selon le standard IFC. Il est seulement utilisé pour de la visualisation et des scénarios de management urbains.

Toutes ces études ont permis une grande avancée dans la convergence générale SIG – BIM. Par contre, les différentes approches sont orientées vers des cas d'usage spécifiques (Hbeich et al., 2020).

5 ET LA BIODIVERSITE DANS TOUT ÇA ?

5.1 APPROCHE METIER D'UNE ETUDE ECOLOGIQUE

5.1.1 Fondements réglementaires

Comme précisé au point 3.1.1 du chapitre introductif, la réglementation environnementale a été introduite en France à partir de la **Loi n°76 – 629 du 10 Juillet 1976 relative à la protection de l'environnement** (Légifrance, 2000), et généralisée par la **Directive européenne 85/337/CEE de 1985**. La « **LOI BIODIVERSITE** » (LOI n° 2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages, 2016), dont l'objectif est de protéger, restaurer et valoriser la biodiversité (Wikipédia, 2025), ainsi que les **articles L.122-1** et suivants du **Code de l'environnement** (Légifrance, 2025), ont débouché sur la norme **NF X10-900** (AFNOR, 2022) qui encadre la conduite d'un projet en génie écologique, et adaptée à tout type de milieu (forestiers, agricoles, urbanisés, humides, aquatiques, marins, etc.).

Cette norme traduit l'ensemble des différentes étapes clés qui constitue le corpus d'une étude écologique, à savoir :

- Le Précadrage : Cette phase consiste en la définition du périmètre spatial et temporel de l'étude, selon l'emprise du projet et ses zones d'influence ;
- L'Etat initial du milieu naturel, régi par la **NF X32-102** (AFNOR, 2023). Il sert à recenser la faune, la flore, les habitats naturels, les fonctions écosystémiques et les continuités écologiques de la zone d'influence du projet ;
- Définition des enjeux et des objectifs : Il s'agit de hiérarchiser les enjeux écologiques selon l'ordre de priorité imposé par les critères fonctionnels établis, mais aussi par la réglementation en vigueur et l'importance patrimoniale accordée au projet ; Durant cette phase, l'on évalue les incidences potentielles du projet, en analysant les effets directs et indirects à court, moyen et long terme ;
- Rédaction du programme opérationnel qui définit les mesures ERC ;
- Rédaction des cahiers de charges ;
- Passation des contrats ;
- Exécution et contrôle des travaux ;
- Suivi et gestion.

5.1.2 La séquence ERC, pilier de l'approche métier

5.1.2.1 Contexte

La séquence ERC constitue un aspect important de l'ingénierie écologique. Ce triptyque (Eviter – Réduire – Compenser) a pour vocation l'aménagement durable des territoires, et de favoriser la non – perte nette de la biodiversité (Djema, 2021; Rosell et al., 2023). Depuis son introduction aux Etats Unis en 1969, et son appropriation en France à travers la **Loi n°76 – 629 du 10 Juillet 1976 relative à la protection de l'environnement** (Légifrance, 2000), le cadre pratique et réglementaire d'application de cette séquence ERC a fortement évolué. Cette loi sus – citée l'imposait dans le corpus d'une étude d'impact, en vue de l'obtention d'une autorisation pour la réalisation de « projets de travaux, d'ouvrages ou d'aménagements publics ou privés, qui par leur nature, dimension ou localisation sont susceptibles d'avoir des incidences notables sur l'environnement ou la santé humaine » (Legifrance, 2025). La Loi de reconquête de la biodiversité (LOI n° 2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages, 2016) impose désormais, en plus de l'obligation de moyens pour la mise en place de mesures d'ERC, une obligation de résultats à travers un monitoring des effets de ces mesures à court, moyen et long terme.

La séquence ERC est donc l'élément fondamental qui structure le processus d'intégration des mesures environnementales dans un projet.

5.1.2.2 Mise en application

La séquence ERC a pour objet de limiter l'incidence des opérations humaines sur l'environnement, par la réduction des atteintes n'ayant pas pu être évités, et éventuellement la compensation de celles qui n'ont pas pu être réduites (CGDD & Cerema, 2018).

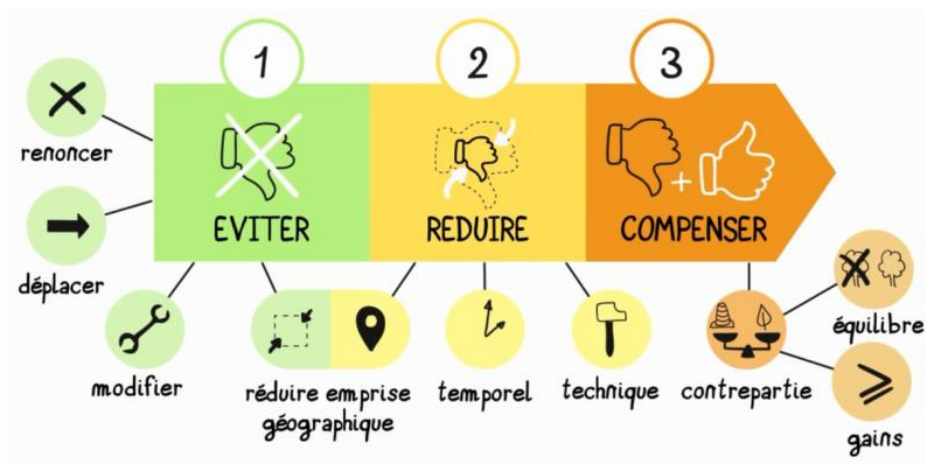


Figure 4 : Hiérarchisation de la séquence ERC (UVED, 2021)

La séquence ERC couvre l'ensemble des étapes d'évolution d'un projet, incluant certaines mesures jugées appropriées. Plus spécifiquement, il s'agit :

- d'**Eviter** en mettant en place des mesures pour modifier un projet, ou en proposant des documents de planification afin de supprimer les effets néfastes identifiés, que ce projet pourrait engendrer. Les mesures d'évitement peuvent être classées en selon leurs types et catégories tel que l'indique le tableau suivant :

Tableau 3 : Type et catégories des mesures d'évitement, Extrait de (Djema, 2021)

TYPE	CATEGORIE	EXEMPLE
Évitement amont	Phase conception	Évitement des sites enjeux environnementaux forts.
Évitement géographique	Phase travaux	Balisage préventif d'une station d'espèce.
	Phase exploitation	Limitation des emprises du projet.
Évitement technique	Phase travaux	Pas de rejet dans les milieux naturel (air, eau, sol).
	Phase exploitation	Adaptation des choix d'aménagement des caractéristiques du projet.
Évitement temporel	Phase travaux	Adaptation de période des travaux sur l'année.
	Phase exploitation	Adaptation des périodes d'exploitation sur l'année.

- de **Réduire** les effets négatifs de l'opération au cas où des considérations techniques, fonctionnelles ou même financières, n'auraient pas pu permettre de les éviter totalement. Les mesures de réduction intervient généralement comme des solutions techniques à adopter en phase chantier, mais aussi des dispositifs intégrés dans la conception de l'ouvrage en lui – même (notre-environnement, 2025).

Tableau 4 : Type et catégories des mesures de réduction, Extrait de (Djema, 2021) et modifié par S. Jonathan TOURE

TYPE	CATEGORIE	EXEMPLE
Réduction géographique	Phase travaux	Adaptation des installations de chantier
	Phase exploitation	Adaptation des emprises du projet
Réduction technique	Conception et Phase travaux	Adaptation des modalités de circulation des engins de chantier
		Mise en place de protections anti – bruit
Réduction temporelle	Phase travaux	Adaptation des horaires de travaux pour réduire les nuisances sonores
	Phase exploitation	Adaptation des horaires de mise en service

- enfin, de **Compenser** la perte de biodiversité engendrée par le projet, notamment par des mesures pour « apporter une contrepartie aux incidences négatives notables, directes

ou indirectes du projet sur l'environnement » (notre-environnement, 2025). Ces mesures sont prévues par le code de l'environnement, notamment en son article R.122 – 13 (Légifrance, 2019) s'appliquant sur toutes les thématiques environnementales.

Tableau 5 : Type et catégories des compensations, Extrait (Djema, 2021)

TYPE	CATEGORIE	EXEMPLE
Réduction géographique	Phase travaux	Adaptation des installations de chantier
	Phase exploitation	Adaptation des emprises du projet
Réduction technique	Conception et Phase travaux	Adaptation des modalités de circulation des engins de chantier
		Mise en place de protections anti – bruit
Réduction temporelle	Phase travaux	Adaptation des horaires de travaux pour réduire les nuisances sonores
	Phase exploitation	Adaptation des horaires de mise en service

En bout de chaîne, l'ensemble des mesures de la séquence ERC sont susceptibles d'obtenir soit des manques à gagner **résiduels** (mesures efficaces, mais ne comblant pas totalement les déficits créés), des **compensations** (mesures permettant de gagner autant en biodiversité qu'on en a perdu), et dans certains cas, des **gains nets** (le projet devient un facteur de renforcement de la biodiversité présente à l'état initial).

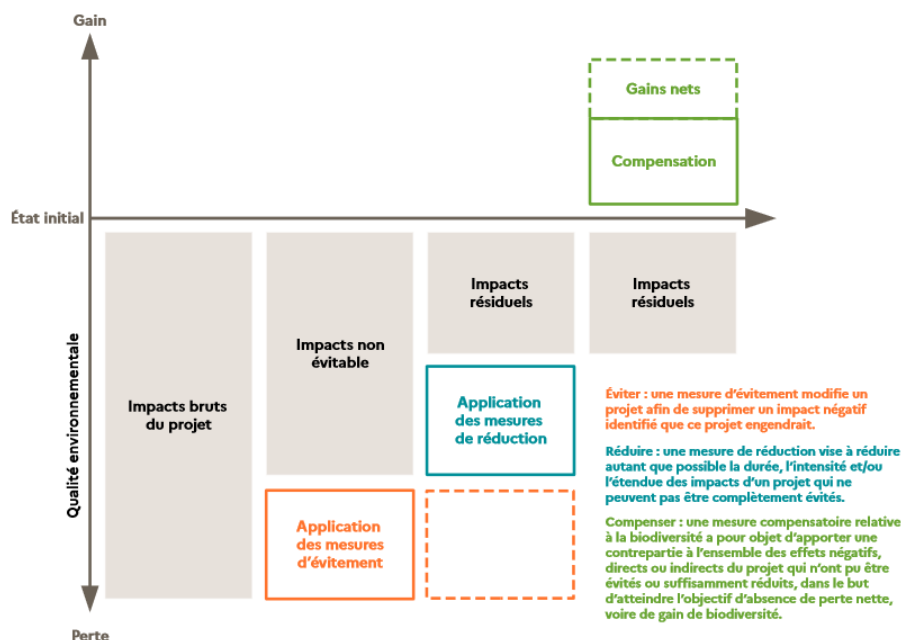


Figure 5 : Synoptique de la séquence ERC appliquée à la biodiversité, (notre-environnement, 2025)

5.2 TRAVAUX DE TERROÏKO SUR LE NUMERIQUE ET LA BIODIVERSITE

5.2.1 La plateforme SimOïko

Conçue à partir des travaux de thèse de Sylvain Moulherat relatifs au simulateur **MetaConnect** développé au sein de la Station d'Ecologie Théorique et Expérimentale (SETE) du CNRS dans le cadre du projet européen SCALES (Moulherat, 2014), SimOïko est un modèle de simulation visant à représenter de manière modulaire et stochastique les dynamiques de populations d'un territoire, c'est-à-dire des populations d'une même espèce réparties sur plusieurs habitats connectés. L'idée de cette plateforme est de simuler, dans un environnement paysager numérisé, le fonctionnement dynamique des groupes d'espèces à travers leur cycle de vie, leurs comportements et interactions avec leur milieu.

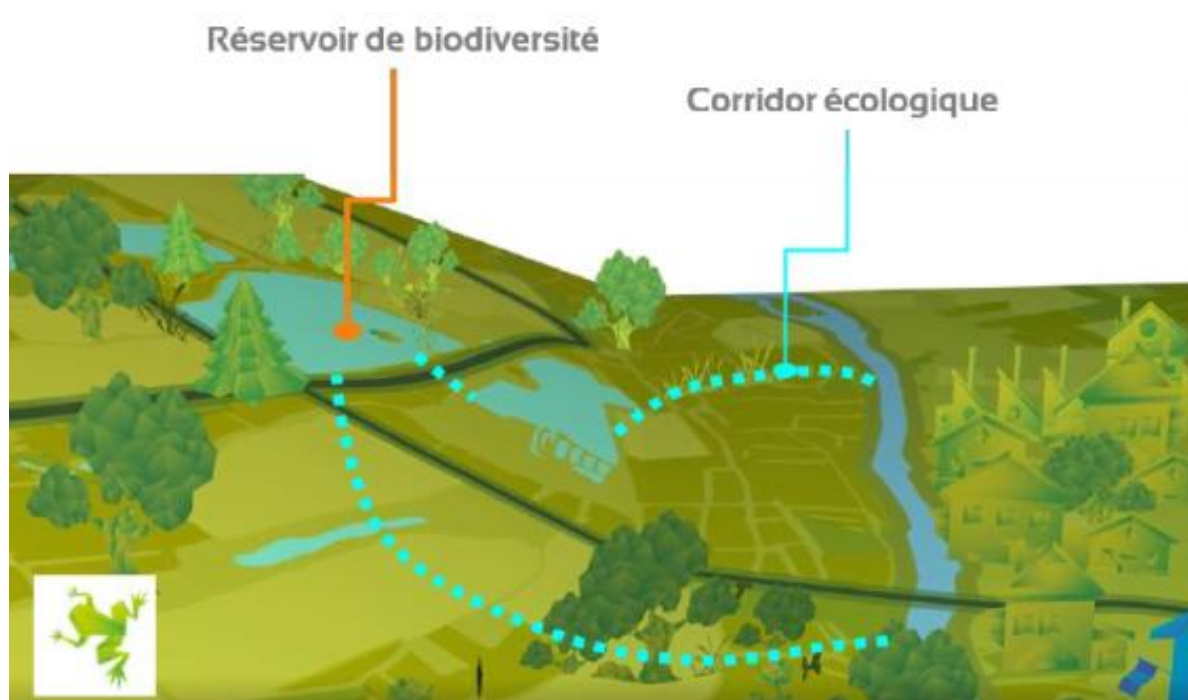


Figure 6 : Exemple de simulation d'environnement naturel dans SimOïko, (TerraOïko, 2024)

L'intérêt de cet outil est de parvenir à une modélisation écologique prospective, permettant entre autres d'évaluer les conséquences d'un projet d'aménagement (routes, zones industrielles, ligne électriques, voies ferrées, etc.) sur la connectivité écologique et la pérennité des populations d'espèces (TerraOïko, 2024). SimOïko se présente donc comme :

- Une innovation technologique dans la manière de traiter la biodiversité par la combinaison de données de modélisation écologique ainsi que de données SIG dans un même modèle informatique.

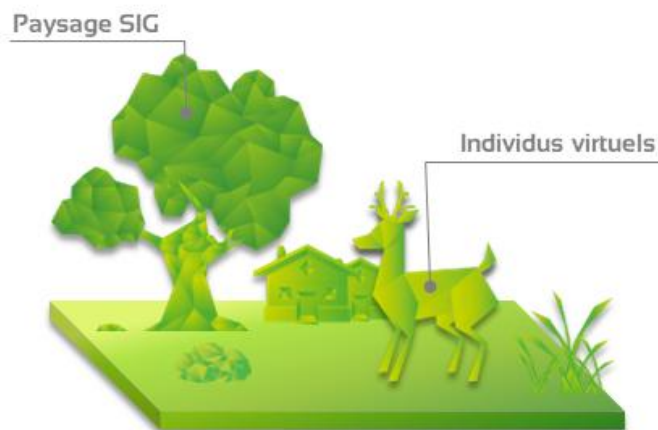


Figure 7 : Principe de convergence SIG – Ecologie dans SimOïko, (SimOïko | la simulation au service de la biodiversité, 2024)

- Un outil d'appui à la séquence ERC, en permettant de tester virtuellement différents scénarios d'aménagement et d'anticiper leur incidence attendue sur le développement de la biodiversité du site et celle environnante. C'est donc un moyen d'aide à la décision, capable de quantifier et visualiser les effets d'aménagements sur les dynamiques écologiques. Cette plateforme permet une meilleure appropriation de l'approche métier de l'ingénierie écologique décrite par la norme *NF X32-102* (AFNOR, 2023), en apportant des données nécessaires à la plupart des étapes, notamment celle de l'analyse de l'état initial, la modélisation des impacts et l'évaluation de l'efficacité des mesures (Moulherat et al 2023).

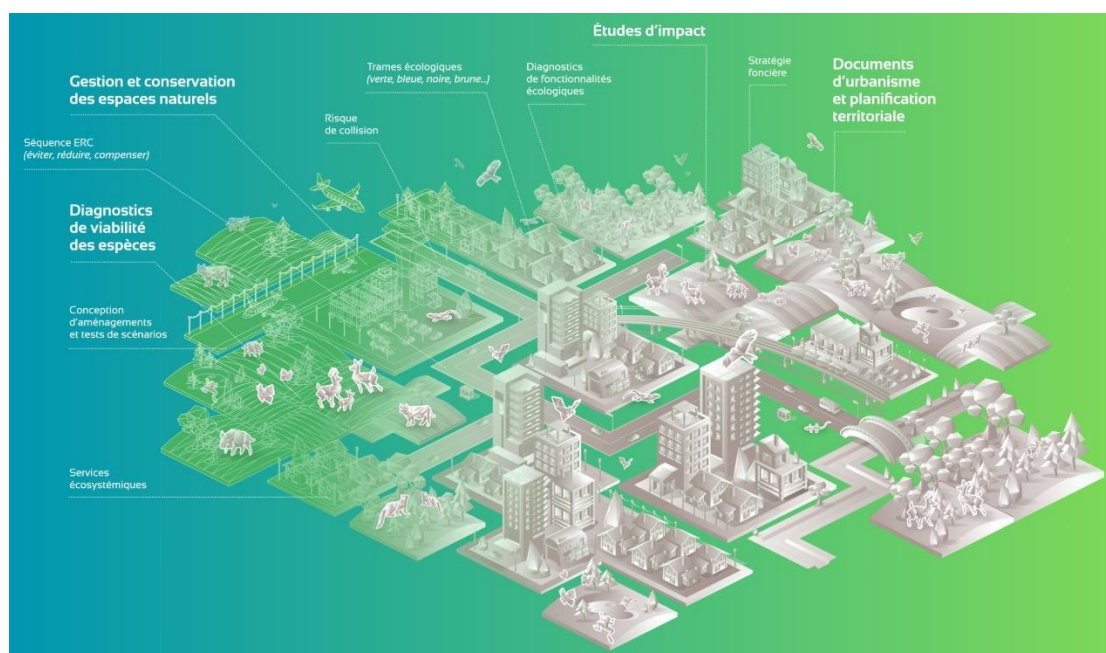


Figure 8 : Application de l'approche métier de l'ingénierie écologique via SimOïko, (TerrOïko | Nos programmes de recherche et développement, 2025)

5.2.2 Développement des Indicateurs de biodiversité

Pour améliorer l'intégration de la biodiversité dans l'aménagement du territoire, il est nécessaire de développer des indicateurs de biodiversité permettant le suivi de son état écologique (Noss, 1990). Bien que disponible dans la littérature scientifique à ce sujet, les indicateurs actuels de biodiversité ne se limitent qu'à décrire la structure ou la composition du milieu, mais dont les données renseignent peu ou indirectement sur la fonctionnalité écologique. Le développement de la plateforme SimOïko a permis d'obtenir un outil capable d'informer sur la fonctionnalité écologique d'un territoire en combinant des mesures de connectivité (Soret et al., 2025) et de dynamiques de population (Boileau, 2022)

Pour aller plus loin, TerrOïko s'est penché sur le développement d'une méthodologie d'évaluation de la biodiversité faunique urbaine en exploitant les résultats de simulations de dynamiques de populations. Le développement de ces indicateurs, portés sur la fonctionnalité des réseaux écologiques, a permis de conceptualiser une vision spatiale, temporelle et thématique de la « performance écologique » des sites, à travers deux (02) familles d'indicateurs.

- Indicateurs d'état écologique :

- La naturalité des espaces verts, mesurant le niveau d'artificialisation des sols, la spontanéité de la végétation et la continuité spatio – temporelle ;
- La quiétude du site, du point de vue de la pollution lumineuse liée à l'éclairage nocturne et artificiel, la pollution sonore, la pollution chimique et toutes autres pressions anthropiques exercées sur le site ;
- La composition du site en faune et en flore ;
- La continuité écologique qui évalue les réseaux d'échange entre réservoirs d'espèces de biodiversité.

- Indicateurs de contexte :

- L'importance du site au regard des zones reconnues comme étant favorable à la biodiversité ;
- L'importance du site dans le maintien de la biodiversité locale.

Ces indicateurs permettent donc d'évaluer la capacité d'un site à offrir des conditions favorables à la vie et à la reproduction d'espèces animales et végétales à partir de données propres aux milieux naturels et aux pressions environnementales.

5.2.3 Travaux de Recherche – Action sur l'intégration numérique des données de biodiversité dans le domaine des infrastructures

Dans un contexte de crise profonde de la biodiversité, diverses activités sont menées en vue d'exploiter le potentiel des nouvelles technologies pour la sauvegarde de celle – ci (Djema, 2021). Ces travaux de recherche de plus en plus importants, conduits par des écologues et des spécialistes du numérique, sont entre autres :

- **Le projet MINnD (Modélisation des INformations INteropérables pour les INFrastructures Durables)** : Il s'agit d'un projet de recherche à l'échelle nationale, qui consiste à maîtriser le flux et les d'informations dans le secteur du BTP, à travers les technologies numériques. Mené conjointement par une équipe plurielle d'experts de leurs domaines respectifs, le cas d'étude UC6 traite des modalités d'échanges d'informations entre les données d'infrastructures en lien avec l'environnement. Plus spécifiquement, ce projet de recherche s'est décliné en cinq (05) axes à savoir :
 - L'analyse critique des outils existants pour charger et mettre en cohérence les données sur les infrastructures et l'environnement ;
 - La définition d'un processus pour l'étude des enjeux environnementaux dans les infrastructures ;
 - La structuration et l'historisation des données ;
 - Les perspectives pour la construction de passages à faunes (Localisation, aménagements et analyse de performance ;
 - Des propositions réglementaires relatives aux infrastructures et aux données environnementales.
- **BioBIM** : Ce projet conduit conjointement par *TerrOiko* (Bureau d'étude en ingénierie écologique) et *Setec* (Bureau d'étude spécialisé en infrastructures), avait pour objectif de sensibiliser les acteurs en charge de la gestion environnementale des infrastructures de transport, sur les opportunités offertes par la transition numérique dans leurs activités (Moulherat et al., 2019). Plus spécifiquement, il a traité de l'intégration des outils de réalisation, de gestion et de suivi des mesures environnementales (séquence ERC) liées aux infrastructures de transport, dans les modèles BIM. Les acquis à l'issue de ce projet sont importants :
 - L'initialisation de spécifications techniques pour la création d'objets adaptés à la thématique de la biodiversité sur le long terme ;

- L'intégration d'éléments sur la biodiversité et sa gestion dans une maquette d'échangeur autoroutier existant ;
 - L'intégration de méthodes innovantes de production et de traitement des données de biodiversité au sein même de la maquette.
- **BISON** (Biodiversity and Infrastructure Synergies and Opportunities for European Transport Networks) : Il s'agit d'un projet européen mené entre 2021 et 2023, et ayant pour objectif d'établir une feuille de route promouvant la prise en compte effective de la biodiversité tout au long du cycle de vie des infrastructures (*BISON : synergies et opportunités pour la biodiversité et les infrastructures dans les réseaux de transport européens* | TerrOiko, 2021). Ce projet fut l'objet de deux (02) rapports, dont le premier traite de l'état des tendances émergentes et les défis futurs en matière de synergies entre biodiversité et infrastructures (Autret et al., 2023), et l'autre, de l'utilisation des logiciels BIM et des technologies émergentes pour la standardisation et la gestion des données (Moulherat et al., 2022b).

