



FONDATION D'ENTREPRISE

FEREC

OptiBioNum - Optimisation de la capacité d'accueil de biodiversité des bâtiments et ouvrages par l'usage d'indicateurs écologiques standardisés embarqués dans les maquettes numériques.

Fondation d'entreprise FEREC

Appel à projets 2024

« Biodiversité et aménagements »



Sylvain Moulherat

TERROÏKO, SOCIETE DES GRANDS PROJETS

SOMMAIRE

1.	Résumé non technique	3
2.	Préambule – Les ambitions du projet	4
2.1.	Présentation du projet	4
2.2.	Contexte	4
2.3.	Description du projet	4
2.4.	Contribution à un ou plusieurs défis	6
2.5.	Les potentiels d'application pour le secteur des infrastructures, les usages, l'exploitation	6
3.	Resultats des travaux	6
3.1.	Ecologie du paysage du GPE	7
3.1.1.	Périmètre des travaux d'écologie du paysage	7
3.1.2.	Analyse de la structure paysagère	8
3.1.3.	Approche standardisée par guildes fonctionnelles	11
3.1.4.	Simulations numériques et fonctionnement des réseaux écologiques	13
3.1.5.	Sélection des sites démonstrateurs et calcul des indicateurs de référence	16
3.2.	Intégration du calcul des indicateurs au sein des maquettes des infrastructures	21
3.2.1.	Définition du cas d'usage et construction du BPMN associé	21
3.2.2.	Fédération des maquettes SIG écologiques et BIM sur le site de Champigny	24
3.2.3.	Modélisation des scénarios d'aménagement	26
3.2.4.	Calcul des indicateurs de performances	27
3.2.5.	Généralisation du processus à l'ensemble des sites de démonstration	28
4.	Conclusion de synthèse	31
5.	Valorisation du projet	31
6.	Poursuite des travaux	33
6.1.	REMEDY – Restoration and modelling of ecosystem dynamics	33
6.2.	RESTORE –	34
7.	Références	36

1. RESUME NON TECHNIQUE

OptiBioNum vise à embarquer dans la maquette numérique de bâtiments, ouvrages ou infrastructures, des indicateurs standardisés permettant d'en optimiser la conception ou le retrofiting au regard de leur capacité d'accueil de la biodiversité. L'utilisation de tels indicateurs au sein de maquettes numériques sera à même de permettre de réaliser de manière plus fine l'évaluation des capacités d'accueil de bâtiments ou d'infrastructures pour la biodiversité et d'optimiser la qualité environnementale de ces projets dès les phases les plus amonts.

OptiBioNum, à partir d'une base de données sur l'écologie de 806 espèces représentatives des principaux réseaux écologiques métropolitains, a permis de déterminer 70 écotypes standardisés mobilisables pour tout projet de construction. Ces 70 écotypes sont alors utilisés pour conduire des simulations de dynamiques populationnelles utilisées pour calculer des indicateurs de performances écologiques de constructions. Ces indicateurs permettent notamment de mettre en avant la diversité d'espèces sur le site, le rôle du site dans les réseaux écologiques alentours et la capacité des espèces à le coloniser.

En se basant sur l'étude de cas de gares et centres d'exploitation du Grand Paris Express^{*}, OptiBioNum a pu intégrer les éléments nécessaires à l'évaluation de ces indicateurs (données d'entrée des modèles) ainsi que les valeurs représentatives des performances écologiques des sites de démonstration dans leurs maquettes BIM. OptiBioNum a ainsi pu tester les performances écologiques de différents scénarios d'aménagement des ouvrages étudiés et ainsi préparer les spécifications techniques pour le développement de logiciels interopérables permettant l'automatisation de ces évaluations de performances écologiques.

Le projet OptiBioNum a ainsi permis par sa mise en œuvre de démontrer que le thème de la biodiversité peut être intégrée dans une démarche BIM d'infrastructure de transport et que ce thème peut constituer une dimension mesurable et pilotable du projet. Bien que le projet se soit focalisé sur les gares et centres techniques du GPE, les méthodes et outils mis en œuvre sont scalables et peuvent être appliqués directement à l'échelle de l'infrastructure ou du territoire en mobilisant une large diversité d'indicateurs de performance écologique.

Les résultats prometteurs du projet ont permis à l'équipe projet de participer à 2 consortiums européens qui, s'ils voient leurs projets financés par la Commission Européenne, pourront poursuivre les travaux d'OptiBioNum en réalisant les travaux techniques relictuels permettant d'industrialiser les processus initiés ici et ainsi poursuivre l'intégration des métiers de la biodiversité dans les processus BIM supportant la conception et l'exploitation des infrastructures de transports.

^{*} Le Grand Paris Express (GPE) est un programme de métros automatiques visant à relier entre eux les grands pôles stratégiques de la région Ile-de-France, tout en les connectant avec le centre de l'agglomération parisienne. Le projet prévoit la réalisation de quatre nouvelles lignes (15, 16, 17 et 18) et le prolongement de la ligne 14. Les mises en service des lignes de métro 15, 16, 17 et 18 s'échelonneront entre 2026 et 2031. Le réseau complet totalise environ 200 km de tracé majoritairement en souterrain et compte soixante-huit gares.

2. PREAMBULE – LES AMBITIONS DU PROJET

2.1. Présentation du projet

RÉSUMÉ

OptiBioNum vise à embarquer dans la maquette numérique de bâtiments, ouvrages ou infrastructures des indicateurs standardisés permettant d'en optimiser la conception ou le retrofiting au regard de leur capacité d'accueil de la biodiversité. L'utilisation de tels indicateurs au sein de maquettes numériques sera à même de permettre de réaliser de manière plus fine l'évaluation des capacités d'accueil de bâtiments ou d'infrastructures pour la biodiversité et d'optimiser la qualité environnementale de ces projets dès les phases les plus amonts.

2.2. Contexte

Dans un contexte où la prise en compte de la biodiversité dans la conception et l'adaptation des territoires, villes et leurs infrastructures prend une importance croissante, les besoins de comparabilité entre variantes de projets et entre projets s'accroissent (Moulherat et al. 2022, Seiler et al. 2022). Pour répondre à ce besoin, un certain nombre de labels se sont développés, mais peinent à rendre compte efficacement des volets portant sur les continuités écologiques des espaces concernés (Catalano et al. 2021). Dans la continuité du projet BioBIM (Moulherat et al. 2019), OptiBioNum vise à utiliser la simulation numérique pour développer des indicateurs relatifs au fonctionnement des réseaux écologiques robustes, reproductibles et comparables entre variantes au sein de maquette numérique d'infrastructure (Catalano et al. 2021, Moulherat et al. 2022). L'utilisation de tels indicateurs sera à même de permettre de réaliser de manière plus fine l'évaluation des capacités d'accueil de bâtiments ou d'infrastructures pour la biodiversité et d'optimiser la qualité environnementale de ces projets dès les phases les plus amonts.

2.3. Description du projet

Les approches de simulations numériques offrent l'opportunité de produire des évaluations du fonctionnement des réseaux écologiques standardisées mobilisables très tôt dans la conception de projet, qu'il s'agisse de nouveau projet ou de projet d'aménagement de l'existant (Catalano et al. 2021, Djema 2022). Elles permettent en outre de scénariser les variantes de projets afin de pouvoir les comparer de manière standardisée (Moulherat 2017). Ainsi, TerrOïko conduit depuis 2022 des travaux exploratoires sur le développement d'indicateurs standardisés à l'échelle nationale dérivés de résultats de simulations numériques permettant une comparaison objective des performances en matière d'accueil de la biodiversité à l'échelle de collectivités ou de quartiers. À ce stade, ce sont des indicateurs représentatifs du rôle d'un quartier ou de sous-ensemble de lots aménagés ou aménageables au fonctionnement des trames vertes qui sont produits (Figure 1). Les indicateurs de « potentiels d'accueil » ont par exemple vocation à évaluer hors contexte paysager, la capacité du projet à accueillir une diversité d'espèces. D'autres indicateurs comme ceux portant sur la « responsabilité » du site mettent en avant l'importance du site dans le fonctionnement du réseau écologique, et ce en présence ou non de pressions anthropiques telles que l'éclairage ou les

nuisances sonores. Ces indicateurs, aujourd'hui encore expérimentaux, demandent à être affinés et ajustés pour être applicables à l'échelle de bâtiment ou d'infrastructures linéaires ce qui constituera la première tâche du projet.