Cette liste non exhaustive d'initiatives, tant au plan national qu'au niveau européen et international, témoigne de la volonté des acteurs de l'écologie et ceux de la construction, d'exploiter les possibilités offertes par les nouvelles technologies numériques, notamment le BIM, pour assurer une bonne gestion des aspects environnementaux liés à la biodiversité dans les infrastructures.

6 SYNTHÈSE DE L'ÉTAT DE L'ART

L'analyse de la littérature scientifique et des travaux récents révèle une émergence notable du monde du numérique dans les activités de conception et de gestion d'infrastructures. Le BIM, tel que défini par la norme ISO 19650 et le projet MINnD, dépasse la seule modélisation géométrique pour devenir un système d'information intégré, reliant conception, exploitation et maintenance. L'évolution du BIM – Infra vers le CIM s'accompagne d'une convergence croissante avec les outils SIG, favorisant le développement des jumeaux numériques de territoires capables de représenter dynamiquement les interactions entre infrastructures, milieux et biodiversité. Cependant, cette intégration se heurte encore à des difficultés d'interopérabilité sémantique, de normalisation des formats (IFC, CityGML) et de gestion des échelles spatiales.

Parallèlement, la dimension écologique et environnementale prend de plus en plus d'ampleur dans les projets d'infrastructure et d'aménagement territorial. L'approche métier de l'étude

écologique, encadrée par les normes NF X10-900 et NF X32-102, repose sur la séquence Eviter – Réduire – Compenser (ERC), qui vise à atteindre une non – perte nette de biodiversité. L'écologue, de concert avec les concepteurs, devient un acteur stratégique de cette dynamique, articulant savoir scientifique, réglementation et outils numériques. Le cadre réglementaire impose désormais une traçabilité rigoureuse et un suivi dans le temps des mesures environnementales, ouvrant la voie à une ingénierie écologique plus prédictive et mesurable.

Les initiatives de recherche et développement confirment cette tendance. Le projet MINnD a structuré la réflexion sur les échanges d'informations entre infrastructures et environnement, tandis que le programme BioBIM, porté par TerrOïko, a démontré la faisabilité d'intégrer la biodiversité dans la maquette numérique. À l'échelle européenne, le projet BISON a permis de renforcer la standardisation et la gestion des données écologiques dans le cycle de vie des infrastructures. En outre, la plateforme SimOïko développées par TerrOïko, illustrent la montée en puissance des outils numériques appliqués à l'écologie. SimOïko modélise la dynamique des populations et la connectivité écologique, tandis que des études menées en interne offrent un diagnostic quantifié de la « performance écologique » des sites. Ces outils matérialisent le passage d'une écologie descriptive à une écologie simulée et prédictive, capable d'éclairer les décisions d'aménagement en amont.

Ainsi, l'état de l'art que nous avons mené, met en évidence la convergence entre BIM, SIG et modélisation écologique comme levier pour évaluer la capacité des infrastructures et aménagements urbains à recevoir la biodiversité. Cette synergie annonce un changement de paradigme : les infrastructures ne sont plus envisagées comme de simples objets techniques, mais comme des systèmes vivants inscrits dans un territoire dynamique. Dans cette perspective, la mise en œuvre d'un processus BIM pour la biodiversité apparaît non seulement comme une innovation technologique, mais aussi comme une nécessité scientifique et opérationnelle pour concevoir, suivre et gérer des infrastructures véritablement durables.

CHAPITRE III : ELABORATION DU PROCESSUS BIM – SIG DANS LE PROJET

7 PHASE PRELIMINAIRE AU PROCESSUS

Comme indiqué dans le Chapitre introductif, la présente thèse professionnelle traite principalement du volet « Processus BIM » du projet OptiBioNum, financé par la Fondation FEREC et réalisé par TerrOïko en collaboration avec la Société des Grands Projets (SGP). Ce volet est consécutif à un autre dit « Volet écologique » qui s'est intéressé à l'ensemble des études et analyses relevant de l'approche métier de l'ingénieur écologue. Il s'est agi dans un premier temps de constituer les écotypes et le paramétrage de leur cycle de vie, données qui permettront par la suite de calculer les différents indicateurs. Ensuite, il a été question de mettre en place une méthodologie visant à réaliser un démonstrateur sur un cas concret. Ce démonstrateur permettra de calculer les indicateurs de « Performance écologique » à partir des résultats de simulation pour différents scénarios d'aménagement de Gares et Centres Techniques du réseau de transport du Grand Paris Express (GPE).

7.1 ETUDE ECOLOGIQUE

7.1.1 Cycles de vie des écotypes

7.1.1.1 Identification des espèces

Les cycles de vie des écotypes se construisent à partir des données de traits d'histoire de vie d'habitats des différentes espèces qu'ils représentent, dont la caractérisation passe inéluctablement par leur identification, puis le recueil des données y relatives. L'exploitation d'un inventaire complet des espèces animales présentes en France Métropolitaine établi à partir du TAXREF (Gargominy et al., 2021), en retenant les espèces présentant un statut biogéographique valide (Présent, Endémique, Introduit, Occasionnel, Subendémique, Cryptogène) extraits de ce référentiel. Un total de 176.352 espèces peut potentiellement être exploité pour constituer ces écotypes. Pour structurer cette diversité, les espèces ont été regroupées en six (06) sous-trames écologiques basées sur la typologie EUNIS : milieux boisés, milieux ouverts naturels, semi-ouverts, milieux humides, milieux agricoles et milieux urbains. Les quatre premières correspondent aux milieux naturels de la Trame Verte et Bleue, tandis que

la création des sous-trames agricole et urbaine répond aux enjeux spécifiques des espaces cultivés et fortement anthropisés. Ces sous-trames permettent d'associer chaque écotype à un ensemble cohérent d'habitats et donc d'espèces vivant dans ces milieux.

En raison de la disponibilité des données et leur intérêt pour la stratégie écologique visée, seuls certains groupes taxonomiques ont été retenus. Il s'agit des mammifères terrestres, des oiseaux, des reptiles, des amphibiens, des papillons et des abeilles sauvages.

7.1.1.2 Collecte des données

La collecte des données nécessaires à la construction des écotypes s'appuie à la fois sur une recherche bibliographique ciblée et sur la base interne de TerrOïko, qui rassemble depuis dix ans les traits d'histoire de vie d'environ 450 espèces déjà simulées. Cette base contient des informations complètes sur les cycles de vie (survie, fécondité), les capacités de dispersion (distances, probabilités selon l'âge et le sexe), les structures d'âge à l'équilibre et les préférences d'habitats, associées à des coefficients de perméabilité basés sur la classification EUNIS des habitats (Louvel et al., 2013). Le travail s'est par ailleurs concentré sur l'élaboration du cadre méthodologique en mobilisant des sources bibliographiques et des bases ouvertes permettant d'identifier rapidement les traits pertinents sans procéder à une collecte espèce par espèce.

L'objectif était de constituer une base suffisamment complète pour alimenter les simulations écologiques. Les traits retenus sont ceux les plus fréquemment disponibles dans la littérature scientifique : probabilité de survie annuelle des adultes (ou durée en vol et voltinisme pour les insectes), fécondité annuelle et distance maximale de dispersion. Cette démarche permet de structurer une base de données générique et réutilisable, en attendant l'intégration complète des données internes de TerrOïko lorsque celles-ci deviendront pleinement accessibles.

7.1.1.3 Construction des cycles de vie

Une fois la base de données des traits d'histoire de vie constituée, il a été identifié 70 guildes fonctionnelles représentatives de six (06) sous – trames sur lesquelles ont porté les travaux menés dans cette étude. Les traits moyens des écotypes ont ensuite été estimés par Analyse en Composantes Principales, en définissant pour chaque guildes un écotype virtuel correspondant au barycentre des espèces projetées dans l'espace factoriel, puis en reconvertissant ces coordonnées en valeurs biologiques. Les paramètres manquants (densités, survies, dispersion) ont finalement été complétés à partir de la base interne de TerrOïko et d'avis experts, permettant de constituer des écotypes cohérents et exploitables pour les simulations écologiques.

7.1.2 *Compilation de la carte d'occupation du sol et paramétrage des interactions des espèces avec la matrice paysagère*

Le développement du démonstrateur appliqué aux sites du Grand Paris Express s'appuie sur la production d'une carte d'occupation du sol couvrant l'ensemble du réseau. Cette cartographie, réalisée dans un périmètre de 5 km autour du tracé du GPE, a été élaborée sous un logiciel SIG (en l'occurrence QGIS) à partir des données de l'IGN et de l'Institut Paris Région, en suivant la procédure décrite par (Thierry et al., 2020) et reprise par (Calvet et al., 2020). Le traitement aboutit à une carte vectorielle caractérisant finement la structure du paysage en s'appuyant sur la nomenclature européenne EUNIS, offrant ainsi une base homogène et standardisée pour les analyses écologiques.

La simulation des déplacements des individus dans le paysage passe par l'élaboration d'une carte de résistance dérivée de la carte d'occupation du sol, à laquelle sont associés des coefficients de friction définis pour chaque code EUNIS. Ces coefficients, estimés selon la réduction relative des distances parcourables dans un milieu par rapport à un habitat favorable et selon les préférences écologiques des espèces, permettent de simuler les déplacements individuels dans le paysage. Parallèlement, les codes EUNIS correspondant aux habitats des espèces modélisées sont identifiés afin de cartographier les patchs d'habitats propres à chaque écotype. L'ensemble de ce paramétrage, réalisé en collaboration avec les modélisateurs de TerrOïko et fondé sur des valeurs déjà validées dans des études antérieures, s'inscrit dans la continuité des sous-trames écologiques définies précédemment.

7.2 SELECTION DES GARES ET CENTRES TECHNIQUES

7.2.1 *Constitution d'un gradient d'urbanisation sur la zone*

L'établissement d'un gradient d'urbanisation sur la zone du Grand Paris Express permettra par la suite de sélectionner des gares et centres techniques représentatifs de contextes paysagers contrastés, depuis les milieux ruraux jusqu'aux zones fortement urbanisées. Cette approche utilisée pour étudier l'influence des environnements urbains sur les espèces, offre un cadre pertinent pour analyser l'impact des scénarios d'aménagement dans des milieux soumis à des niveaux variables de pressions anthropiques, de fragmentation et de diversité d'habitats. L'analyse s'appuie sur la carte d'occupation du sol dont les codes EUNIS ont été regroupés en grands types cohérents avec les sous-trames (forêt, milieux ouverts, végétations humides, eau,

prairies, cultures, zones artificialisées, réseaux routiers et ferrés). La zone d'étude a été maillée en cellules hexagonales, au sein desquelles deux variables ont été calculées pour chaque type de milieu : la proportion d'aire occupée et la distance au milieu concerné. Différentes tailles de mailles ont été testées par Analyse en Composantes Principales (ACP) afin d'identifier celle maximisant la variance expliquée par le premier axe, interprété comme le gradient d'urbanisation.

Une fois la taille de maille optimale sélectionnée, les classes obtenues ont ensuite été positionnées le long du gradient d'urbanisation en les projetant sur le premier axe de l'ACP, ce qui permet de caractériser de manière cohérente la transition rural-urbain à l'échelle du territoire étudié. Les gares et centres techniques peuvent ainsi être sélectionnés en fonction de la classe paysagère à laquelle ils appartiennent, garantissant que les maquettes numériques et les simulations écologiques couvrent une diversité représentative de la structure paysagère rencontrée sur l'ensemble du tracé.

7.2.2 Choix des sites pilotes

Le choix des sites pilotes pour la réalisation du démonstrateur est guidé d'une part, par une analyse du gradient d'urbanisation. Ce gradient d'urbanisation se visualise sur la carte de la zone d'étude visible dans la figure ci – dessous, où les cellules sont colorées selon leurs coordonnées sur l'axe 1 de l'ACP. Il reflète le niveau d'artificialisation de la zone avec le centre (Paris et sa périphérie) très urbain, et des espaces agricoles et boisements principalement localisés au Nord-Est et au Sud-Ouest du territoire

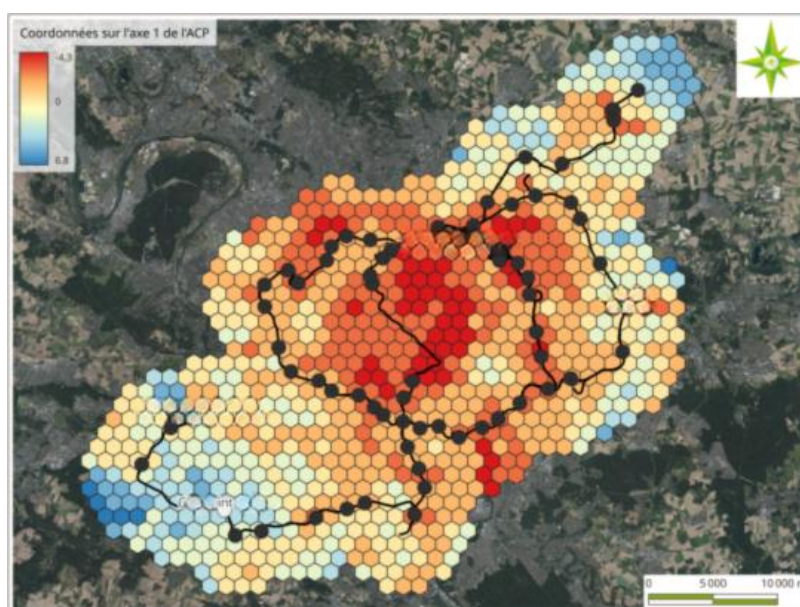


Figure 9 : Maillage hexagonal de côté 1250 m de la zone d'étude

L'analyse du gradient d'urbanisation (Figure 9) a permis de visionner les enjeux de chacun des sites afin de sélectionner ceux qui revêtent un intérêt particulier, soit du point de vue de leur localisation par rapport aux types d'habitats environnants, ou par les différents écotypes présents.

Il est à noter par ailleurs que la disponibilité des données SIG et des modèles BIM a joué un rôle majeur dans le choix. De ce fait, quatre (04) sites ont été sélectionnés : La gare de Saint Cloud, la gare de Clichy – Montfermeil, les Centres d'exploitation de Palaiseau et Champigny.



Figure 10 : Indication des équipements sélectionnés dans OptiBioNum

8 INTEGRATION BIM – SIG DANS LE PROCESS D’OPTIMISATION A L’ECHELLE DU SITE/BATIMENT

8.1 CONSTRUCTION DU CAS D’USAGE BIM

Le cas d’usage peut se définir comme étant le moyen par lequel le BIM est employé dans un projet / un processus, pour parvenir à l’atteinte d’un objectif préalablement défini (BuildingSmart International, 2025).

Mediaconstruct, « Chapitre » français de BuildingSmart International en charge du développement des pratiques BIM en France, a mis sur pied une liste de “Cas d’Usage BIM génériques”, qui s’étendent sur toute la durée du cycle de vie d’un ouvrage comme l’indique le tableau ci-dessous :

Tableau 6 : Les usages BIM selon les phases d'un projet, Mediaconstruct (2020)

Programmation		Conception		Construction		Exploitation/Maintenance	
Modélisation des données existantes							
Analyse des couts (Extraction des quantités, 5D)							
Planification 4D							
Programme							
Analyse du site							
		Revue de conception					
		Consolidation de la maquette numérique					
		Modélisation de la conception		Modélisation de réalisation			
		Modélisation des composants					
		Analyse énergétique d'exploitation					
		Modélisation analytique (structure, lumière, énergie...)					
		Performance environnementale (LEED, BREAM, HQE...)					
		Analyse d'éclairement					
		Production des livrables 2D					
		Classification (Codification)					
		Coordination 3D					
		Planification de chantier					
		Conception de systèmes de construction (Méthodes)					
		Préfabrication					
		Planification et contrôle 3D (géolocalisation opérationnelle)					
		Plateforme de gestion et de suivi sur site					
						Plan prévisionnel de maintenance	
	Cas d'usages primaires					Analyse systémique du bâtiment	
	Cas d'usage secondaires					Gestion des actifs	
						Gestion des espaces et occupation	
						Plan d'urgence et de sécurité	

Au regard des cas d'usage génériques mentionnés dans ce tableau, on constate qu'aucun d'eux ne rentre effectivement dans le cadre de notre projet. Il nous appartient alors de construire un cas d'usage spécifique en fonction de nos objectifs.

8.1.1 Objectif de l'étude

Dans un contexte marqué par la ferme volonté des pouvoirs publics, ainsi que des acteurs du monde de la construction, de réduire au maximum les impacts négatifs des ouvrages bâtis ou à bâtir sur l'environnement, ce projet de Recherche et Développement vise à **Optimiser la capacité d'accueil en Biodiversité dans les projets de bâtiments et infrastructures**.

8.1.2 La dualité BIM – SIG dans le projet

Dans le domaine de l'ingénierie écologique, les SIG (Systèmes d'Information Géographiques) sont d'une grande utilité tant au niveau de la localisation des espèces (Végétales et animales), que dans leur caractérisation. En plus des données cartographiques, les modèles SIG peuvent contenir un ensemble d'informations sur la nature des espèces, leurs regroupements et flux de migration, ainsi que leurs quantités.

Le BIM (Building Information Modeling / Model / Management) pour rappel, est un ensemble de processus, d'outils, et de méthodes centrées sur le travail collaboratif (entre acteurs intervenant dans le cadre bâti) autour d'une maquette numérique (modèle). Cette maquette est en réalité la représentation virtuelle de l'ouvrage projeté ou construit, permettant entre autres de mieux appréhender les incidences du projet et gérer en amont les éventuels conflits. Il permet également de guider les concepteurs dans l'arbitrage des solutions techniques et conceptuelles nécessaire en vue d'améliorer la qualité et la performance du projet.

Cette dualité SIG – BIM est un élément fondamental dans l'atteinte de notre objectif final, en ce sens où le SIG pourrait être une passerelle permettant de transposer de manière efficace, les données environnementales (géographie, morphologie de site, information sur les espèces, etc.) dans les maquettes numériques de projets.

8.1.3 Usage BIM - SIG

L'idée de l'étude étant de parvenir à une optimisation de la capacité d'accueil de la biodiversité dans les projets de construction, l'utilisation du BIM – SIG permet de réaliser des simulations numériques à travers la modélisation de plusieurs variantes d'aménagement d'un même projet. Ces scénarios de conception intégrant BIM et SIG fourniront les données nécessaires au calcul d'indicateurs écologiques dans le simulateur de TerrOïko, en vue d'en comparer les résultats et choisir celui présentant les meilleures performances.

Le processus mis en œuvre fait appel à deux (02) expertises – métier principales, à savoir l'ingénierie écologique et la coordination BIM, avec des niveaux d'intervention spécifiques tel que schématisé ci – dessous :

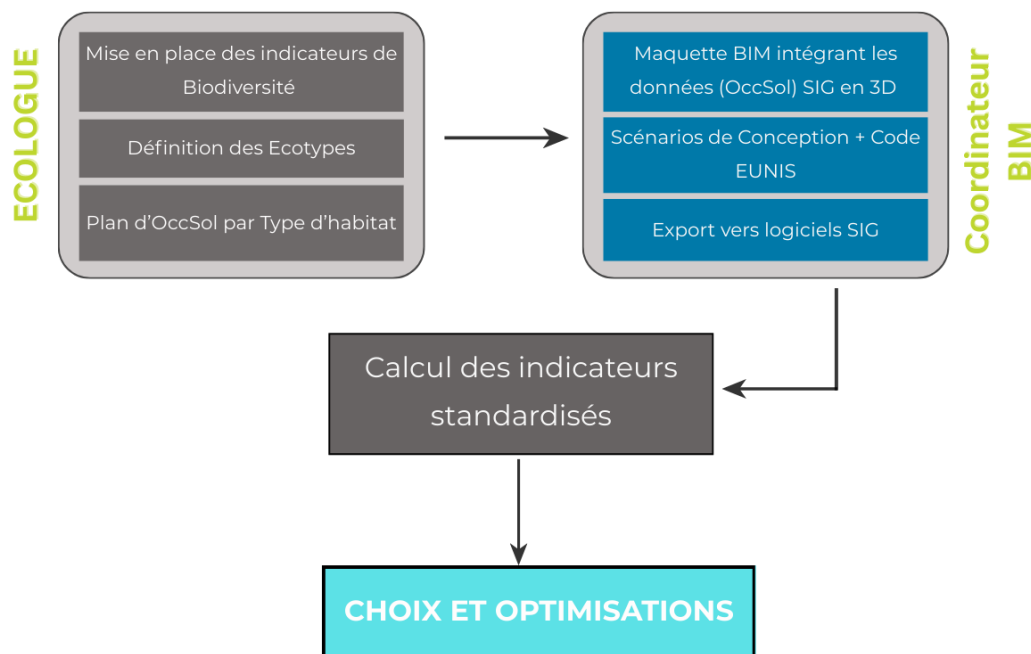


Figure 11 : Schéma structurel des étapes du processus BIM – SIG pour l'intégration de la biodiversité, (S. Jonathan TOURE, 2025)

Le processus se structure donc en trois (03) étapes majeures :

8.1.3.1 Etape 01 : Préparation des données écologiques

Cette étape est prise en charge par l'**Ingénieur écologue**, et regroupe l'ensemble des activités décrites à la section 7.1 ci-dessus. Il s'agit de :

- La mise en place des indicateurs de biodiversité ;
- La définition des écotypes ;
- La création d'un plan d'occupation de sol à partir des données parcellaires obtenues à partir des différentes bases de données nationales, mais aussi locales, en fonction de leur degré de fiabilité. Ce plan définit de manière claire et précise, les différents objets et parcelles susceptibles de d'abriter ou d'impacter le mode de vie des espèces présentes. Ainsi chaque bâti ou parcelle, est décrit sa forme géométrique en plan, par des attributs mais aussi par des attributs spécifiques suivants :

Tableau 7 : Liste des attributs des bâtis/parcelles de l'Occupation du Sol
(S. Jonathan TOURE, 2025)

ITEM ATTRIBUT	DEFINITION	EXEMPLE
fid	Identifiant unique de l'objet à l'intérieur du logiciel	13332
idObjet	Identifiant du type d'habitat dans la base de données interne de TerrOïko	TER_HAB_1318090
Nature	Nature du type d'habitat EUNIS pour chaque objet/parcelle	Bâtiment
Notes	Précision sur la nature de l'habitat	Industriel, agricole, commercial...
CD_EUNIS	Code basé sur la classification des habitats EUNIS (Louvel et al., 2013)	J0
LB_Habitat	Spécification de la base de données d'où sont extraits les données sur l'habitat	Bâti exclusif des villes et villages
idSource	Identifiant de la source des données parcellaires	11451159
Source	Source de données parcellaires	BD Topo
Producteur	Nom de la personne ayant réalisé le plan d'Occupation du sol et saisi les attributs	TERROIKO_LMHI
Validite	Date de finalisation du plan	2025-03-12

8.1.3.2 Etape 02 : Manipulations SIG – BIM

A cette étape, le **Coordinateur BIM** de l'équipe, se charge de réaliser les différentes opérations servant à fusionner la maquette BIM du projet de construction (Bâtiments et/ou infrastructures) et la représentation SIG de la zone d'étude prise en compte dans le projet. La finalité est d'obtenir une maquette fédérée SIG – BIM dans un même environnement 3D, et présentant aussi bien les parcelles, leurs attributs tels que définis dans le plan d'occupation du sol, que la morphologie (relief) du site et l'enveloppe externe des bâtiment et/ou infrastructures.

Une fois la maquette fédérée obtenue dans l'environnement d'édition 3D, il procède au design des différents scénarios de conception selon les hypothèses et orientations prises de concert avec les autres intervenants du projet.

Ces différentes maquettes SIG – BIM serviront par la suite de sources de données pour alimenter le démonstrateur de simulation écologique.

8.1.3.3 Etape 03 : Calcul des indicateurs

Il sera fait par l'ingénieur écologue du projet selon le processus déjà en place au sein de TerrOïko. Les mêmes données de chaque variante de maquettes SIG – BIM seront utilisées pour calculer les indicateurs standardisés présentés dans la section **5.2.2 ci-dessus**.

8.1.3.4 Etape 04 : Choix et optimisations

Il s'agit à cette dernière étape, d'évaluer les avantages et inconvénients de chacune des variantes afin de choisir celle qui est « écologiquement plus performante ». Ce choix sera basé sur les résultats des différentes simulations réalisées à l'étape précédente. A cet effet, une matrice comparative pourra être établie, afin de mettre en parallèle les performances (quantitatives et qualitatives) des variantes, selon les indicateurs pris en compte. La variante qui sera choisie en bout de chaîne pourra être améliorée selon tout ce processus décrit plus haut, grâce à des stratégies d'optimisation proposées par les écologues, en agissant directement sur les indicateurs qui seront jugés « défaillants ».

8.1.4 *Modalités de collaboration et gestion de la donnée*

L'objet de cette étude appelle, dans sa mise en application, des acteurs issus de corps de métier différents, avec une importante quantité de données à mettre en synergie. Cette panoplie d'acteur et de données nécessite une gestion efficiente et rigoureuse, avec un processus de collaboration connu d'avance. Pour ce faire, cette collaboration s'appuie sur un Environnement Commun de Données (CDE), qui constitue une plateforme centrale de gestion, de partage et de transmission des données d'entrée et des livrables à chaque étape du processus. Ce CDE est utile pour assurer :

- La transmission des maquettes numériques BIM depuis le bureau d'étude BIM vers le Maître d'Ouvrage, qui à son tour les transmet au coordonnateur BIM chargé du processus SIG – BIM ;
- L'interaction entre les différents acteurs sur une plateforme unique ;
- La soumission des maquettes fédérées aux ingénieurs écologues pour la réalisation des simulations ;
- La transmission des livrables d'étape et des livrables définitifs pour validation par les acteurs concernés ;
- La revue collaborative (Commentaires, annotations, BCF), puis l'acceptation ou la demande de révision ;
- La gestion des autorisations et des accès sur les documents partagés ;

- L'élaboration et le suivi du planning d'exécution des tâches et de transmission des livrables ;
- L'historisation des échanges, des variantes et des modifications selon une hiérarchisation prédéfinie, pour parvenir à une meilleure traçabilité des données.

La plateforme collaborative est mise sur pied au sein du Bureau d'ingénierie écologique qui concentre l'essentiel des activités liées au processus. Cependant des accès sont ouverts aux autres acteurs en fonction de leur niveau d'implication.

Le Maître d'ouvrage bénéficie de tous les accès aux fichiers produits ou transmis par les différents intervenants, avec possibilité d'y annoter des commentaires. Les accès et restrictions sont fixés d'un commun accord en début de projet, pendant la mise en place de la plateforme collaborative.

8.2 SPECIFICATION DES DONNEES D'ENTREE

Le présent processus nécessite la mise en place et/ou la mise à disposition de certaines données spécifiques BIM et SIG qui seront préparées, fédérées et serviront de base pour la réalisation des simulations. L'idée de départ, qui est le fil conducteur de notre démarche, est d'élaborer un processus totalement ouvert (Open SIG – BIM) avec des outils libres d'usage. Ce postulat de départ a été choisi dans le but de rendre la démarche accessible et aisément applicable dans différents contextes.

8.2.1 Maquette SIG du site

L'objectif de cette partie est d'aboutir à la création d'une maquette SIG en 3D du site considéré pour l'étude écologique. Cette maquette devra contenir les données de relief ainsi que celle des différentes parcelles écologiques que contient ce site, tel que décrit au point 8.1.3.2. De ce fait, il est nécessaire de se baser sur des données et logiciels assurant un géoréférencement précis, par rapport à un Système de Coordonnées de Référence (SRC) usuel, en l'occurrence le LAMBERT – 93 pour la France.

8.2.1.1 Constitution d'un MNT 3D

Plusieurs moyens sont possibles en fonction du lieu d'implantation du projet :

❖ **OPTION 1 : à partir des données de l'IGN**

L'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) est l'organisme public en France qui est chargé de produire, entretenir et mettre à disposition les informations géographiques de référence et de permettre leur usage simplifié. Ainsi cet organisme produit entre autres, et de façon continue, des Modèles Numériques de Terrain (MNT) regroupant des données topographiques et altimétriques de toute la France en les classifiant par territoires ou portions de territoires, et les met à disposition sur son site internet.

- **Première étape : Récupération des données sur le site de l'IGN**

Deux (02) types de MNT s'offrent à nous :

- Le BD Alti (Base de Données Altimétriques) : C'est un ensemble de données issues principalement de la photogrammétrie et la numérisation des courbes de niveau des cartes topographiques qui sont des modes traditionnels d'acquisition de données. Son niveau de détail est à **25m** de résolution avec une précision altimétrique qui varie très fortement de **2m** à **20m**, dépendamment du territoire où l'on se trouve ;
- Le RGE Alti (Référentiel à Grande Échelle Altimétrique) : Il est quant à lui, un ensemble de données acquises par la conjugaison de moyens d'acquisition modernes dont le LiDAR (Light Detection and Ranging) aéroporté, la corrélation d'images aériennes et les Radars dans le cas des hauts reliefs enneigés. Il offre deux niveaux de résolution, l'un à **1m** et l'autre à **5m** et une précision allant de **0,2m** à **0,7m** dépendamment du moyen d'acquisition et de la complexité du relief.

Dans la suite du processus, nous opterons pour le **RGE Alti – 5m**, qui semble plus avantageux en termes de quantité de “dalles” à exploiter, et suffisamment précis pour le niveau d'information nécessaire dans le cadre de notre étude.

- **Deuxième étape : Agrégation des MNT**

Après avoir téléchargé les données des départements sur lesquels se déploie notre site via les liens disponibles sur le site de l'IGN, l'on constate une multitude de “dalles” correspondant à des morceaux de chaque département. Pour obtenir des MNT entiers de chaque département, il est utile de procéder à l'agrégation de ces “dalles” selon un processus fiable et qui maintient correctement leur géoréférencement.

Ainsi nous proposons la méthode suivante (**Exemple pour le département 94**) :

- Créer un dossier **RGE_Alti_94** sur le Bureau, et regroupant les différents fichiers **asc** contenus dans le dossier téléchargé ;

- Télécharger et installer GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) disponible pour les systèmes d'exploitation Windows, Linux et MacOS ;
- A partir d'un Terminal (invite de commande sur Windows), créer un VRT (Virtual Raster Tile) en exécutant :

~/Bureau/RGE_Alti_94	\$	gdalbuildvrt	departement_94.vrt	*.asc
Chemin d'accès des fichiers		Commande de création du fichier	Nom du VRT à créer (.asc pour sélectionner tous les ASC du dossier)	

Un fichier XML est alors créé dans le dossier indiqué au nom **departement_94.vrt** et référence toutes les dalles ASC.

Le cas échéant, vérifier la présence effective de toutes les dalles en inscrivant le script :

Cat departement_94.vrt : Des balises XML mentionnant chacun des fichiers ASC seront mentionnées ;

- Pour générer un fichier ASC unique représentant l'ensemble du département, lancer la commande suivante dans le même dossier :

gdal_translate	-of	AAIGrid	departement_94.vrt	departement_94.asc
Convertir la spécification en un nouveau fichier au format ASC (ESRI ASCII Grid)		Spécification du fichier .vrt à convertir (Fichier source)	Nom du fichier ASC final	

Il est également possible de convertir le VRT en fichier GeoTIFF en faisant :

gdal_translate	-of	GTiff	departement_94.vrt	departement_94.tif
Convertir la spécification en un nouveau fichier au format .tiff (GeoTIFF)		Spécification du fichier .vrt à convertir (Fichier source)	Nom du fichier GeoTIFF final	

Le MNT du Département 94 est alors créé dans le dossier source au format ASC ou GeoTIFF.

L'opération peut être reprise autant de fois que nécessaire pour les autres départements.

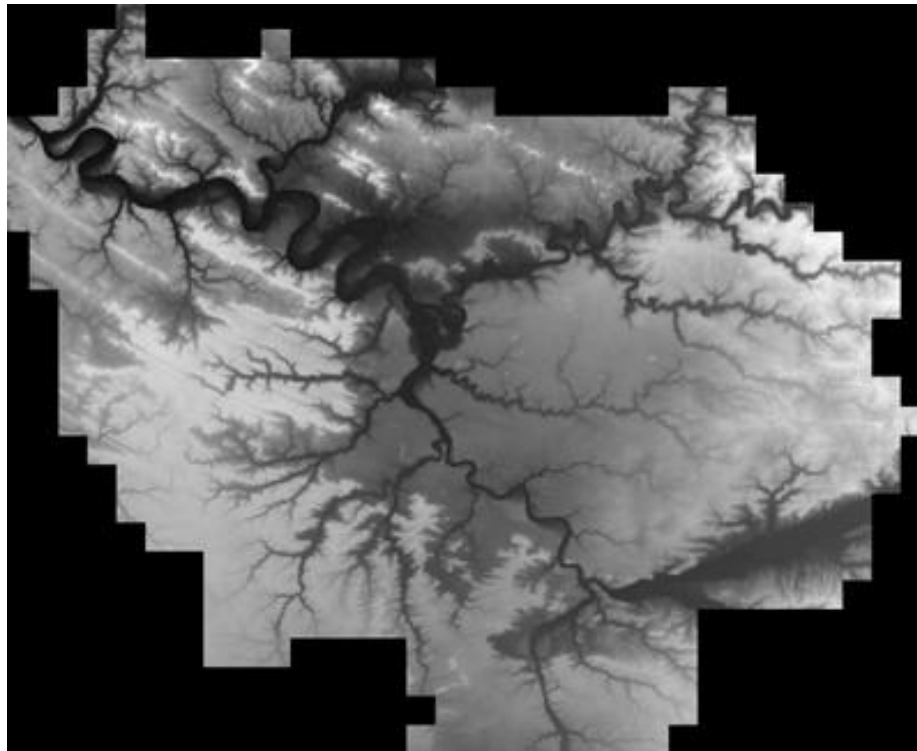


Figure 12 : Raster du MNT reconstitué sur toute l'Ile-de-France

Le même process a été observé pour l'agrégation des MNT de chacun des huit (08) départements à savoir Paris (75), les Hauts-de-Seine (92), la Seine-Saint-Denis (93), le Val-de-Marne (94), la Seine-et-Marne (77), les Yvelines (78), l'Essonne (91) et le Val-d'Oise (95), afin de constituer un MNT global de toute notre ZEE qui est répartie sur tout ce territoire.

- **Troisième étape : Conversion du MNT en 3D**

Cette dernière étape de création du MNT consiste à faire en sorte de le visualiser en 3D ainsi qu'à lui donner des attributs IFC, pour le rendre conforme aux prochaines manipulations qui seront faites dans les logiciels BIM. Pour ce faire, nous avons opté d'utiliser le logiciel **Blender** qui dispose, en plus sa gratuité illimitée, a l'avantage de traiter aussi bien les objets BIM que les objets SIG. Ainsi, le processus de passage du MNT raster vers le MNT 3D est le suivant :

- Préalable : Télécharger et installer les extensions nécessaires dans Blender. Il s'agit dans un premier temps de BlenderGIS pour assurer l'importation du raster dans Blender, et dans un second lieu de Bonsai (Anciennement BlenderBIM) pour faire la conversion SIG vers BIM ;
- A travers l'extension BlenderGIS, importer le raster du MNT au format TIF en choisissant l'option « **Georeferenced Raster** », en paramétrant le mode d'importation tel que présenté sur la figure ci – dessous.

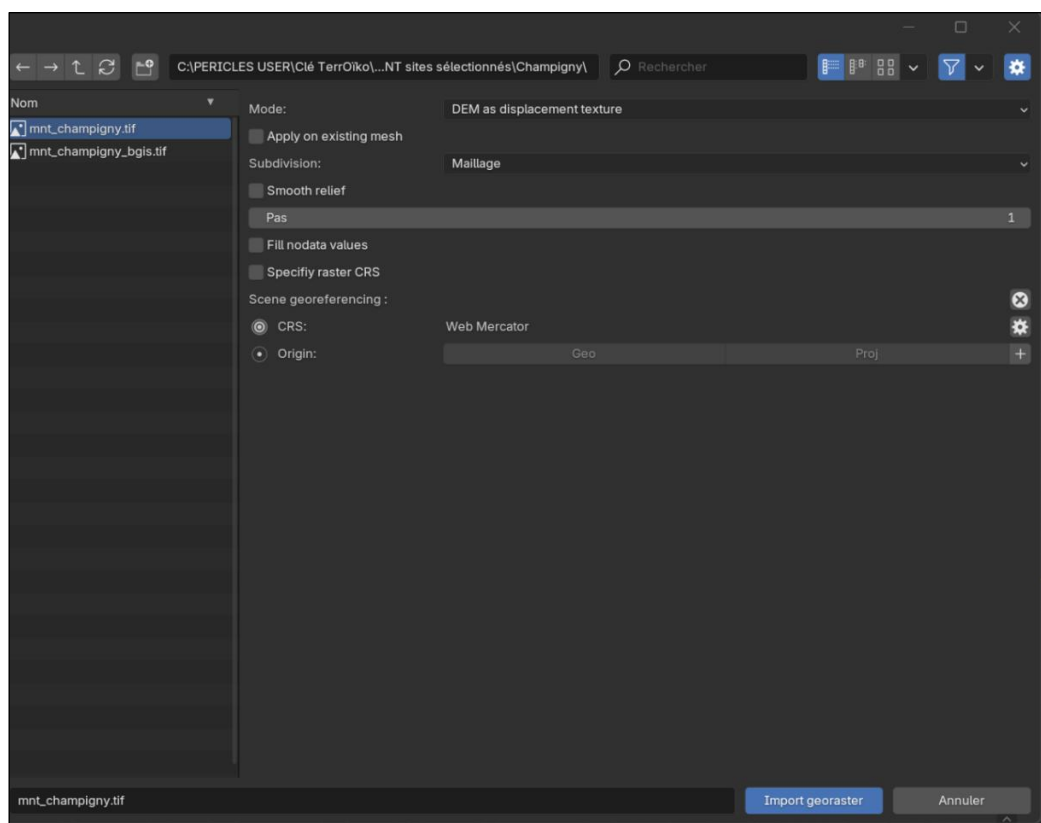


Figure 13 : Paramétrage du MNT dans Blender via BlenderGIS

- Une fois le modèle importé, l'on procède à sa conversion en IFC grâce à l'extension Bonsaï (BlenderBIM), en y assignant une classe IFC.

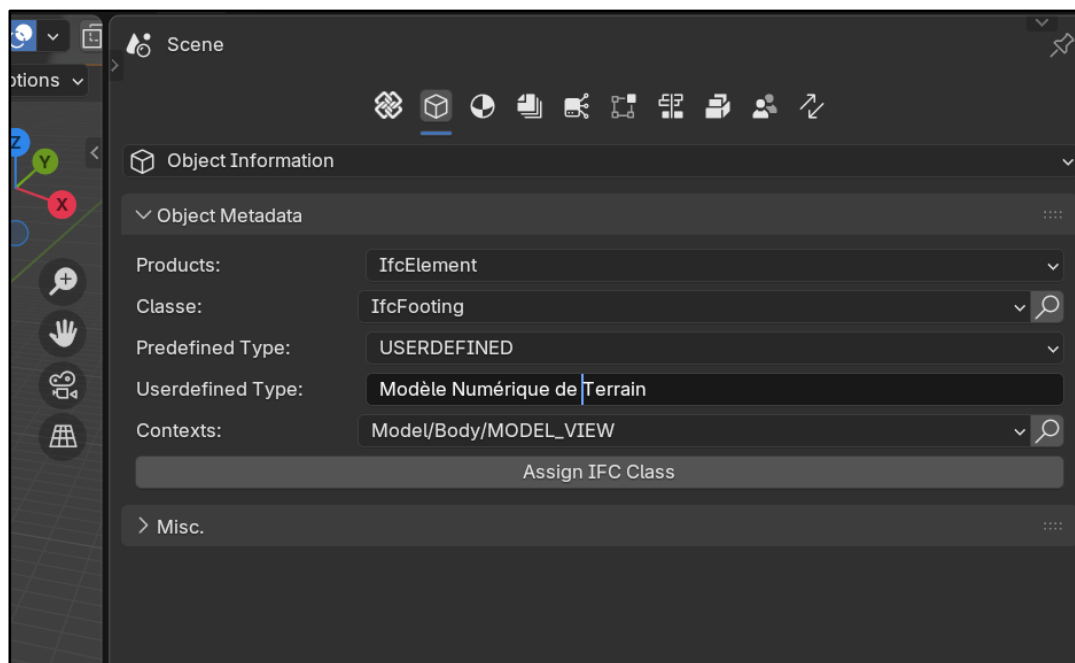


Figure 14 : Paramétrage pour l'assignation des attributs IFC dans Bonsaï

La Classe IfcSite n'étant pas disponible dans Blender, nous avons délibérément opté d'y assigner la classe « **IfcFooting** » car les objets de cette classe ne seront pas utilisés lors des manipulations de la maquette BIM du projet. Après inséré ces paramètres, un fichier IFC est créé et peut être utilisé dans tout logiciel capable de gérer des fichiers IFC.

Les trois (03) étapes décrites ci – dessus constituent un processus totalement ouvert permettant d'utiliser des données officielles et libres d'accès pour la réalisation du MNT 3D. Cependant, il est exclusif à tout projet étant implanté en France métropolitaine. Le même processus peut être réalisé pour tout projet (même hors France métropolitaine). Il s'agira de ce fait pour les chargés de projets de mettre en œuvre un relevé LiDAR spécifique pour le projet afin de constituer le MNT raster et suivre le processus décrit.

❖ **Option 2 : A partir des données satellitaires**

Afin de parer à la limitation spatiale de notre processus, due à l'absence des données de l'IGN hors de la France métropolitaine, l'alternative est de se rabattre sur l'acquisition des données satellitaires SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Ces données sont en effet issues de campagnes d'observation menées par la NASA et la NGA. Elles couvrent environ 80% des terres émergées sur toute l'étendue du globe, offrant ainsi une possibilité étendue d'obtention d'un MNT, peu importe la zone d'implantation du projet. Cependant, la résolution des données ouvertes au grand public peut être jugée très moyenne, allant de **25m** à **30m**.

L'importation de ces données se fait également à partir de l'extension BlenderGIS dans le logiciel Blender.

- **Première étape : Création du MNT 3D**

A partir de cette extension, choisir les options « **Web Geodata** » puis « **Basemap** ». Cette manipulation renvoie automatiquement vers une carte interne à partir de laquelle l'on peut retrouver son site en y insérant les coordonnées satellitaires (Latitude, Longitude) d'un de ses points. En revanche, il n'est pas possible de délimiter exactement le site à partir de cette méthode. Il est recommandé de « capturer » une zone suffisamment étendue pour se rassurer qu'elle contienne effectivement l'emprise du projet.

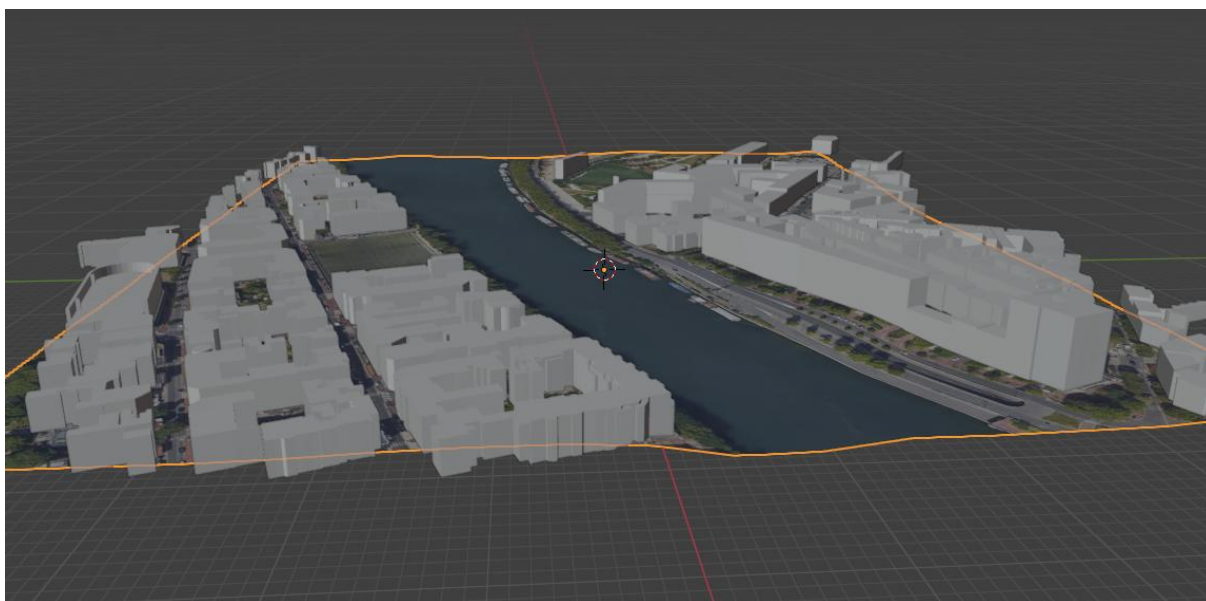


Figure 15 : Vue d'un MNT obtenu à partir des données SRTM

Il est tout de même possible, à partir de l'option « Web Geodata » puis « Get OSM » de rajouter au MNT, les modèles d'élévations des bâtiments depuis la base de données d'*OpensStreetMap*.

- **Deuxième étape : Exportation au format IFC**

Cette deuxième et dernière étape permet d'assigner à l'objet chargé, une classe IFC afin de l'exploiter dans les plateformes de visualisation et d'édition BIM. Le processus est le même que celui décrit en fin de troisième étape de l'option 1, et l'assignation de la classe IFC se fait comme indiqué à la Figure 14 : Paramétrage pour l'assignation des attributs IFC dans Bonsaï

8.2.1.2 Création d'un modèle IFC des parcelles de l'OccSol et Fusion avec le MNT 3D

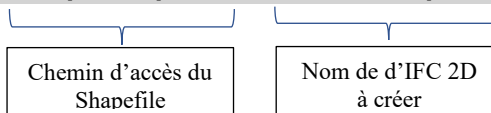
L'occupation de sol réalisé par l'ingénieur écologue est une donnée fondamentale car elle renseigne sur la nature et la classification EUNIS des différentes parcelles qui composent la zone d'étude. Le protocole BIM que nous avons pu mettre en place nécessite de disposer de cette occupation des sols en format IFC afin de permettre sa superposition et son adaptation au MNT créé à l'étape précédente.

De concert avec l'équipe de développeurs, et se basant sur les recommandations obtenues dans l'*IfcOpenShell*, un utilitaire **Python** a été créé et séquencé en deux (02) étapes :

- Installation l'add – on « **anaconda** » dans son outil python à travers le code :

```
conda env create -f environment.ymlconda activate IFC
```
- Lancement du script de conversion du **Shapefile** de l'occupation de sol, en un fichier IFC 2D :

```
python./shp_to_ifc.py -s <shapefile_path> -o <ifc2D_out_path> --raw
```

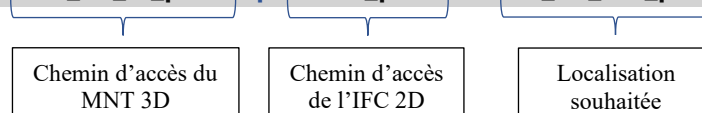


Lors du lancement de ce script, il est demandé d'intégrer la table de correspondance à utiliser pour définir le pack de couleurs des polygones représentant chaque parcelle. Ces colories sont issues de la codification EUNIS. Cette action est réalisée grâce à un module que nous avons créé, et qui permet d'extraire les couleurs d'un fichier **QML** depuis QGIS en utilisant « **PyQGIS** ». Ce module utilise les APIs QGIS natives pour parser les fichiers QML et extraire automatiquement les associations Valeur – Couleur. Les couleurs étant paramétrées, la création du fichier IFC 2D s'achève. On obtient un fichier IFC pouvant être ouvert et manipulé dans tout logiciel BIM. C'est un « objet plat » composé des différentes parcelles d'occupation de sol représenté par des polygones coloriés en fonction de leur type d'habitat EUNIS. Pour chaque parcelle, on y retrouve les valeurs des attributs issus des tables attributaires de parcelles précédemment paramétrés dans le shapefile de l'occupation de sol (tel que détaillé dans le Tableau 7 : Liste des attributs des bâtis/parcelles de l'Occupation du Sol présenté plus haut), transformés en **Psets** dans le fichier IFC.

Une fois le fichier IFC 2D créé, celui – ci doit être fusionné, au fichier IFC du MNT 3D créé au point 8.2.1.1 pour obtenir la maquette SIG en 3D, objet des différentes manipulations décrites dans cette partie. Cette fusion doit être faite en projetant les objets de l'IFC 2D (Parcelles de l'OccSol) sur le relief du site à travers le MNT 3D.

Pour ce faire, un nouvel utilitaire **Python** a été créé et amélioré après plusieurs tests successifs afin d'en garantir sa viabilité :

```
python ifc_elevation_mapper.py -e <ifc_3d_in_path> -p <ifc2D_path> -o <ifc_3d_out_path>
```



Le fichier IFC généré à partir de cet utilitaire constitue notre maquette numérique SIG 3D. Il regroupe l'ensemble des parcelles de la zone d'étude, avec leurs attributs spécifiques (Psets), et est suivant correctement le relief de notre terrain. Cette maquette contient donc l'ensemble des informations géométriques, numériques et alphanumériques nécessaires pour réaliser les simulations.

Nota : Le corpus (code) intégral de chacun des utilitaires créés et présentés dans cette partie, sera ajouté à l'*Ecological Engineering Studio* (EES), plateforme qui regroupe l'ensemble des outils et utilitaires développés par TerrOïko.

8.2.2 *Maquette BIM de référence*

La réalisation de cette étude nécessite la mise à disposition d'une maquette BIM que nous avons appelée « Maquette BIM de référence ». Cette maquette est issue de la mise en commun des différentes maquettes métier construites par les bureaux d'étude, idéalement lors des phases d'Avant – Projet. Elle servira de base pour la réalisation des différentes variantes de conception qui feront l'objet par la suite des simulations.

Cette maquette est fournie soit par le maître d'ouvrage, ou par l'entreprise (ou le bureau d'étude) désignés par ce maître d'ouvrage pour assister l'équipe écologique à la réalisation de son étude.

8.2.2.1 Format de fichier

La maquette BIM de référence doit être exploitable dans tout logiciel spécialisé dans la manipulation de maquettes BIM. De ce fait, nous avons recommandé le format IFC qui est commun à l'ensemble des logiciels de conception et de modélisation dans le Génie civil. La version IFC 2X3 semble la plus appropriée car l'ensemble des logiciels du marché dispose d'une certaine maturité pour exploiter convenablement cette version. Cela rentre en conformité avec la vision que nous avons donné dans notre projet de R&D, et qui consiste à mener un processus totalement « Open BIM » de bout en bout.

8.2.2.2 Contenu et niveau de détail

Cette étude vise à mesurer les impacts des constructions sur la vie et la survie de la biodiversité. Ainsi, certaines données de conception de ces ouvrages sont importantes. Nous avons opté de nous limiter aux maquettes métier qui seront exploitées dans l'optique des simulations. Il s'agit des maquettes des corps d'état susceptibles d'impacter la forme du bâtiment ou de l'infrastructure. Il s'agit entre autres de :

- L'enveloppe extérieure : Elle est constituée des éléments permettant de définir l'emprise des ouvrages. Elle contient les éléments de façades, les accroches, les menuiseries/Vitreries, les revêtements et tout autre élément visible à l'extérieur de

l'ouvrage. Une simple représentation en LOD 200 (Géométrie sommaire + nature des matériaux) peut permettre de différencier les fonctions écologiques ;

- Aménagements extérieurs, intégrant les espaces carrossés, végétalisés, ainsi que les niveaux de plateformes (Terrassements) du projet ;
- La structure. Dans certains cas, elle joue un rôle important car constituant le squelette même de l'ouvrage ;
- Les données d'éclairage extérieur du site avec l'indication des points lumineux, et les caractéristiques de luminescence (flux lumineux en l'occurrence). Ces informations rentrent notamment dans le cadre du calcul des indicateurs de « Quiétude » ;
- Les données brutes de nuisances sonores (Carte de bruit) à l'échelle de la zone d'étude.

8.2.2.3 Maquette fédérée

L'ensemble des maquettes et informations citées ci – dessus seront fédérées en un seul modèle qui constituera notre maquette BIM de référence. Il est recommandé que cette maquette soit débarrassée de toute fioriture, pour ne garder que les éléments essentiels à la simulation. Nous recommandons que la taille du fichier IFC fédéré n'excède pas les 300 Mo afin de pouvoir être lu et exploité par des matériels de moyennes performances (ordinateurs, serveurs, etc.). A défaut, et comme on en rencontre souvent dans les maquettes BIM, il est possible à partir de certains logiciels, de disposer un fichier central auquel on pourrait greffer les autres maquettes métier par des liens d'itération, et dans un processus collaboratif. Des revues de maquette sont à envisager, afin de permettre d'améliorer la qualité de cette maquette de référence.

8.3 PROCESSUS DE SIMULATION

La simulation écologique qui fait l'objet de cette étude est basé sur un processus d'échange de données qui obéit à des échanges de données précises dans le cadre d'une collaboration multi – acteurs. Après avoir caractérisé les données d'entrée, nous pouvons établir une structure fonctionnelle du processus qui permettra par la suite de décrire chacune des activités menant à l'atteinte de nos objectifs.

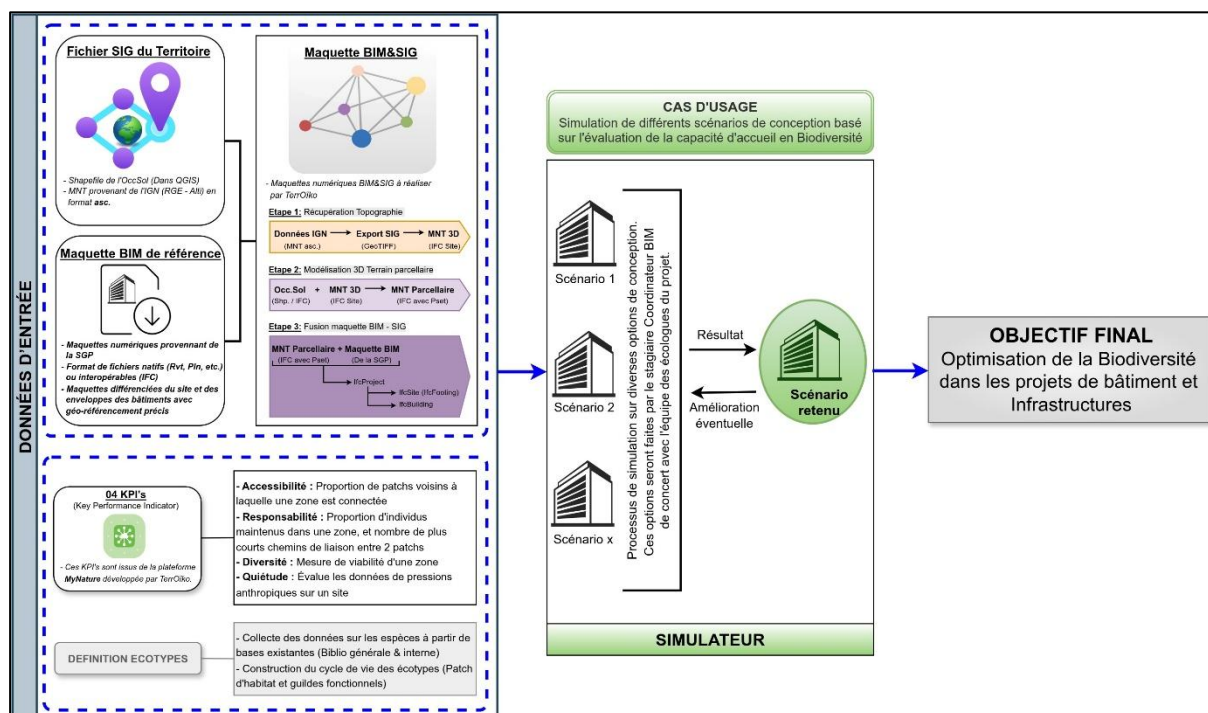


Figure 16 : Schéma de la structure fonctionnelle du Processus de simulation

Le schéma ci – dessus présente de manière sommaire l'ensemble des travaux à mener dans le cadre de nos Cas d'Usage BIM, qui est la simulation de différents scénarios de conception basés sur l'évaluation de la capacité d'accueil en Biodiversité des ouvrages. La définition des données d'entrée, qu'elles soient techniques (Maquettes SIG 3D du territoire et Maquette BIM de référence), ou conceptuelles (Indicateurs de performance écologique), permet de procéder à la phase de simulation à partir de différents scénarios de conception.

8.3.1 Processus de scénarisation

Il est entendu par « Scénarisation » dans notre cas, la mise en œuvre de plusieurs variantes de conception d'un même projet, afin d'en effectuer les différentes simulations écologiques pour le calcul des indicateurs de performance.

8.3.1.1 Maquette BIM – SIG de base

Il s'agit d'un modèle numérique réunissant la maquette BIM de référence et la maquette SIG 3D présentées et décrites au point 8.2. Cette maquette BIM – SIG peut être fédérée directement dans un même fichier au sein d'un logiciel de CAO/DAO (exemple : Revit, ArchiCAD, Blender). Cependant, compte tenu de la taille de la maquette SIG 3D, et même de la maquette BIM de référence qui peuvent être souvent très élevées, il est recommandé de fédérer ces

maquettes en connectant des liens à un modèle central. Ainsi, les modifications à faire pour chaque scénario de conception peut être faites indépendamment et de manière plus fluide.

8.3.1.2 Proposition de scénarios de conception

Cette partie consiste à élaborer différentes variantes d'aménagement favorables à la biodiversité, en allant de la maquette numérique BIM – SIG de base. Ces variantes sont basées sur la scénarisation de stratégies d'aménagement, sur et autour des ouvrages contenus dans la maquette BIM de référence, qui pourraient intégrer des enjeux pertinents quant à la préservation de la biodiversité.

Ces variantes de conception doivent être le fruit de réflexions collaboratives entre tous les acteurs impliqués, et se faire à partir d'hypothèses provenant de benchmarking et retours d'expériences sur des projets existants. A cette étape, un important effort de recherches bibliographiques sur les aménagements urbains répondant aux besoins de groupes d'espèces particuliers (les guildes fonctionnelles construites). Les pistes pour un urbanisme écologique présentées par (Clergeau, 2020) et (Catalano et al., 2021b) entre autres, peuvent être explorées. Cependant, il serait nécessaire de limiter les variantes de conception en choisissant pour chacune d'entre elle, des dispositions d'aménagement hypothétiquement pertinentes pour atteindre les performances recherchées, en agissant sur la structure et la forme des ouvrages, le type de végétation à envisager, les systèmes et appareils d'éclairage, etc.

Les nouveaux scénarios d'aménagement sont mis en œuvre par le Coordinateur BIM du projet et revus/validés par les ingénieurs écologues et le Maître d'ouvrage selon le processus décrit dans la figure ci-dessous.

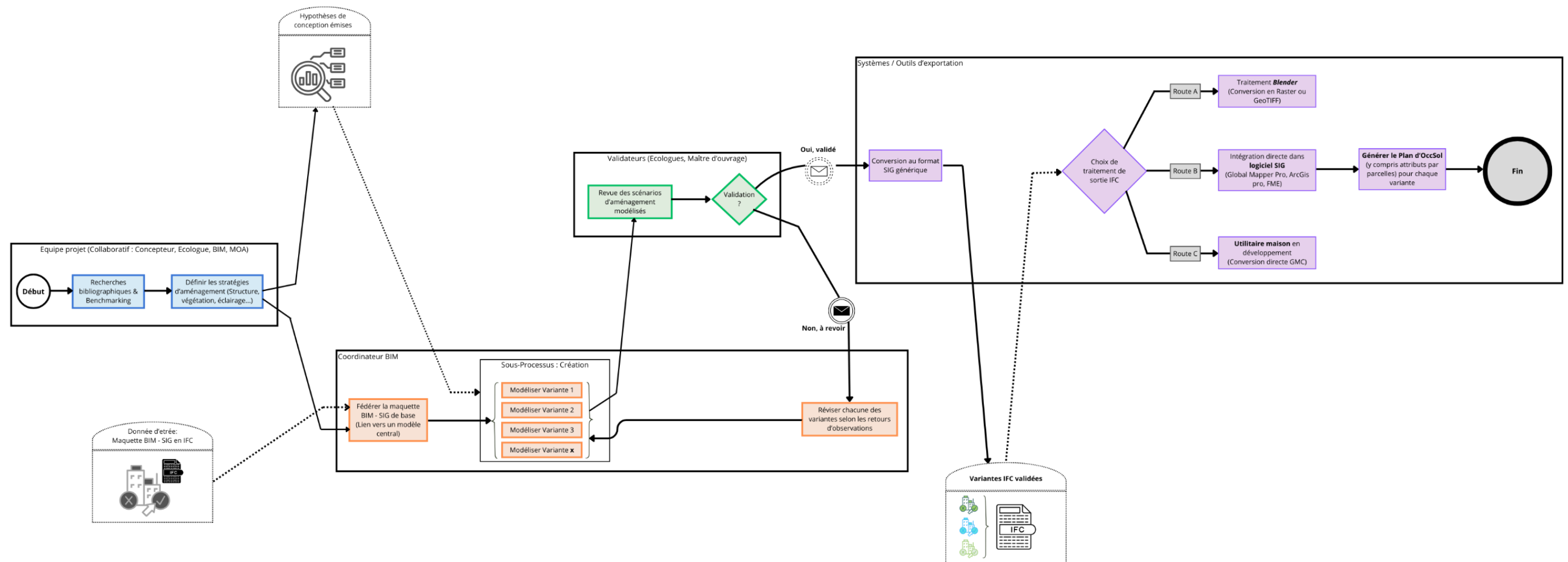


Figure 17 : Processus de mise en œuvre des variantes d'aménagement

- ❖ **Phase de Stratégie et Collaboration (Amont)** : Le processus commence par une réflexion intellectuelle collective. L'équipe projet (incluant les écologues et le Maître d'ouvrage) effectue d'abord des recherches bibliographiques et analyse des retours d'expérience (benchmarking) pour définir des stratégies de biodiversité précises (gestion de la lumière, types de végétaux, formes des ouvrages). C'est ici que sont posées les hypothèses qui guideront la modélisation des variantes ;
- ❖ **Phase de Production BIM (Phase technique)** : Le Coordinateur BIM entre en scène en préparant l'environnement de travail : il fédère la maquette BIM de référence et les données SIG 3D via un modèle central pour garder les fichiers légers et fluides. Sur cette base, il traduit les hypothèses écologiques en variantes de conception concrètes (scénarios) directement dans le logiciel de modélisation ;
- ❖ **Phase de Validation Itérative (Contrôle Qualité)** Une fois une variante modélisée, elle est soumise à une revue critique. Les ingénieurs écologues et le Maître d'ouvrage vérifient si les aménagements proposés répondent bien aux exigences de biodiversité. Si la variante est validée, elle passe à l'étape finale de traitement. Sinon elle retourne au Coordinateur BIM pour correction.
- ❖ **Phase de Conversion et Livrable (Sortie)** Le fichier validé (au format IFC) est traité pour devenir exploitable géographiquement. Selon les outils disponibles ou les besoins spécifiques, le processus emprunte l'une des trois voies techniques :
 - Conversion via Blender (pour obtenir un raster d'élévation),
 - Intégration dans un logiciel SIG classique (ArcGIS, FME...),
 - Traitement par un utilitaire Python dédié.

Le but final est unique : générer un **Plan d'Occupation des Sols (POS)** pour chaque variante, où chaque parcelle est correctement renseignée avec les attributs écologiques EUNIS.

8.3.1.3 Simulation des écologiques dans SimOïko

A l'issue de la mise en œuvre des différents scénarios de conception et leur conversion en Plan d'occupation de sol intégrant les nouvelles dispositions d'aménagement, ces données sont intégrées dans SimOïko. Ce logiciel – maison de TerrOïko permet de réaliser la scénarisation des dynamiques de population en fonction des aménagements prévus, comme détaillé plus haut, au point 5.2.1.



Figure 18 : Schéma du modèle de simulation SimOïko

Le logiciel SimOïko dans sa version actuelle **vbeta-3.3.2**, utilise les données de traits d'histoire de vie (obtenus par l'écologue selon le processus décrit au point 7.1.1), ainsi que les nouvelles cartes d'occupation du sol issues des différentes variantes modélisées dans les logiciels BIM. Les simulations produisent trois (03) types de données dont :

- Une estimation des tailles de populations moyennes (par patch d'habitat) ;
- Une estimation des probabilités d'extinction des populations (par patch d'habitat) ;
- Une carte des mouvements de dispersion effectués par les individus au cours de la simulation (exprimés en nombre moyen de passages par cellule de la carte et de nombre d'individus passant d'un patch à l'autre par pas de temps) ;

8.3.2 Calcul des indicateurs

Le calcul des indicateurs de « performance écologique » se base sur les résultats des simulations issues de **SimOïko**, incluant les cartes des mouvements des individus normalisés, des dynamiques de populations (taille de population moyenne par patch) et des probabilités de

maintien (par patch). Ces données de simulation sont représentées sous forme graphes et permettent de calculer quatre (04) indicateurs dont la valeur sera comprise entre 0 (mauvaise note écologique) et 1 (note supérieure). Ils sont calculés pour chacune des variantes d'aménagement à l'échelle d'un site, pour chaque écotype, puis agrégés par sous – trame.

Tableau 8 : Liste et caractéristiques des indicateurs de performance écologique

INDICATEUR	DONNEES CALCULEES	METHODE DE CALCUL
Accessibilité	Se définit pour une zone z dans un voisinage de rayon r comme la proportion de patches voisins à laquelle elle est connectée. Deux patches sont connectés s'il existe un flux d'individus entre les deux dans la carte des déplacements résultant des simulations. Cet indicateur évalue la connectivité écologique de la zone avec le territoire avoisinant.	$A(z,r) = \frac{nbVoisinsConnectés(z,r)}{nbVoisins(z,r)}$
Responsabilité	Elle correspond, pour une zone z dans un voisinage de rayon r , à la moyenne de deux sous-indicateurs : la proportion d'individus se maintenant dans la zone par rapport à la population totale qui se maintient dans son voisinage ; et la mesure de centralité intermédiaire (<i>betweenness centrality</i>) normalisée. Celle-ci se définit comme le nombre de plus courts chemins (dans le graphe) qui passent par la zone z pour relier deux patches quelconques. Cet indicateur permet d'évaluer la qualité, selon la contribution au maintien de la population dans le voisinage, et l'importance, selon le niveau d'utilisation pour les déplacements de dispersion (rôle de stepping stone), des nœuds pour le réseau écologique.	$R(z,r) = \frac{\frac{Population(z)}{Population\ totale\ (z,\ r)} + \frac{Centralité(z)}{(n-1)(n-2)}}{1}$ avec n le nombre total de patches dans le voisinage de z (en incluant z). Une valeur de 1 km a été choisie arbitrairement pour le rayon du voisinage autour des zones d'intérêt.
Diversité	Calculée uniquement par sous-trame et repose sur la mesure de viabilité d'une zone. La viabilité d'une zone, pour un écotype, est définie comme une variable binaire qui vaut 1 s'il existe au moins un patch dans la zone avec une probabilité de maintien supérieure à 80 % et dont l'aire dans la zone a une capacité d'accueil d'au moins deux individus (calculé à partir de la densité d'individus), et 0 sinon. Elle mesure la capacité de maintien d'une diversité potentielle.	La diversité d'une zone est la proportion des écotypes de la sous-trame qui ont une valeur de viabilité à 1.
Quiétude	Se rapportant à une zone indépendamment de la sous-trame, elle repose sur des données de pressions anthropiques pour en évaluer leur	

	niveau en un site. Les pressions anthropiques considérées sont la pollution sonore et la pollution lumineuse (pollution lumineuse diffuse ou le nombre de sources lumineuses visibles pour un observateur à 1 m du sol), connues pour affecter l'écologie des espèces. Les cartes associées sont normalisées chacune entre 0 (niveau de pollution faible) et 1 (niveau élevé). Pour une zone, le niveau de pression est la moyenne des différentes valeurs de pollution pondérée par la proportion de la surface dans la zone. L'indicateur de quiétude est la moyenne des deux types de pollutions.	$Q(z) = \frac{1}{2} [(1 - \text{pollSonore}(z)) + (1 - \text{pollLumineuse}(z))]$
--	---	---

TerrOïko dispose dans sa base de données d'utilitaires (EES), d'un code élaboré par l'équipe de développement en collaboration avec les écologues, et qui permet d'automatiser le calcul des indicateurs à partir des données issues de SimOïko.

8.3.3 Résultats

Les indicateurs de performance écologique issus des manipulations et calculs décrits plus haut sont présentés sous forme de graphe générés automatiquement comme donnée de sortie.



Figure 19 : Exemple d'indicateurs de performance écologique

La Figure 19 présente les résultats de calculs d'indicateurs écologiques sur trois gares et centres techniques choisis sur le Grand Paris Express (GPE). On constate que chaque indicateur est présenté et valorisé en fonction des différents des six (06) sous – trames écologiques : milieux ouverts, milieux humides, milieux urbains, milieux forestiers, milieux agricoles et milieux semi – ouverts.

Dans le cas de plusieurs variantes d'aménagement sur un même projet, il est tout à fait possible de constituer une matrice comparative des résultats d'indicateurs de manière numérique en plus des graphes, par variantes et par type de milieux. Cette matrice comparative permet d'obtenir un score final qui détermine la performance écologique de chacun des scénarii.

L'option à choisir est discutée de concert avec les acteurs majeurs du projet (Maître d'ouvrage, écologues, concepteurs, etc.)

8.3.4 Formalisation du BPMN général

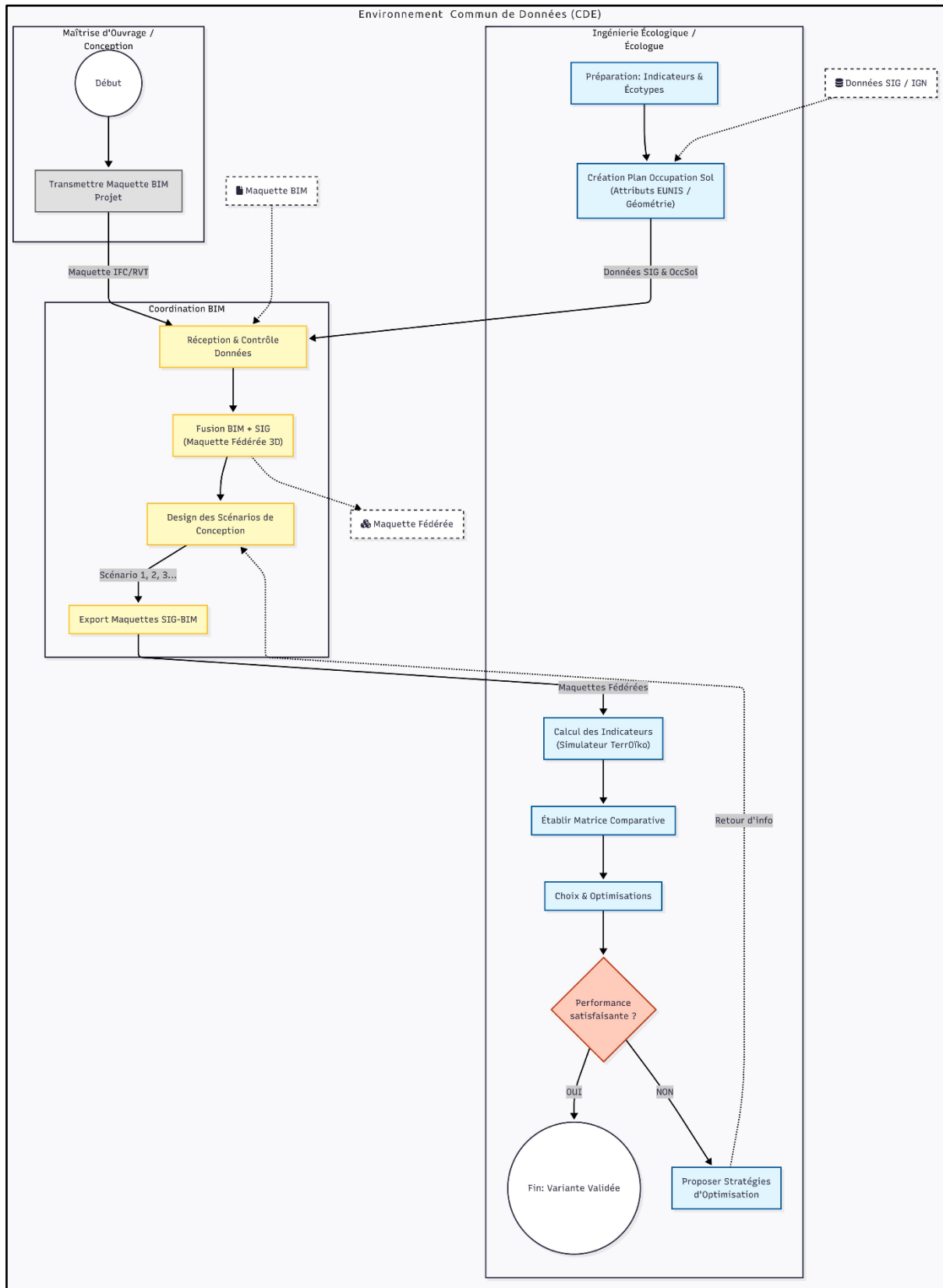


Figure 20 : Modélisation BPMN du processus d'évaluation et d'optimisation de la performance écologique en BIM

Ce Business Process Model and Notation (BPMN) présente le flux de travail collaboratif entre l'ingénierie écologique et la coordination BIM, centralisé au sein d'un Environnement de Données Commun (CDE).

Ce processus est subdivisé en quatre (04) phases :

- **Phase initiale** : Le processus est déclenché par la réception de la maquette numérique architecturale (issue de la Maîtrise d'Ouvrage ou de la Conception). Parallèlement, l'ingénieur écologue prépare le contexte environnemental en définissant les indicateurs, les écotypes et en créant un Plan d'Occupation du Sol (OccSol) enrichi de données sémantiques (attributs écologiques) et géométriques ;
- **Phase de design (Coordination BIM)** : Le Coordinateur BIM réceptionne ces deux sources de données (BIM et SIG). Il procède à leur fusion pour constituer une maquette fédérée 3D. À cette étape, différents scénarios d'aménagement sont modélisés (variantes de conception) afin de tester diverses hypothèses d'intégration écologique ;
- **Phase d'analyse (Ingénierie Écologique)** : Les maquettes fédérées des différents scénarios sont transmises à l'écologue. Celui – ci utilise le simulateur (SimOïko + Utilitaire maison) pour calculer les indicateurs de performance écologique de chaque variante. Les résultats, de base sous une forme graphique, sont synthétisés dans une matrice comparative, permettant d'évaluer objectivement les gains ou les pertes de biodiversité pour chaque option ;
- **Phase de décision** : Le processus se conclut par une étape d'aide à la décision. Si la performance écologique est jugée satisfaisante, la variante optimale est validée et le processus prend fin. Dans le cas contraire, une boucle d'optimisation est enclenchée : l'écologue propose des stratégies correctives qui sont renvoyées au Coordinateur BIM pour ajuster la conception, relançant ainsi un cycle de simulation jusqu'à l'atteinte des objectifs visés.

Le BPMN ainsi conçu, formalise un processus BIM conforme à la norme ISO 19650 pour l'évaluation de la performance écologique d'un projet de construction. Il met en évidence la structuration progressive de l'information, depuis les exigences de la maîtrise d'ouvrage jusqu'à la validation d'un scénario écologiquement optimisé. Le diagramme explicite également les données mobilisées à chaque étape, illustrant la convergence entre BIM, SIG et modélisation écologique. La présence d'une boucle d'optimisation traduit le caractère itératif

du processus, dans lequel les résultats des simulations écologiques permettent d'orienter la conception du projet.

9 APPLICATION DE LA DEMARCHE SUR LE CENTRE D'EXPLOITATION DE CHAMPIGNY

9.1 PREAMBULE

Comme annoncé introduction de ce document, cette étude se situe dans le cadre du projet de Recherche et Développement appelé ***OptiBioNum***, mené par TerrOïko en collaboration avec la Société des Grands Projets (SGP). Il propose une piste de réponse qui consiste à intégrer des indicateurs de "performance écologique" dérivés de simulations avec SimOïko dans des maquettes numériques (combinant BIM et SIG).

Le processus mis en place, il revient de le tester sur des équipements, en occurrence des gares et centres techniques de la SGP en tant que démonstrateur. Le choix objectif des sites pilotes, opéré au point 7.2.2, a été fait. Pour rappel, nous en avons retenu quatre (04) sites appartenant au réseau du Grand Paris Express (GPE) :

- Gare de Saint – Cloud ;
- Centre d'exploitation de Massy – Palaiseau ;
- Centre technique de Champigny ;
- Gare de Clichy Montfermeil ;

La mise en œuvre de ces tests nécessite la complétude des données écologiques (Bibliographie sur les espèces, données de pollution sonore, lumineuses, etc.), mais aussi les maquettes BIM de référence. Cependant, après de nombreuses discussions avec la SGP, nous avons fait face à certaines limitations, notamment dus à l'absence et/ou l'incomplétude, et aussi la qualité de ces données sur la plupart des sites sélectionnés.

Bien que ces données aient été pour la plupart fournies ultérieurement et utilisés pour finaliser le rapport global du Projet *OptiBioNum*, nous nous limiterons à présenter les manipulations faites sur le site du **Centre d'exploitation de Champigny** dont les données pouvaient nous permettre de mener le processus de bout en bout.

9.1.1 Mode de collaboration

9.1.1.1 Les acteurs

Le démonstrateur est mené par de nombreux acteurs, pour le compte des sociétés partenaires au projet. On y compte :

❖ La Maîtrise d'ouvrage : La Société des Grands Projets (SGP)

Dans ce projet, elle était chargée de la maîtrise d'ouvrage, donc la supervision globale de l'étude. A ce titre, elle a été chargée de fournir les données disponibles, relatives aux différents sites choisis (maquettes et informations techniques sur les nuisances). Elle se pose également comme le validateur en dernier ressort de toute la démarche, s'assurant de son adéquation avec la vision de développement du BIM et de l'Ecologie dans les projets d'infrastructure de la SGP. L'équipe de pilotage au sein de la SGP est composée comme de :

- Nicolas DELRIEU, Référent de la démarche BIM à la SGP ;
- Stéphane GAFFIE, Responsable Innovation et expertise environnemental à la SGP
- Charlotte LE ROY, Stagiaire cheffe de projet Innovations à la SGP.

❖ Le bureau d'étude écologique : TerrOïko (et DarkSky Lab)

C'est l'entreprise qui a mené l'essentiel de la Recherche et Développement du Projet. Elle s'est occupée de mener à bien l'étude écologique, mais aussi la démarche complète BIM sous la supervision de la SGP. Elle est organisée, dans le cadre du projet, comme suit :

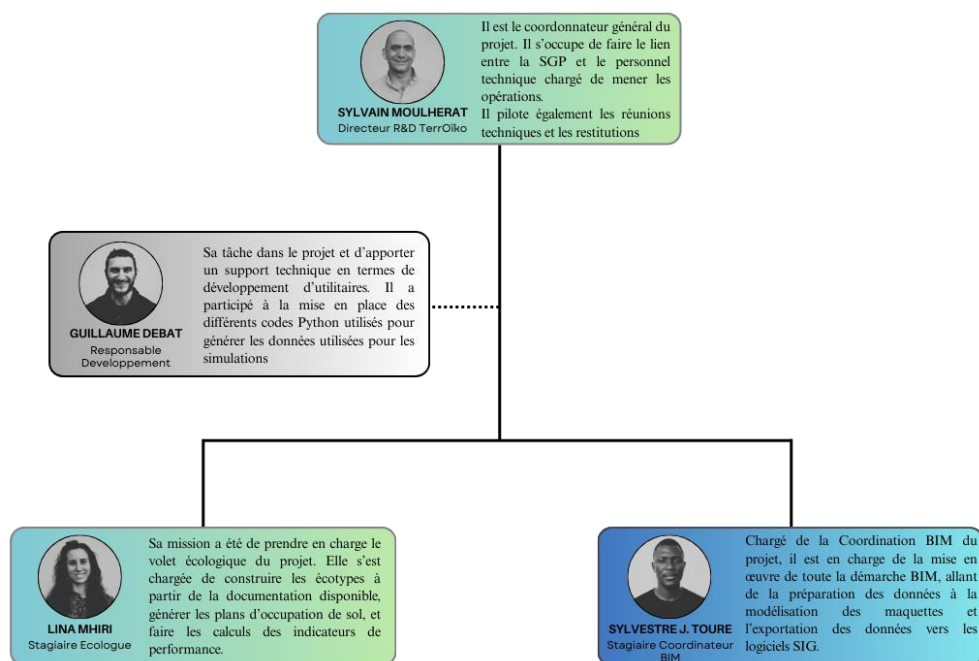


Figure 21 : Organigramme de l'équipe projet de TerrOïko

9.1.1.2 Plateforme collaborative

Le présent projet se situe dans un cadre expérimental, hors des contraintes de collaboration stricte entre divers acteurs et entreprises. L'essentiel du travail se faisant en interne à TerrOïko, nous n'avons pas mis sur pied un CDE au sens strict du terme. Cependant, l'utilisation de la plateforme collaborative **NextCloud** interne à TerrOïko s'est avérée nécessaire pour assurer le dépôt des dossiers, l'historisation des échanges et la validation de certains livrables d'étape. Elle a également servi à l'organisation des réunions techniques.

Un accès complet au dossier dédié au projet a été donné aux membres de l'équipe projet de la SGP, leur permettant d'y ajouter, consulter, modifier de la documentation sans besoin d'autorisation particulière.

Par ailleurs, une retranscription du BPMN global présenté dans la Figure 20 : Modélisation BPMN du processus d'évaluation et d'optimisation de la performance écologique en BIM à l'échelle de projet spécifique, s'est trouvée nécessaire dans l'optique de vérifier son adaptabilité. Il se présente donc comme suit :

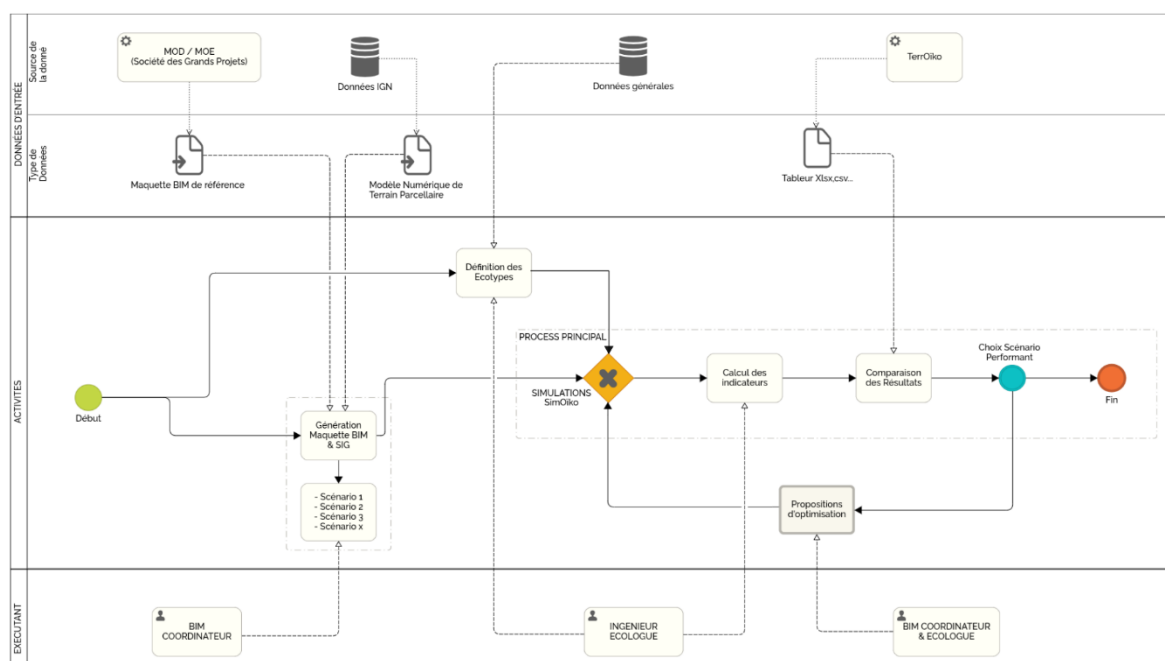


Figure 22 : Schéma adapté du BPMN au projet

9.1.2 Présentation du Centre d'exploitation de Champigny

9.1.2.1 Description

Le Centre d'exploitation et de maintenance de Champigny – sur – Marne est un équipement stratégique du Grand Paris Express (Ligne 15 sud), situé au nord – est de la commune de Champigny – sur – Marne (dans le Val – de – Marne), en bordure de la zone d'activité du plateau, à proximité immédiate de la future gare Bry – Villiers – Champigny. Ce projet, dont la maîtrise d'œuvre est assurée par Egis Bâtiment et l'agence d'architecture Richez & Associés est totalement intégré au tissu urbain de l'est parisien s'étend sur une superficie totale d'environ 08 hectares et comprend un ensemble bâti d'environ 30.000 m².

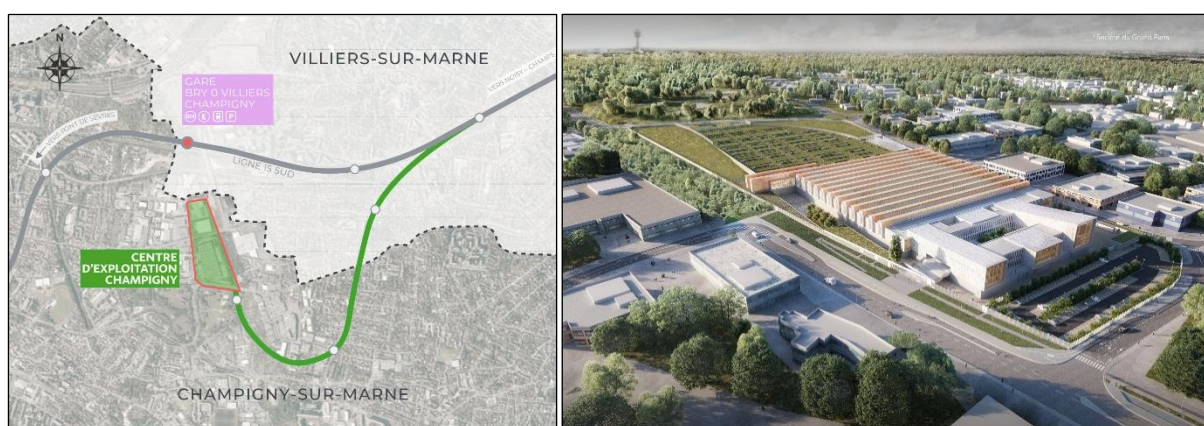


Figure 23 : Localisation du projet

Figure 24 : Image de synthèse

Avec son esthétique contemporaine, ce centre est conçu pour fonctionner 24h/24, pour assurer une activité continue des équipes, du fait de sa double fonction de Poste de commandement centralisé (PCC) et de Site de maintenance et de remisage (SMR) du matériel roulant.

9.1.2.2 Enjeux écologiques liés au projet

L'implantation du centre d'exploitation à Champigny-sur-Marne soulève des enjeux écologiques importants, tant en raison de sa superficie que de sa situation au cœur d'un environnement urbain et périurbain densément anthropisé. Ce projet intègre des dispositifs visant à atténuer l'impact sur les milieux naturels et à offrir des contributions positives à la biodiversité locale.

Un des aspects les plus remarquables relève de la toiture végétalisée du centre d'exploitation, conçue comme un espace étendu de nature en ville, favorisant l'accueil d'une biodiversité locale variée (végétation, insectes, reptiles, oiseaux) dans une zone où les habitats naturels sont rares. Cette toiture, qui couvre près de 2 hectares, est colonisée naturellement par des espèces

végétales adaptées, et son entretien est minimisé pour laisser place à un milieu vivant riche et structuré. Cette infrastructure végétale joue plusieurs rôles écologiques :

- Elle constitue un habitat complémentaire aux zones naturelles protégées situées à proximité (telles que des zones classées *Natura 2000* ou des Zones Naturelles d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique (ZNIEFF), facilitant des corridors écologiques entre espaces fragmentés ;
- Elle offre des conditions de vie adaptées pour des espèces menacées ou sensibles dans l'aire métropolitaine dense ;
- Elle participe à l'atténuation des effets d'îlot de chaleur urbain, à la gestion durable de l'eau (réduction du ruissellement, meilleure infiltration) et à l'intégration paysagère du bâtiment dans son contexte.

De plus, grâce à la gestion des eaux et aux systèmes de nappes phréatiques artificielles intégrés au projet, le centre se présente également un outil scientifique d'intégration de la "nature en ville", reliant les milieux écologiques du plateau de Champigny aux bassins versants adjacents. Il s'agira pour nous d'évaluer, à travers nos indicateurs, l'impact réel de ces dispositions conceptuelles pour le projet en cours de finalisation (pris comme variante de base).

9.2 REALISATION DE LA MAQUETTE BIM – SIG DE BASE

9.2.1 Préparation des données

9.2.1.1 MNT 3D du site

Le projet étant situé dans la région de l'Ile – de – France, en France métropolitaine, il est couvert par les opérations de relevé de l'IGN. Ainsi à partir des données de la BD – Alti que nous avons agrégé pour constituer un MNT de toute l'île – de – France, il a été question pour nous d'y extraire notre périmètre d'étude. De manière arbitraire, en pour fluidifier les manipulations en fonction du matériel informatique à disposition pour ce test, nous avons choisi de tenir compte d'une Zone d'Emprise Ecologique (ZEE) limitée à un périmètre de **05 km** autour du site du Centre d'Exploitation de Champigny – sur – Marne.

Cette zone a été délimitée sur QGIS avant d'être importée en format GeoTIFF dans Blender grâce à l'extension BlenderGIS comme décrit au point 8.2.1.1.

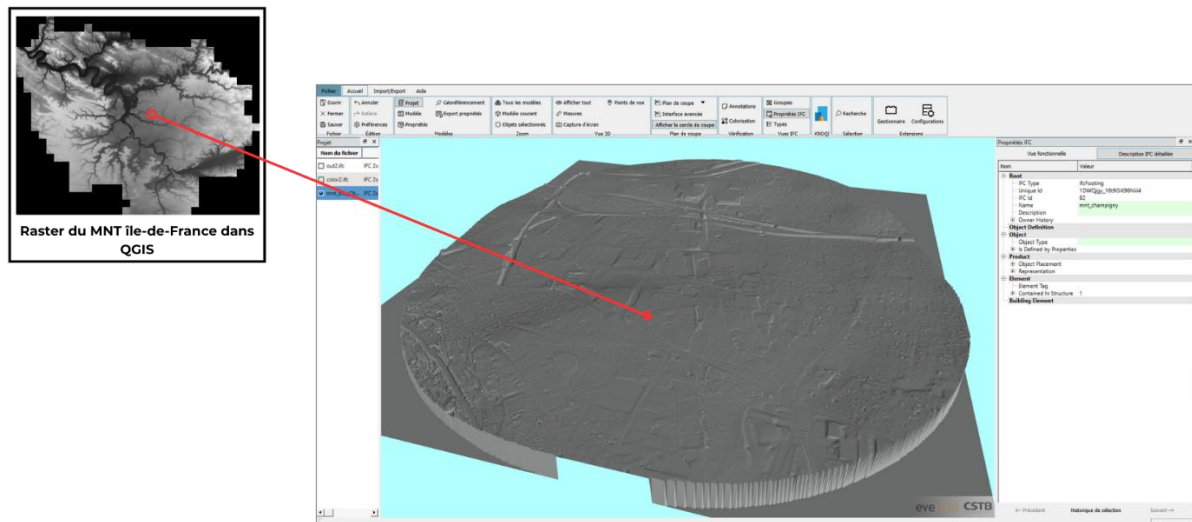


Figure 25 : Génération du MNT3D à partir des données de QGIS

9.2.1.2 Paramétrage des données d'occupation du Sol

Le plan d'occupation du sol a été réalisé par la stagiaire écologue du projet. Cette représentation graphique est produite avec un logiciel QGIS, à partir de données cartographiques produites par les organismes officiels tels que l'IGN et l'Institut Paris Région. Il présente les différentes parcelles de la ZEE, avec leur description en table attributaire tel qu'exigent dans notre étude au point 8.1.3.1. Le shapefile du Plan d'occupation du sol a par la suite servi à générer l'IFC 2D suivant le procédé mis en place grâce à notre utilitaire Python. Les éléments de la table attributaire paramétrée dans **QGIS** se retrouvent intégralement dans le fichier IFC dans le Pset « OptiBioNum ».

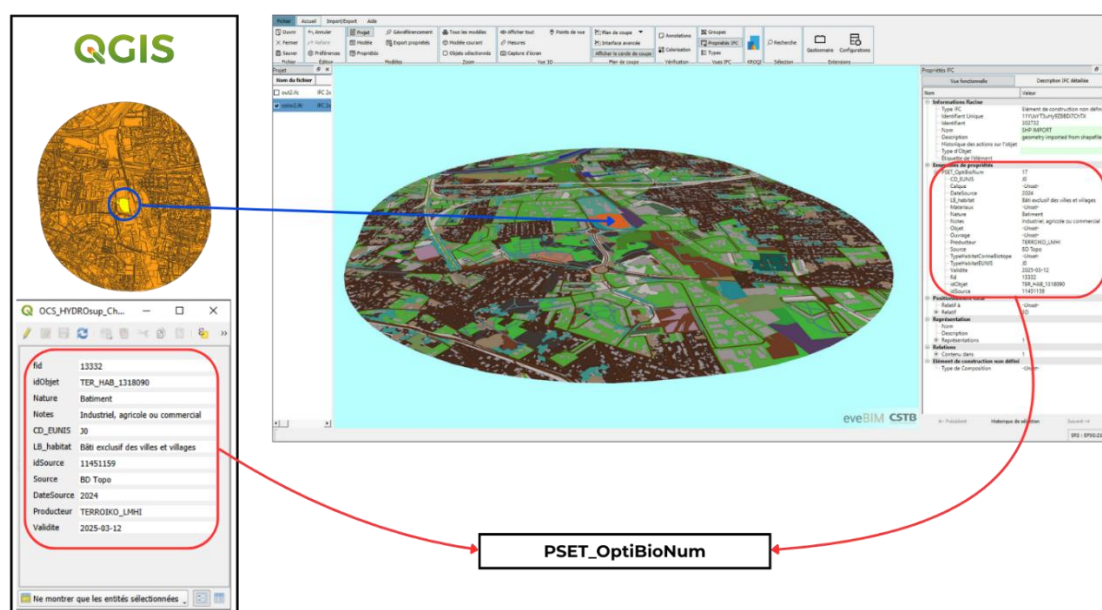


Figure 26 : Vue de l'IFC 2D parcellaire obtenu à partir du plan d'OccSol

Comme on le remarque sur cette figure ci-dessus, l'occupation de sol a été effectivement convertie en un fichier IFC consultable dans notre visionneuse *eveBIM*. Le mappage des couleurs a également été fait en fonction des différents types d'habitat EUNIS présents sur chaque parcelle.

9.2.2 Maquette fédérée BIM – SIG de base

9.2.2.1 Maquette SIG 3D du site

Cette maquette a été obtenue par l'utilisation de notre utilitaire python qui a permis de projeter l'IFC 2D sur le MNT 3D du site. La figure ci – contre présente cette maquette qui maintient le PSET_OptiBioNum intacte pour toutes les parcelles, tout en adaptant ces parcelles à la morphologie du terrain.

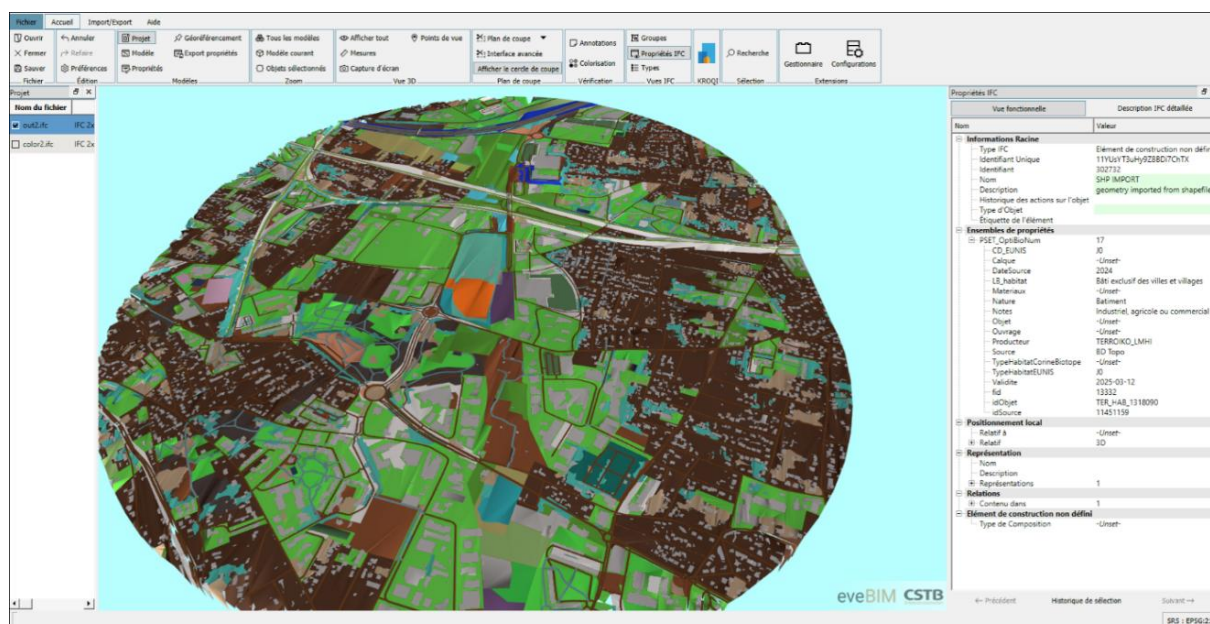


Figure 27 : Vue de la Maquette SIG 3D du site obtenue

9.2.2.2 Fusion avec la Maquette BIM de référence

La maquette BIM de référence du Centre d'Exploitation a été fournie par la SGP en plusieurs IFC correspondant chacun à une partie du bâtiment. Après un travail de dépouillement des données non nécessaires par la conversion des IFC en fichiers natifs Revit, notamment les maquettes de corps d'état technique n'impactant pas notre étude, nous avons procédé à l'agrégation de chacune des maquettes de structure, enveloppe, toiture technique et terrassements. A partir d'un modèle central, nous avons connecté les différents fichiers « .rvt » ainsi que la maquette SIG 3D du site générée à l'étape précédente. La maquette BIM de référence et la maquette SIG 3D du site se sont parfaitement superposées (SRC **ESPG :2154**).

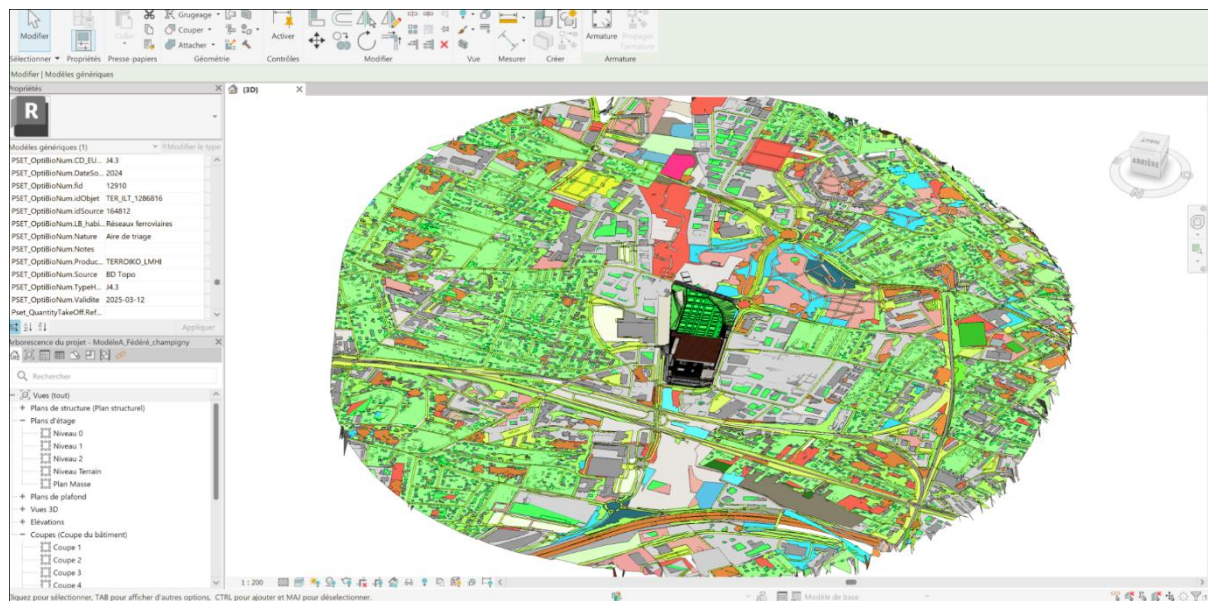


Figure 28 : Maquette BIM – SIG de base obtenue dans le logiciel Autodesk Revit

9.3 PROCESSUS BIM – SIG LIE AU CAS D'USAGE

9.3.1 Discussions préalables

9.3.1.1 Définition des différentes variantes

Les différentes variantes de conceptions à scénariser dans le cadre de ce test, ont été le fruit de discussions entre les équipes de TerrOïko et celles de la SGP. Elles sont issues de l'analyse de la situation géographique du Centre d'Exploitation, au regard des différentes trames et sous-trames ainsi que les espèces environnantes. De ce fait, 03 scénarios de conception ont été envisagés, et influencent principalement le choix du design à adopter pour la grande toiture terrasse située au flanc arrière du bâtiment et qui fait la continuité avec le terrain naturel.

- **Variante 1** : Il s'agit de la conception actuelle du projet. Nous avons souhaité la maintenir comme variante dans nos simulations car elle intègre déjà des dispositions intéressantes favorisant le développement de ma biodiversité. Il serait donc utile d'évaluer, sur la base de nos critères, la performance de ces dispositions ;
- **Variante 2** : Cette variante est partie de l'hypothèse que pour les constructions classiques présentes dans le paysage actuel, le traitement standard est fait d'une dalle en béton supplanté d'isolation thermique et acoustique. Nous avons choisi cette option en guise de comparaison avec la variante 1, pour évaluer la plus ou moins – value d'une conception intégrant les dispositions prises dans cette première variante ;

- **Variante 3** : Elle a été choisie pour une meilleure mise en accord avec le fonctionnement des réseaux écologiques alentours, en l'imposant comme lieu de maintien des espaces. Il s'agit de prévoir sur cette toiture un boisement densifiée, aux allures de « forêt urbaine ».

9.3.1.2 Choix du logiciel de modélisation

A cette étape de modélisation, nous avons fait le choix d'utiliser le logiciel Autodesk Revit, notamment pour des contraintes techniques. En effet étant donné qu'on ne pouvait pas, à cause de la taille des fichiers, avoir une maquette fédérée complète dans un même environnement de modélisation, il était nécessaire d'utiliser un logiciel qui offrait la possibilité de travailler de manière collaborative en réseau pour créer un fichier central et des fichiers locaux via une connexion par liens. Etant donné que bon nombre de logiciels du marché offrent cette possibilité, nous avons opté pour Revit car il est l'un des plus utilisé dans le domaine de la Conception. Les dernières versions de Blender, bien qu'étant une solution libre d'usage n'offre pas la possibilité de faire ces manipulations.

9.3.2 *Scénarisation des variantes*

9.3.2.1 Modélisation

La modélisation des trois (03) variantes a été faite suivant la description présentée dans le point 9.3.1.1, et à partir du logiciel Autodesk Revit 2025. Elle a été entièrement prise en charge par le stagiaire Coordinateur BIM et s'est faite selon les règles de modélisation en LOD 200 comme édicté au point 8.2.2.2.

- **La variante 01** a été faite directement à partir de la maquette fédérée BIM – SIG car elle est la même que le projet de base conçu et en cours d'exécution. Nous avons seulement injecté les attributs du *Pset_OptibioNum* par parcelle avant de le convertir pour la réalisation de la simulation et du calcul des indicateurs par la stagiaire écologue.



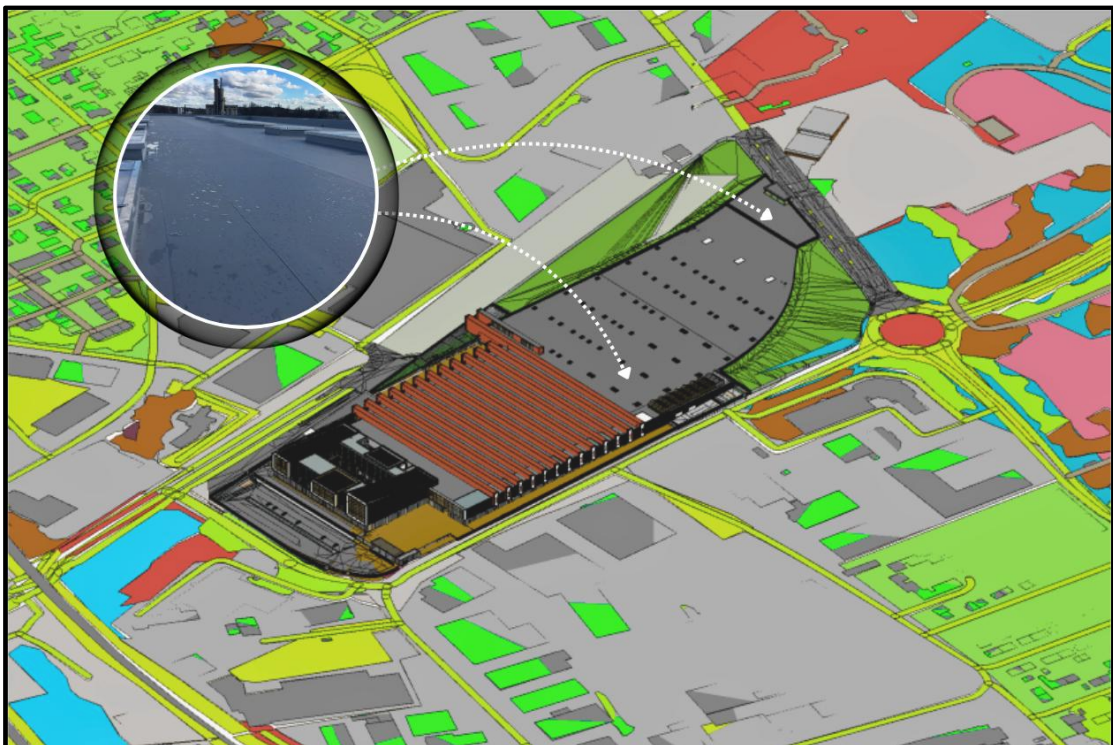
Codes EUNIS

Potagers : **I1.2**

Pelouse : **E2.6**

Figure 29 : Caractéristiques de conception de la **Variante 01**

- **La variante 02** est obtenue en supprimant toute végétation sur la toiture pour en faire une toiture terrasse accessible en béton, en y rajoutant de l'étanchéité lourde.

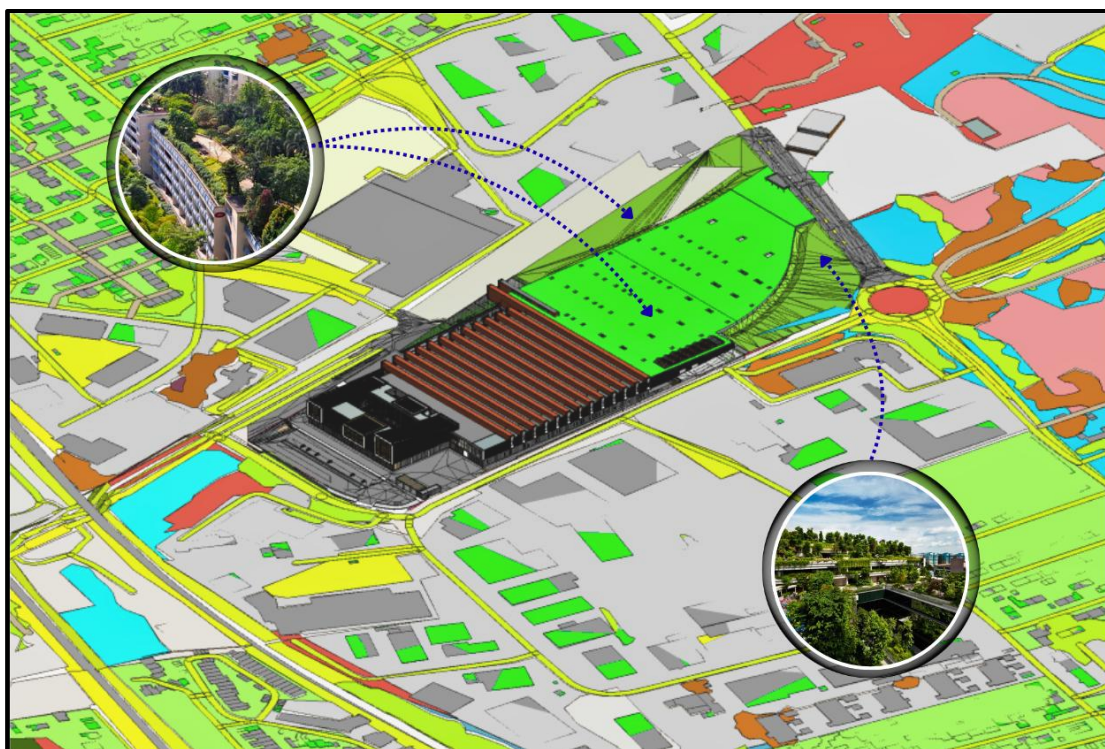


Code EUNIS

Dalle (Espace bâti) : **J0**

Figure 30 : Caractéristiques de conception de la **Variante 02**

- **La variante 03** est la plus techniquement lourde à implémenter. Il s'agit de planter une végétation plus ou moins dense, ainsi que l'espace vert aménagé faisant la continuité de la toiture. Cette végétation est appelée à accueillir des espèces plus grandes.



Code EUNIS **Forêt + dense : G1 x G2** **Forêt - dense : X22 x X23 x X24 x X25**

Figure 31 : Caractéristiques de conception de la *Variante 03*

9.3.2.2 Résultat du calcul des indicateurs

A l'issue des modélisations, les nouvelles occupations de sol contenant le type d'habitat EUNIS paramétré dans le fichier, ont été transmis à l'écologue pour le calcul des indicateurs.

❖ **Pour la variante 01**

Les résultats montrent une performance écologique globalement modérée et fortement polarisée (Figure 32), reposant principalement sur les milieux agricoles et semi-ouverts. L'indicateur de **Responsabilité** est dominé par les milieux agricoles (0,30), traduisant un potentiel d'accueil pour certaines espèces associées à des milieux ouverts gérés, tandis que les autres sous-trames contribuent de manière marginale. Cette responsabilité ciblée souligne une capacité écologique réelle mais limitée à un nombre restreint de groupes fonctionnels. **L'Accessibilité** est très faible pour l'ensemble des sous-trames, ce qui traduit une connectivité réduite du site, malgré la présence de surfaces végétalisées. Les potagers et pelouses n'induisent donc pas, à eux seuls, une amélioration significative des continuités écologiques. En revanche, l'indicateur de **Quiétude** présente des valeurs relativement élevées pour les milieux urbains, semi-ouverts et

agricoles (0,58), ce qui s'explique par une organisation spatiale limitant certaines perturbations, malgré des usages humains présents. Enfin, **la Diversité** potentielle est principalement portée par les milieux agricoles (0,30) et semi-ouverts (0,18), traduisant une biodiversité plutôt généraliste. Dans l'ensemble, cette variante améliore certains aspects écologiques, mais reste insuffisante pour structurer une biodiversité diversifiée et connectée.



Figure 32 : Radar présentant les résultats des indicateurs (Variante 01)

❖ Pour la variante 02

Caractérisée par une dalle majoritairement minérale, elle présente des performances écologiques très faibles, confirmant son rôle de scénario défavorable de référence (Figure 33). L'indicateur de **Responsabilité** est quasi nul pour l'ensemble des sous-trames, à l'exception d'une contribution très limitée des milieux semi-ouverts (0,07), traduisant une capacité très réduite du site à accueillir des espèces à enjeu. **L'Accessibilité** reste faible, bien que légèrement plus élevée pour les milieux urbains (0,04) et semi-ouverts (0,13), ce qui reflète davantage un effet de matrice urbaine qu'une réelle connectivité écologique fonctionnelle. **La Quiétude** elle, est majoritairement portée par les milieux urbains et semi-ouverts (0,58), mais cette valeur élevée ne traduit pas une qualité écologique intrinsèque, plutôt une homogénéité de pressions dans un environnement fortement artificialisé. **La Diversité** demeure limitée, avec une

contribution modérée des milieux urbains (0,18) et semi-ouverts (0,18), révélant une biodiversité opportuniste et peu spécialisée. Cette variante illustre clairement l'impact négatif d'une artificialisation dominante sur les fonctionnalités écologiques du site.

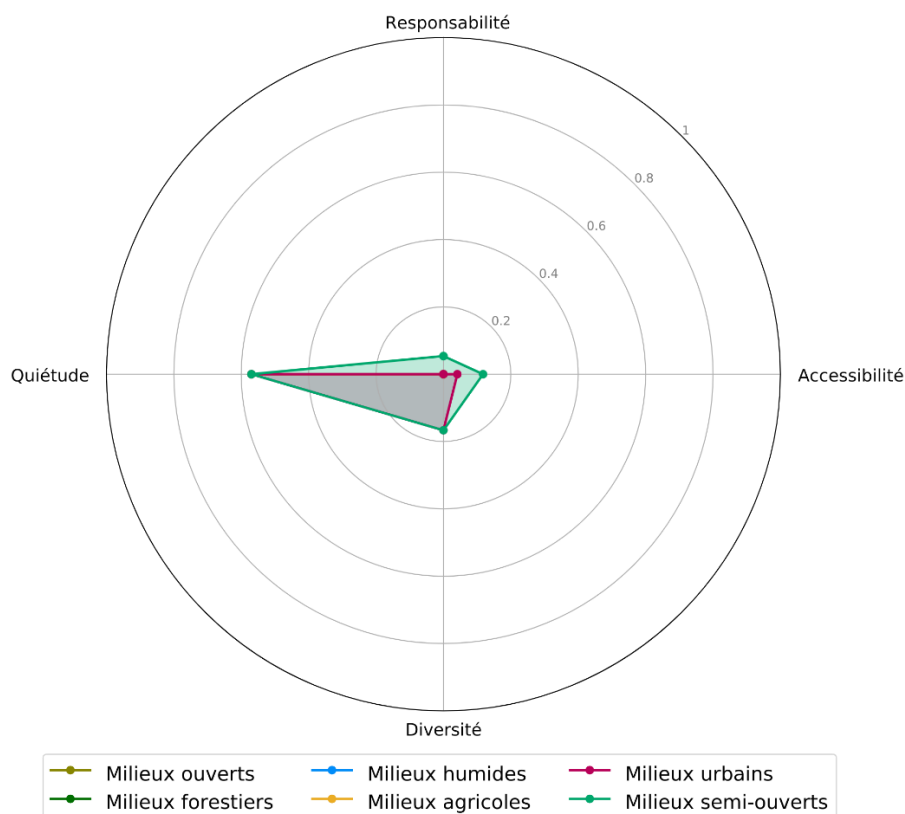


Figure 33 : Radar présentant les résultats des indicateurs (Variante 02)

❖ Pour la variante 03

La variante 3 se distingue par une amélioration qualitative marquée de la performance écologique, liée à l'intégration de milieux forestiers (Figure 34). L'indicateur de **Responsabilité** écologique est principalement porté par les milieux forestiers (0,09) et, dans une moindre mesure, par les milieux semi-ouverts (0,03), traduisant une capacité accrue à accueillir des espèces plus exigeantes. Cette évolution marque un changement de nature écologique du site par rapport aux variantes précédentes. L'**Accessibilité** écologique demeure globalement faible, mais s'améliore pour les milieux forestiers (0,18) et urbains (0,12), indiquant une légère amélioration des possibilités de déplacement des espèces, bien que les habitats restent partiellement isolés. L'indicateur de **Quiétude** atteint des valeurs élevées pour les milieux forestiers, urbains et semi-ouverts (0,58), confirmant le rôle structurant des boisements dans la réduction des perturbations et la création de refuges écologiques. Enfin, la **Diversité** potentielle est plus élevée que dans les autres variantes, notamment en milieu urbain (0,33) et semi-ouvert

(0,18), traduisant une complexification écologique globale du site. Cette variante apparaît ainsi comme la plus favorable écologiquement, tout en soulignant la nécessité de renforcer les continuités entre milieux pour maximiser son efficacité.

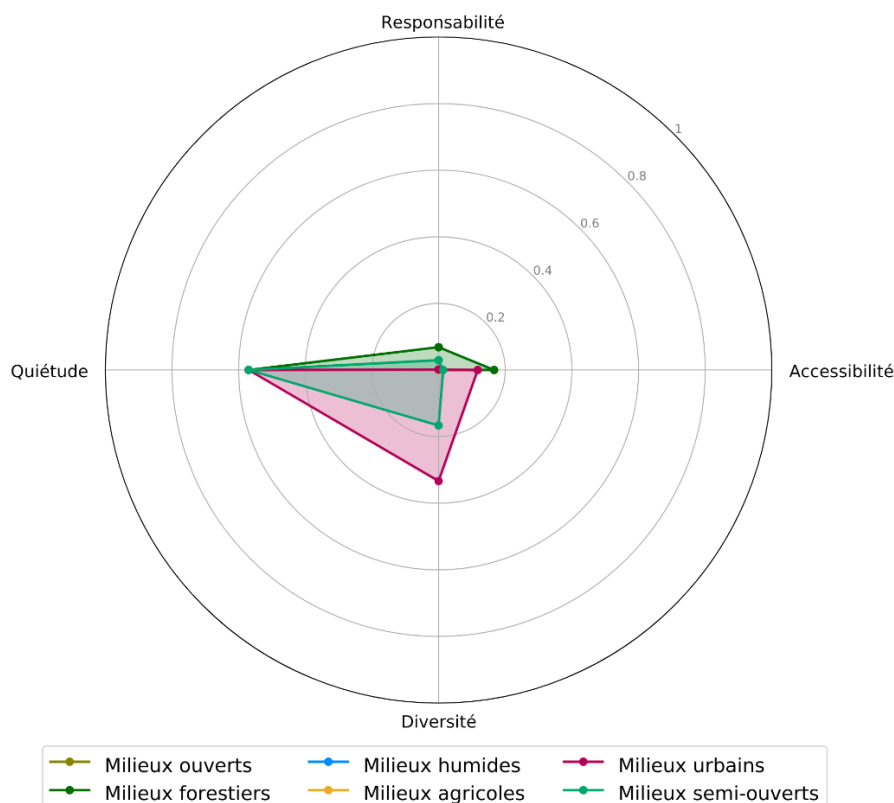


Figure 34 : Radar présentant les résultats des indicateurs (Variante 03)

9.3.2.3 Arbitrage des résultats

Comme indiqué au point 8.3.3, il est nécessaire d'établir des matrices comparatives pour mieux comprendre les forces et faiblesses de chaque variante. Les tableaux suivants mettent en évidence, pour chacun des indicateurs, les différences de performance écologique entre les variantes de conception et les sous-trames écologiques. Cette lecture croisée permet d'identifier les milieux les plus contributifs selon les fonctions écologiques considérées et de réaliser l'arbitrage nécessaire.

*Tableau 9 : Matrice Comparative de l'indicateur de **Responsabilité** par Variante et par Sous – trame.*

	Variante 1 (Potagers & pelouses)	Variante 2 (Dalle)	Variante 3 (forêt urbaine)
Milieus urbains	0,05	0,00	0,00
Milieus ouverts	0,00	0,00	0,00
Milieus semi-ouverts	0,01	0,07	0,03
Milieus agricoles	0,30	0,00	0,00
Milieus forestiers	0,00	0,00	0,09
Milieus humides	0,00	0,00	0,00

Tableau 10 : Matrice Comparative de l'indicateur d'Accessibilité par Variante et par Sous – trame.

	Variante 1 (Potagers & pelouses)	Variante 2 (Dalle)	Variante 3 (forêt urbaine)
Milieus urbains	0,00	0,04	0,12
Milieus ouverts	0,00	0,00	0,00
Milieus semi-ouverts	0,01	0,13	0,01
Milieus agricoles	0,00	0,00	0,00
Milieus forestiers	0,00	0,00	0,18
Milieus humides	0,00	0,00	0,00

*Tableau 11 : Matrice Comparative de l'indicateur de **Diversité** par Variante et par Sous – trame.*

	Variante 1 (Potagers & pelouses)	Variante 2 (Dalle)	Variante 3 (forêt urbaine)
Milieus urbains	0,00	0,18	0,33
Milieus ouverts	0,00	0,00	0,00
Milieus semi-ouverts	0,18	0,18	0,18
Milieus agricoles	0,30	0,00	0,00
Milieus forestiers	0,00	0,00	0,00
Milieus humides	0,00	0,00	0,00

Tableau 12 : Matrice Comparative de l'indicateur de **Quiétude** par Variante et par Sous – trame.

	Variante 1 (Potagers & pelouses)	Variante 2 (Dalle)	Variante 3 (forêt urbaine)
Milieux urbains	0,58	0,58	0,58
Milieux ouverts	0,00	0,00	0,00
Milieux semi-ouverts	0,58	0,58	0,58
Milieux agricoles	0,58	0,00	0,00
Milieux forestiers	0,00	0,00	0,58
Milieux humides	0,00	0,00	0,00

La comparaison des indicateurs écologiques met en évidence des écarts nets de performance entre les trois variantes de conception. La variante 2, dominée par une dalle minérale, présente des valeurs faibles pour l'ensemble des indicateurs et des sous-trames à l'exception des milieux urbains et semi – ouverts qui restent tout de même limités. Cela traduit une perte globale de fonctionnalités écologiques. Elle constitue un scénario défavorable du point de vue de la biodiversité et peut être écartée dans une logique d'arbitrage environnemental.

La variante 1, intégrant des potagers et des pelouses, améliore l'indicateur de diversité porté par les milieux agricoles et semi-ouverts. Toutefois, l'accessibilité écologique reste faible, limitant la structuration de continuités fonctionnelles à l'échelle du site. Cette variante apparaît comme une solution intermédiaire, pertinente pour des usages locaux mais insuffisante pour répondre à des enjeux écologiques plus ambitieux.

La variante 3, fondée sur l'intégration de milieux forestiers, présente les performances les plus élevées et les plus équilibrées, en particulier en termes de responsabilité et de quiétude écologiques. Elle offre le meilleur potentiel d'accueil pour des espèces plus exigeantes, tout en améliorant la diversité globale du site. Malgré une connectivité encore perfectible, cette variante apparaît comme la plus favorable du point de vue écologique.

Dans une perspective d'arbitrage, ces résultats montrent que la performance écologique repose sur la qualité et la complémentarité des milieux plutôt que sur une simple augmentation des surfaces végétalisées. La variante 3 constitue ainsi le scénario le plus pertinent, sous réserve d'un renforcement des continuités écologiques par l'association de milieux ouverts et semi-ouverts.

CHAPITRE IV : CONCLUSION

Face à l'intensification des projets d'aménagement et à la perte progressive de la biodiversité, la capacité des acteurs de la construction à intégrer les enjeux écologiques dès les phases amont de conception constitue aujourd'hui un levier déterminant de la transition environnementale du secteur. Le numérique, et en particulier le BIM, apparaît désormais comme un avantage structurant, mais encore insuffisamment mobilisé pour appréhender la complexité des dispositions en faveur de la biodiversité et éclairer les choix de projet au – delà des seules performances techniques et économiques.

Dans ce contexte, l'objectif principal de cette thèse professionnelle était d'explorer dans quelle mesure le Building Information Modeling (BIM), en articulation avec les Systèmes d'Information Géographique (SIG), pouvait contribuer à une meilleure prise en compte de la biodiversité dans les projets de construction, non seulement comme processus intégré, mais comme véritable moyen d'évaluation de performance environnementale. Au cours de notre étude, nous nous sommes questionnés sur la mise en place d'un processus BIM en vue de réaliser les simulations de différents scénarios de conception, basés sur l'évaluation de la capacité d'accueil en biodiversité des projets. Nous reviendrons dans cette conclusion sur les principales contributions opérationnelles de ce travail en réponse à la problématique : **Comment le BIM peut – il contribuer à l'optimisation de la capacité d'intégration de la biodiversité, dans les projets de bâtiments et d'infrastructures ?** Nous y relevons également quelques limites, ainsi que les perspectives à envisager dans la continuité de cette thèse professionnelle.

SYNTHESE DE L'ETUDE

Cette thèse professionnelle a exploré les conditions d'intégration opérationnelle de la biodiversité dans les projets de construction et d'infrastructures à travers un processus BIM–SIG outillé par des indicateurs écologiques issus de la simulation numérique. À travers notre état de l'art, il a été mis en évidence que, si le BIM est aujourd'hui largement mobilisé pour l'évaluation carbone ou énergétique des projets, son potentiel reste encore peu exploité pour traiter des enjeux liés au fonctionnement des réseaux écologiques et à la capacité d'accueil des sites pour la biodiversité. Les travaux de recherche et développement menés par TerrOïko, et notamment dans le cadre du projet OptiBioNum, constituent à ce titre une grande avancée en

proposant des indicateurs écologiques issus de simulations numériques, capables d'objectiver et de comparer les effets de différents scénarios d'aménagement.

Sur cette base, le cœur du travail a consisté à définir et formaliser un processus BIM – SIG structuré, permettant d'intégrer ces indicateurs de biodiversité à partir des maquettes numériques hybrides et de les mobiliser comme support d'arbitrage dès les phases de conception. Ce processus repose sur une articulation claire entre les données écologiques issues des études naturalistes, les données territoriales à grande échelle portées par les SIG, et les données de conception fine issues des maquettes BIM. La formalisation du workflow, notamment à travers un diagramme BPMN conforme aux principes de l'ISO 19650, a permis de clarifier les rôles des acteurs, les flux de données, ainsi que les outils mobilisés à chaque étape, contribuant ainsi à la reproductibilité et à la lisibilité de la démarche.

L'application de ce processus au cas d'étude du Centre d'exploitation de la SNCF à Champigny – sur – Marne, dans le cadre du projet du Grand Paris Express (GPE), a permis de tester concrètement la pertinence de la démarche. La comparaison de plusieurs variantes de conception, intégrant des niveaux contrastés de végétalisation et de types de milieux, a montré que les indicateurs de biodiversité proposés permettent de discriminer finement les performances écologiques des scénarios, en mettant en évidence des compromis entre responsabilité écologique, accessibilité des habitats, quiétude et diversité. Ces résultats illustrent l'intérêt d'une approche comparative bien menée, capable d'alimenter les choix de conception sur des bases objectives.

Au-delà des résultats obtenus sur le site étudié, ce travail met en lumière plusieurs apports majeurs. D'une part, il démontre que le BIM peut constituer un support pertinent pour intégrer la biodiversité comme dimension mesurable et pilotable du projet, à condition d'être enrichi par des données écologiques adaptées et par une articulation étroite avec les outils SIG et de simulation. D'autre part, il souligne l'intérêt d'un diagnostic écologique précoce, rendu possible par la simulation numérique, pour orienter les choix de conception dans le respect de la séquence ERC, en privilégiant l'évitement et la réduction des impacts plutôt que des compensations tardives et souvent déconnectées du projet initial.

LIMITES ET DIFFICULTES RENCONTREES

Bien que la mise en œuvre opérationnelle sur le Centre d'exploitation de Champigny – sur – Marne semble avoir confirmé la viabilité de notre processus, notre travail a toutefois mis en évidence plusieurs limites et difficultés, principalement d'ordre technique et méthodologique.

La fédération des maquettes reste un point déterminant, en particulier lorsque les modèles BIM et les données écologiques reposent sur des représentations spatiales et des logiques de structuration différentes. En effet, des difficultés techniques persistent lors de la fusion entre les données SIG (territoire) et les maquettes BIM (bâtiment). L'alignement des systèmes de coordonnées et la préservation de l'intégrité sémantique lors des conversions IFC restent des points de vigilance majeurs pour assurer la qualité des maquettes numérique sans perte d'information. En sus, malgré les capacités d'outils comme SimOïko, l'exploitation explicite de la 3D dans les modèles écologiques demeure complexe, notamment lors de la production et de l'échange dans des formats exploitables, tels que des représentations voxelisées.

Par ailleurs, les scénarios étudiés reposent en grande partie sur des maquettes « hors sol », appliquées à des bâtiments existants ou à des projets présentant peu de marges d'adaptation architecturale et conceptuelle. Cette contrainte limite la diversité des scénarios testables et confère à certaines variantes un caractère davantage illustratif que pleinement réaliste du point de vue architectural, technique ou écologique. Néanmoins, cette approche reste pertinente pour éprouver le processus mis en place, les flux de données et les modalités d'arbitrage, qui constituent le cœur de la démonstration menée dans ce travail.

Enfin, les résultats obtenus demeurent dépendants des hypothèses de modélisation écologique et de la disponibilité des données d'entrée, ce qui implique une interprétation prudente et un recours indispensable aux différentes expertises – métier concernés, dans une logique de collaboration dès les phases amont du projet.

PERSPECTIVES

Ces travaux, que nous avons mené dans le cadre de cette thèse professionnelle, ouvrent plusieurs perspectives importantes.

À court et moyen terme, une évolution majeure réside dans l'intégration plus poussée des outils écologiques au sein des environnements BIM, notamment via le développement de plugins ou de maquettes parallèles interopérables permettant de piloter les simulations directement depuis les modèles de conception. Cette intégration reste aujourd'hui partielle et constitue un champ d'exploration, notamment au sein des équipes de développement de TerrOïko. Par ailleurs, il convient de souligner que le processus développé dans ce travail est appelé à être **entièrement intégré dans la conception future des gares de la nouvelle Ligne 18 du Grand Paris Express** en partenariat avec la SGP. Cela confirme effectivement le caractère opérationnel et évolutif de la démarche proposée.

Une autre perspective majeure concerne la phase d'exploitation, avec le développement de dispositifs de suivi et de monitoring de la biodiversité sur site, reposant sur des capteurs et des retours terrain. Le projet OCAPI ayant déjà lancé les premiers jalons dans le déploiement de solutions de surveillance sur les infrastructures existantes, le couplage de ces données avec les maquettes numériques ouvre la voie à une forme de « maintenance prédictive des solutions de biodiversité », intégrant le faune dans une logique de gestion patrimoniale à long terme.

Enfin, le croisement entre indicateurs de biodiversité et Analyse du Cycle de Vie (ACV), notamment dans les infrastructures à grande échelle, commence à émerger comme une piste de recherche structurante, visant à appréhender conjointement les performances environnementales multiformes (Impacts carbone, faisabilité matérielle et performances écologiques) des projets. De ce fait, il est envisagé dans la continuité de ce travail, sous la coupole de TerrOïko, des travaux de recherche plus avancée sous la forme d'un projet doctoral.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

<i>Figure 1: Courbes de MacLeamy (Mor, 2015).....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 2 : Processus de dépôt légal de données brutes de biodiversité (Normandie, 2021)...</i>	<i>20</i>
<i>Figure 3 : Eléments de la scène urbaine CityGML, (IGN, 2018)</i>	<i>34</i>
<i>Figure 4 : Hiérarchisation de la séquence ERC (UVED, 2021).....</i>	<i>38</i>
<i>Figure 5 : Synoptique de la séquence ERC appliquée à la biodiversité, (notre-environnement, 2025).....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 6 : Exemple de simulation d'environnement naturel dans SimOïko, (TerrOïko, 2024)</i>	<i>41</i>
<i>Figure 7 : Principe de convergence SIG – Ecologie dans SimOïko, (SimOïko la simulation au service de la biodiversité, 2024)</i>	<i>42</i>
<i>Figure 8 : Application de l'approche métier de l'ingénierie écologique via SimOïko, (TerrOïko Nos programmes de recherche et développement, 2025)</i>	<i>42</i>
<i>Figure 9 : Maillage hexagonal de côté 1250 m de la zone d'étude</i>	<i>50</i>
<i>Figure 10 : Indication des équipements sélectionnés dans OptiBioNum.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure 11 : Schéma structurel des étapes du processus BIM – SIG pour l'intégration de la biodiversité, (S. Jonathan TOURE, 2025).....</i>	<i>54</i>
<i>Figure 12 : Raster du MNT reconstitué sur toute l'Ile-de-France</i>	<i>60</i>
<i>Figure 13 : Paramétrage du MNT dans Blender via BlenderGIS</i>	<i>61</i>
<i>Figure 14 : Paramétrage pour l'assignation des attributs IFC dans Bonsaï.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure 15 : Vue d'un MNT obtenu à partir des données SRTM</i>	<i>63</i>
<i>Figure 16 : Schéma de la structure fonctionnelle du Processus de simulation</i>	<i>67</i>
<i>Figure 17 : Processus de mise en œuvre des variantes d'aménagement</i>	<i>69</i>
<i>Figure 18 : Schéma du modèle de simulation SimOïko</i>	<i>70</i>
<i>Figure 19 : Exemple d'indicateurs de performance écologique.....</i>	<i>72</i>
<i>Figure 20 : Modélisation BPMN du processus d'évaluation et d'optimisation de la performance écologique en BIM.....</i>	<i>74</i>
<i>Figure 21 : Organigramme de l'équipe projet de TerrOïko.....</i>	<i>77</i>
<i>Figure 22 : Schéma adapté du BPMN au projet.....</i>	<i>78</i>
<i>Figure 23 : Localisation du projet.....</i>	<i>79</i>
<i>Figure 24 : Image de synthèse</i>	<i>79</i>
<i>Figure 25 : Génération du MNT3D à partir des données de QGIS.....</i>	<i>81</i>
<i>Figure 26 : Vue de l'IFC 2D parcellaire obtenu à partir du plan d'OccSol.....</i>	<i>81</i>

Figure 27 : Vue de la Maquette SIG 3D du site obtenue	82
Figure 28 : Maquette BIM – SIG de base obtenue dans le logiciel Autodesk Revit	83
Figure 29 : Caractéristiques de conception de la Variante 01	85
Figure 30 : Caractéristiques de conception de la Variante 02	85
Figure 31 : Caractéristiques de conception de la Variante 03	86
Figure 32 : Radar présentant les résultats des indicateurs (Variante 01).....	87
Figure 33 : Radar présentant les résultats des indicateurs (Variante 02).....	88
Figure 34 : Radar présentant les résultats des indicateurs (Variante 03).....	89

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Différences entre BIM et GIS, (Hbeich et al., 2020)	33
Tableau 2 : Comparaison des caractéristiques IFC et CityGML, Extrait de (Hbeich et al., 2020)	35
Tableau 3 : Type et catégories des mesures d'évitement, Extrait de (Djema, 2021).....	39
Tableau 4 : Type et catégories des mesures de réduction, Extrait de (Djema, 2021) et modifié par S. Jonathan TOURE	39
Tableau 5 : Type et catégories des compensations, Extrait (Djema, 2021).....	40
Tableau 6 : Les usages BIM selon les phases d'un projet, Mediaconstruct (2020)	52
Tableau 7 : Liste des attributs des bâtis/parcelles de l'Occupation du Sol.....	55
Tableau 8 : Liste et caractéristiques des indicateurs de performance écologique.....	71
Tableau 9 : Matrice Comparative de l'indicateur de Responsabilité par Variante et par Sous – trame.....	90
Tableau 10 : Matrice Comparative de l'indicateur d'Accessibilité par Variante et par Sous – trame.....	90
Tableau 11 : Matrice Comparative de l'indicateur de Diversité par Variante et par Sous – trame.....	90
Tableau 12 : Matrice Comparative de l'indicateur de Quiétude par Variante et par Sous – trame.....	91

BIBLIOGRAPHIE / WEBOGRAPHIE

- ✚ Aaron, C., Alireza, A., Hanjin, H., & Stuart, C. (2018). Modélisation des informations du bâtiment (BIM) pour les infrastructures de transport – Revue de la littérature, applications, défis et recommandations. *Automatisation dans la construction*, 94(257-281).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580517309470>
- ✚ adatt. (2021, janvier 5). *Quand le BIM s'étend à la ville: CIM et LIM - Adatt*.
<https://adatt.fr/quand-le-bim-setend-a-la-ville-cim-et-lim/>
- ✚ AFNOR. (2018). *ISO 19650-1:2018(fr), Organisation et numérisation des informations relatives aux bâtiments et ouvrages de génie civil, y compris modélisation des informations de la construction (BIM)—Gestion de l'information par la modélisation des informations de la construction—Partie 1: Concepts et principes*.
<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:19650:-1:ed-1:v1:fr>
- ✚ AFNOR. (2022, octobre). *NF X10-900*. Afnor EDITIONS.
<https://www.boutique.afnor.org/en-gb/standard/nf-x10900/ecological-engineering-methodology-of-project-management-applied-to-the-pre/fa169221/1280>
- ✚ AFNOR. (2023, mars). *Norme NF X32-102*. Afnor EDITIONS.
<https://www.boutique.afnor.org/en-gb/standard/nf-x32102/biodiversity-and-ecological-engineering-approach-to-conduct-an-initial-stat/fa199977/343215>
- ✚ Antón, L., & Diaz, J. (2014). Integration of Life Cycle Assessment in a BIM Environment. *Procedia Engineering*, 85, 26-32.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.525>
- ✚ Autret, Y., Goger, T., Navarro, C., Oberlin, F., Hedelin, A., Mertens, A., Böttcher, M., Dostal, I., Bekiaris, A., Benekos, I., Georgiadis, L., Chalkia, H., Guinard, E., Rael, V., Adesiyun, A., Coldibeli, A., Nela, D., de Bouville, J., Hallosserie, A., ... François, D. (2023). *Biodiversity & Infrastructure Synergies & Opportunities for European Transport Networks—Strategic Research & Deployment Agenda* (p. 80). European

- Commision. <https://bison-transport.eu/wp-content/uploads/2024/04/layout.-BISON-RAPPORT-2023-V5-DEF-WEB.pdf>
- Barrientos, R., Ascensão, F., D'Amico, M., Grilo, C., & Pereira, H. M. (2021). The lost road : Do transportation networks imperil wildlife population persistence? *Perspectives in Ecology and Conservation*, 19(4), 411-416. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.07.004>
- Benning, P., Cousin, V., Guilloteau, S., & Rives, M. (2019). *Guide d'application du BIM Infra*. https://minnd.fr/wp-content/uploads/2023/07/MINnD_TH01_UC00_02-Guide_Application_BIM_Infra_025_2019.pdf
- Bilan 2018 PTNB. (s. d.).
- BISON : synergies et opportunités pour la biodiversité et les infrastructures dans les réseaux de transport européens | TerrOiko. (2021). <https://www.terroiko.fr/fr/recherche-et-developpement/bison>
- Boguslawski, P., Mahdjoubi, L., Zverovich, V., Fadli, F., & Barki, H. (2015). *Bim-gis Modelling In Support Of Emergency Response Applications*. <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-the-built-environment/149/34512>
- Boileau, J. (2022). *Planification de l'aménagement des territoires et intégration des enjeux écologiques : Améliorer l'application de la séquence Éviter-Réduire-Compenser par la modélisation écologique participative* [These de doctorat, Montpellier 3]. <https://www.theses.fr/2022MON30013>
- Bueno, C., Pereira, L., & Fabricio, M. (2018). Life cycle assessment and environmental-based choices at the early design stages : An application using building information modelling. *Architectural Engineering and Design Management*, 14, 1-15. <https://doi.org/10.1080/17452007.2018.1458593>
- Building Transparency, KT Innovations, thinkstep, and Autodesk. (2025). *Tally | Learn | Methods*. <https://choosetally.com/methods/>

- ✚ BuildingSmart International. (2025, janvier 14). *Service de gestion des cas d'utilisation (UCM)—buildingSMART International*.
<https://www.buildingsmart.org/users/services/use-case-management-service/>
- ✚ Calvet, C., Delbar, V., Chapon, P., Brasebin, M., Perret, J., & Moulherat, S. (2020). La biodiversité à l'épreuve des choix d'aménagement : Une approche par la modélisation appliquée à la Région Occitanie. *Sciences Eaux et Territoires*, 31, 8.
<https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2020.1.06>
- ✚ Catalano, C., Meslec, M., Boileau, J., Guarino, R., Aurich, I., Baumann, N., Chartier, F., Dalix, P., Deramond, S., Laube, P., Lee, A. K. K., Ochsner, P., Pasturel, M., Soret, M., & Moulherat, S. (2021a). Smart Sustainable Cities of the New Millennium : Towards Design for Nature. *Circular Economy and Sustainability*, 1(3), 1053-1086.
<https://doi.org/10.1007/s43615-021-00100-6>
- ✚ Catalano, C., Meslec, M., Boileau, J., Guarino, R., Aurich, I., Baumann, N., Chartier, F., Dalix, P., Deramond, S., Laube, P., Lee, A. K. K., Ochsner, P., Pasturel, M., Soret, M., & Moulherat, S. (2021b). Smart Sustainable Cities of the New Millennium : Towards Design for Nature. *Circular Economy and Sustainability*, 1(3), 1053-1086.
<https://doi.org/10.1007/s43615-021-00100-6>
- ✚ Cerema. (2017). *Présentation de DIOGEN et de CIOGEN*.
- ✚ CGDD, & Cerema. (2018, janvier). *Guide d'aide à la définition des mesures ERC*.
- ✚ ChartierDalix. (2025). *Ecole de la biodiversité, Boulogne-Billancourt* [Organisation].
<https://www.chartier-dalix.com/fr/projets/groupe-scolaire-biodiversite-gymnase-boulogne-92>
- ✚ Clergeau, P. (2020). *La biodiversité dans les stratégies d'aménagement urbain*.
- ✚ Construction bas carbone. (2022). Eiffage Construction V2.
<https://www.eiffageconstruction.com/engagements/environnement/construction-bas-carbone>

-  Cousin, V., Rives, M., Rault, V., Tolmer, C.-E., Lannoy, R., Halbout, H., Robert, C., Tournez, E., Ireman, P., & Ouisse, O. (2017). *Guide de la revue numérique de projet d'infrastructure*.
-  Crooks, K. R., Burdett, C. L., Theobald, D. M., King, S. R. B., Di Marco, M., Rondinini, C., & Boitani, L. (2017). Quantification of habitat fragmentation reveals extinction risk in terrestrial mammals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(29), 7635-7640. <https://doi.org/10.1073/pnas.1705769114>
-  de Laat, R., & van Berlo, L. (2011). Integration of BIM and GIS : The Development of the CityGML GeoBIM Extension. In T. H. Kolbe, G. König, & C. Nagel (Éds.), *Advances in 3D Geo-Information Sciences* (p. 211-225). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12670-3_13
-  Directive 2014/24/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 février 2014 sur la passation des marchés publics et abrogeant la directive 2004/18/CE Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE (2014).
-  Djema, M. (2021). *Le BIM et les mesures environnementales*. École Nationale des Ponts et Chaussées et École Spéciale des Travaux Publics, du Bâtiment et de l'Industrie.
-  El Mekawy, M., Issa, M., & Perjons, E. (2021). BIM-GIS INTEGRATION FOR TRAFFIC SAFETY IN CITIES. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, VIII-4/W2-2021, 161-166. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-VIII-4-W2-2021-161-2021>
-  Fahrig, L. (2003). Fahrig L.. Effects of Habitat Fragmentation on Biodiversity. *Annu Rev Ecol Evol Syst* 34 : 487-515. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34, 487-515. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419>
-  FOLLEZ, C., MEUNIER, A., HACHEMANI, T., PRIMAULT, L., GASTHI MAOUENE, P., MEGOUO, U., CANTALOUBE, N., & LEVY, L. (2025, octobre). *Technologies et process pour une construction et une rénovation durable*. École nationale des ponts et chaussées.

- ✚ Fountain, J., & Langar, S. (2018). Building Information Modeling (BIM) outsourcing among general contractors. *Automation in Construction*, 95, 107-117. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.06.009>
- ✚ Gargominy, O., Tercerie, S., Régnier, C., Ramage, T., Dupont, P., Daszkiewicz, P., & Poncet, L. (2021). *TAXREF v15, référentiel taxonomique pour la France : Méthodologie, mise en œuvre et diffusion* (TAXREF, référentiel taxonomique pour la France, p. 64). UMS PatriNat (OFB-CNRS-MNHN).
- ✚ Hajar, Z., Infrastructures, E., Castaing, C., Breton, F., Concessions, V., Afonso, P., Poinsignon, M., Tribouillois, F., & Lepert, P. (2015). *Modélisation des informations des chaussées sur le cycle de vie*.
- ✚ Halbout, H., Robida, F., & A. Jadida, M. (2023). *BIM et SIG : Complémentarité et Convergence*. ISTE Group.
- ✚ Halfwerk, W., & Jerem, P. (2021). A Systematic Review of Research Investigating the Combined Ecological Impact of Anthropogenic Noise and Artificial Light at Night. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 765950. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.765950>
- ✚ Halfwerk, W., & Slabbekoorn, H. (2015). Pollution going multimodal : The complex impact of the human-altered sensory environment on animal perception and performance. *Biology Letters*, 11(4), 20141051. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2014.1051>
- ✚ *Handbook – EU BIM Task Group*. (2017). <http://www.eubim.eu/handbook/>
- ✚ Hbeich, E., Roxin, A., & Bus, N. (2020). *Previous BIM-GIS Integration Approaches : Analytic Review and Discussion*.
- ✚ Hollberg, A., Genova, G., & Habert, G. (2019). Evaluation of BIM-based LCA results for building design. *Automation in Construction*, 109. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102972>
- ✚ Huc, F., Vignaud, P., & Falqui, L. (2022). *Déchets du BTP en Occitanie*. La librairie ADEME. <https://librairie.ademe.fr/economie-circulaire-et-dechets/5850-dechets-du-btp-en-occitanie-9791029720161.html>

-  HUILLARD, X., & Comité d'experts Européens de VINCI. (2023). *LIGNES DIRECTRICES ENVIRONNEMENTALES*. Vinci Construction. https://www.google.com/search?q=dir-env-2023-12-fr.pdf%2C&oq=dir-env-2023-12-fr.pdf%2C&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOdIBCTE4MTFqMGoxNagCCLACAfEFO9YYAZiUN_4&sourceid=chrome&ie=UTF-8
-  IGN. (2018, mars). *Ref3DNat® Version 1-0-2—Spécifications du noyau du référentiel*.
-  IPBES. (2019). *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6417333>
-  iTeh STANDARD PREVIEW. (2006). *ISO 14044:2006(fr), Management environnemental—Analyse du cycle de vie—Exigences et lignes directrices*. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/b3d74118-4c9f-4f3e-b55611d704441abb/iso-14044-2006>
-  ITF. (2021). *Data-driven Transport Infrastructure Maintenance* (Text No. 95; p. 32). OECD. <https://www.itf-oecd.org/data-driven-transport-infrastructure-maintenance>
-  Johnny, W., & Zhou, X. (2015). Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review. *Automation in Construction*, 57. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.06.003>
-  Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
-  Kang, T. W., & Hong, C. H. (2018). IFC-CityGML LOD mapping automation using multiprocessing-based screen-buffer scanning including mapping rule. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(2), 373-383. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0595-9>
-  Koning, K., Broekhuijsen, J., Kühn, I., Ovaskainen, O., Taubert, F., Endresen, D., Schigel, D., & Grimm, V. (2023). Digital twins : Dynamic model-data fusion for ecology. *Trends in ecology & evolution*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2023.04.010>

-  Légifrance. (2000, septembre 21). *Loi n° 76-629 du 10 juillet 1976 relative à la protection de la nature* -. Légifrance.
<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGITEXT000006068553>
-  Légifrance. (2019, avril). *Article R122-13—Code de l'environnement*.
https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000038247366
-  Légifrance. (2025, avril). *Article L122-1—Code de l'environnement—Légifrance*.
https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000051560801
-  Légifrance. (2025, octobre 4). *Code de l'environnement—Légifrance*. Légifrance.
https://www.legifrance.gouv.fr/codes/texte_lc/LEGITEXT000006074220/
-  *L'industrialisation et ses conséquences*. (s. d.). Alloprof. Consulté 23 octobre 2025, à l'adresse <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/monde-contemporain/l-industrialisation-et-ses-consequences-h1078>
-  Liu, Y., van Nederveen, S., Wu, C., & Hertogh, M. (2018). Sustainable Infrastructure Design Framework through Integration of Rating Systems and Building Information Modeling. *Advances in Civil Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/8183536>
-  LOI n° 2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages, 2016-1087 (2016).
<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000033016237>
-  Louvel, J., Gaudillat, V., & Poncet, L. (2013). *EUNIS, European Nature Information System, Système d'information européen sur la nature. Classification des habitats (version 2012). Traduction française. Habitats terrestres et d'eau douce*.
-  Mainguy, G., & Zari, M. P. (2014). *Ecosystem Services Analysis in Response to Biodiversity Loss Caused by the Built Environment*.
-  Maxwell, S. L., Fuller, R. A., Brooks, T. M., & Watson, J. E. M. (2016). Biodiversity : The ravages of guns, nets and bulldozers. *Nature*, 536(7615), 143-145.
<https://doi.org/10.1038/536143a>
-  McHarg, I. L. (1969). *Design with nature*. Natural History Press.

- ✚ Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Iii, W. W. B. (1972). *A REPORT FOR THE CLUB OF ROME'S PROJECT ON THE PREDICAMENT OF MANKIND*.
- ✚ Mignard, C., & Nicolle, C. (2014). Merging BIM and GIS using ontologies application to urban facility management in ACTIVE3D. *Computers in Industry*, 65(9), 1276-1290. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2014.07.008>
- ✚ Ministère de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités locales. (2018). *Plan_bim_2022*.
- ✚ Mor, S. (2015). *Quel business model pour un intermédiaire de l'innovation dans le contexte du BIM ?* <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4840.4089>
- ✚ Moulherat, S. (2014). *Toward the development of predictive systems ecology modeling : MetaConnect and its use as an innovative modeling platform in theoretical and applied fields of ecological research* [Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier]. <http://thesesups.ups-tlse.fr/2668/>
- ✚ Moulherat, S. (2017). *Retour d'expérience du cas d'usage Infrastructures et environnement du projet national MINnD*. https://www.researchgate.net/publication/317585182_Retour_d%27experience_du_cas_d%27usage_Infrastructures_et_environnement_du_projet_national_MINnD
- ✚ Moulherat, S., Le Roux, D., de Roince, C., Barbier, M., & Delran, C. (2019). *Biodiversité, BIM et Infrastructures* (p. 52). https://fondation-ferrec.fr/wp-content/uploads/2020/03/AAP2018_BioBIM_livable.pdf
- ✚ Moulherat, S., Soret, M., Gourvil, P.-Y., Paris, X., & de Roince, C. B. (2023). Net loss or no net loss? Multiscalar analysis of a gas pipeline offset efficiency for a protected butterfly population. *Environmental Impact Assessment Review*, 100, 107028. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.107028>
- ✚ Moulherat, S., Teillagorry, M., & Jehan, F. (2022a). *Report on Application of BIM and other Tools to Standardise Data Record and Management* (No. D3.5; p. 75). BISON project. https://bison-transport.eu/wp-content/uploads/2022/09/D3.5_Report-on-Application-of-BIM-and-other-Tools-to-Standardise-Data-Record-and-Management.pdf

- ✚ Moulherat, S., Teillagorry, M., & Jehan, F. (2022b). *Report on Application of BIM and other Tools to Standardise Data Record and Management* (No. D3.5; p. 75). BISON project. https://bison-transport.eu/wp-content/uploads/2022/09/D3.5_Report-on-Application-of-BIM-and-other-Tools-to-Standardise-Data-Record-and-Management.pdf
- ✚ Newbold, T., Hudson, L. N., Hill, S. L. L., Contu, S., Lysenko, I., Senior, R. A., Börger, L., Bennett, D. J., Choimes, A., Collen, B., Day, J., De Palma, A., Díaz, S., Echeverria-Londoño, S., Edgar, M. J., Feldman, A., Garon, M., Harrison, M. L. K., Alhusseini, T., ... Purvis, A. (2015). Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, 520(7545), 45-50. <https://doi.org/10.1038/nature14324>
- ✚ NGUYEN, E. (2024, octobre 3). Le secteur de la construction en Europe. *Cartan Trade*. <https://cartantrade.fr/le-secteur-de-la-construction-en-europe/>
- ✚ Normandie, D. (2021, mars 1). *DepoBio : Le Dépôt légal des données brutes de biodiversité*. DREAL Normandie. <https://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr/depobio-le-depot-legal-des-donnees-brutes-de-a3132.html>
- ✚ Noss, R. F. (1990). Indicators for Monitoring Biodiversity : A Hierarchical Approach. *Conservation Biology*, 4(4), 355-364. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.1990.tb00309.x>
- ✚ notre-environnement. (2025, octobre 31). *Éviter, réduire, compenser » (ERC) : En quoi consiste cette démarche ?* notre-environnement. <https://www.notre-environnement.gouv.fr/>
- ✚ NOWICKI, F., Cerema, AUDIE-LIEBERT, G., BILLON, V., BRETAUD, J.-F., GUINARD, E., LE MITOUARD, E., THUILLIER, L., & Cerema. (2021). *Les passages à faune. Préserver et restaurer les continuités écologiques avec les infrastructures linéaires de transport* (Les références). Cerema. Bron. <https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/20803/les-passages-a-faune-preserver-et-restaurer-les-continuites-ecologiques-avec-les-infrastructures-lin>
- ✚ Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K. K. Y., & Rowe, B. (2007). Green Roofs as Urban Ecosystems :

- Ecological Structures, Functions, and Services. *BioScience*, 57(10), 823-833. <https://doi.org/10.1641/B571005>
- ✚ Pirdavani, A., Muzyka, S., Vandervoort, V., & Van Hoya, S. (2023). Application of building information modeling (BIM) for transportation infrastructure: A scoping review. *Transportation Research Procedia*, 73, 110-117. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.898>
- ✚ QUADRANT Conseil, SYSTRA, & a'urba - d'urbanisme Bordeaux Aquitaine. (2022, avril). *Synthèse Evaluation des impacts de la LGV Bordeaux—Paris sur les territoires de Nouvelle aquitaine*. <https://share.google/9i1iz4zXf3a4SlvzC>
- ✚ Renaudiere, P. (1991). La directive 85/337/CEE du 27 juin 1985 concernant l'évaluation des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement. In CEDRE (Centre d'étude du droit de l'environnement), *L'évaluation des incidences sur l'environnement : Un progrès juridique ?* (p. 15-24). Presses universitaires Saint-Louis Bruxelles. <https://doi.org/10.4000/books.pusl.13985>
- ✚ Rosell, C., Seiler, A., Chretien, L., Guinard, E., Hlavac, V., Moulherat, S., Fernandez, L. M., Georgiadis, L., Mot, R., Reck, H., Sangwine, T., Sjolund, A., Trocmé, M., Hahn, E., Bekker, H., Bil, M., Böttcher, M., O'Malley, V., Autret, Y., & van der Grift, E. A. (2023). *Biodiversity and Infrastructure. A Handbook for Action* (IENE-Infrastructure and Ecology Network Europe-BISON Project).
- ✚ Rytwinski, T., & Fahrig, L. (2012). Do species life history traits explain population responses to roads? A meta-analysis. *Biological Conservation*, 147(1), 87-98. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.11.023>
- ✚ Sanderson, E. W., Walston, J., & Robinson, J. G. (2018). From Bottleneck to Breakthrough: Urbanization and the Future of Biodiversity Conservation. *BioScience*, 68(6), 412-426. <https://doi.org/10.1093/biosci/biy039>
- ✚ Seiler, A., Teillagorry, M., Pichard, O., Wissman, J., Herold, M., Bartel, P., Pasturel, M., Moulherat, S., Bénard, F., Desplechin, C., & Ménard, S. (2022). *Report on emerging trends and future challenges* (No. D3.4; p. 125). BISON project. <https://bison->

transport.eu/wp-content/uploads/2022/09/D3.4_Report-on-emerging-trends-and-future-challenges.pdf

-  Seto, K. C., Güneralp, B., & Hutya, L. R. (2012). Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(40), 16083-16088. <https://doi.org/10.1073/pnas.1211658109>
-  SimOiko | la simulation au service de la biodiversité. (2024). <https://www.simoiko.fr/simoiko.php>
-  Sordello, R., Busson, S., Cornuau, J. H., Deverchère, P., Faure, B., Guetté, A., Hölker, F., Kerbirou, C., Lengagne, T., Le Viol, I., Longcore, T., Moeschler, P., Ranzoni, J., Ray, N., Reyjol, Y., Roulet, Y., Schroer, S., Secondi, J., Valet, N., ... Vauclair, S. (2022). A plea for a worldwide development of dark infrastructure for biodiversity – Practical examples and ways to go forward. *Landscape and Urban Planning*, 219, 104332. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104332>
-  Soret, M., Moulherat, S., Lenormand, M., & Luque, S. (2025). *Implication of modelling choices on connectivity estimation : A comparative analysis*. Ecological Complexity. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.09564>
-  TerrOiko. (2024). *Documentation technique du simulateur SimOiko*.
-  TerrOiko | Nos programmes de recherche et développement. (2025). <https://www.terroiko.fr/fr/recherche-et-developpement>
-  Thierry, C., Lesieur-Maquin, N., Fournier, C., Delzons, O., Gourdain, P., & Herard, K. (2020). Comment cartographier l'occupation du sol en vue de modéliser les réseaux écologiques ? Méthodologie générale et cas d'étude en Île-de-France. *Sciences Eaux & Territoires, Articles hors-série 2020*, Article Articles hors-série 2020. <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2020.HS.05>
-  UVED. (2021, avril). *Cours : La séquence Éviter Réduire Compenser*. <https://moodle.uved.fr/course/view.php?id=43>

-  van Eldik, M. A., Vahdatikhaki, F., dos Santos, J. M. O., Visser, M., & Doree, A. (2020). BIM-based environmental impact assessment for infrastructure design projects. *Automation in Construction*, 120, 103379. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103379>

-  van Gemert, S. (2019). *MPG-ENVIE : A BIM-based LCA application for embodied impact assessment during the early design stages*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16144.66567>

-  Vilgertshofer, S., Amann, J., Willenborg, B., Borrmann, A., & Kolbe, T. (2017). *Linking BIM and GIS Models in Infrastructure by Example of IFC and CityGML* (p. 140). <https://doi.org/10.1061/9780784480823.017>

-  Vincent, C. (2024). *Une écologie de circonstance ? Conceptions, transformations et effets de l'évaluation environnementale en France de 1976 à aujourd'hui*. UVSQ.

-  Wikipédia. (2025). Loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages. In *Wikipédia*. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Loi_pour_la_reconqu%C3%AAte_de_la_biodiversit%C3%A9_de_la_nature_et_des_paysages&oldid=227865049

-  Zhang, H., Cheng, C., & Miao, S. (2019). A Precise Urban Component Management Method Based on the GeoSOT Grid Code and BIM. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(3), 159. <https://doi.org/10.3390/ijgi8030159>