Au-delà des besoins d'adaptation des indicateurs pour descendre à l'échelle du bâtiment ou s'adapter à la structure linéaire des réseaux de transports, le projet OptiBioNum va devoir faire face au besoin d'utilisation de maquettes numériques hybrides SIG et BIM permettant d'une part l'intégration explicite des éléments 3D dans l'évaluation des indicateurs à l'échelle des bâtiments et de travailler sur le rôle des éléments de fine échelle (BIM) au sein de réseau écologique défini à large échelle (SIG) (Moulherat et al. 2022). Dans cette perspective, la seconde tâche d'OptiBioNum consistera à automatiser et embarquer les traitements nécessaires à l'évaluation des indicateurs issus de la tâche 1 dans l'outil open source de TerrOiko (*Ecological Engineering Studio* (EES)) disposant notamment déjà de fonctionnalités de représentation et de manipulation des objets SIG et BIM dans un même environnement de travail.

Enfin, la troisième tâche du projet consistera à réaliser un démonstrateur sur des gares et/ou centres techniques du Grand Paris Express (GPE). Pour ce faire, les maquettes BIM génériques de gares et centres techniques dont dispose la Société des grands projets (SGP) seront mises en situation le long d'un gradient d'urbanisation dans un périmètre d'environ 5 km autour des sites considérés. Chaque gare ou centre technique existant sera remplacé virtuellement par les maquettes génériques qui bénéficieront de 2-4 variantes (à titre indicatif : surfaces végétalisées, aménagements des parvis, mode d'éclairage, etc. – ces éléments feront l'objet d'un cadrage en début de projet). Les indicateurs seront alors calculés et intégrés à chacune des maquettes génériques.

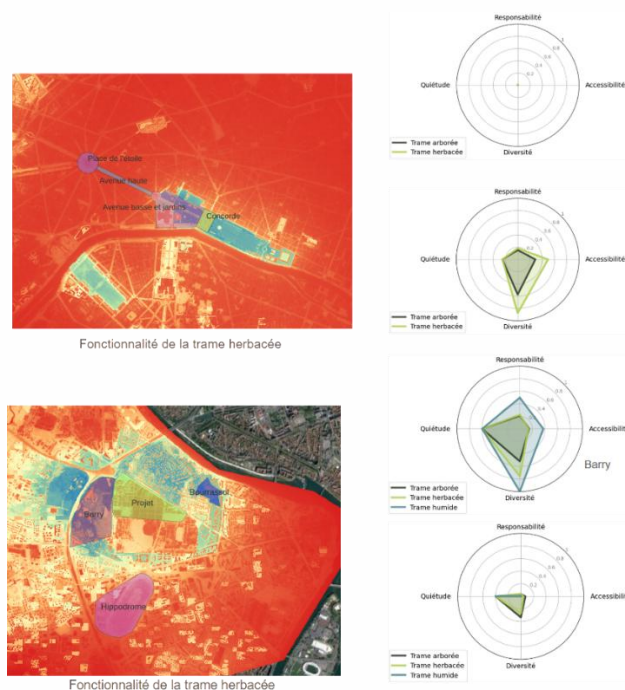


Figure 1 : Illustration de l'utilisation des indicateurs dérivés de simulation numérique à un projet de réaménagement des Champs-Élysées et à un projet d'écoquartier à Toulouse.

2.4. Contribution à un ou plusieurs défis

Le projet OptiBioNum vise à produire des indicateurs permettant d'évaluer les rapports de coûts-bénéfice financiers et pour la biodiversité à l'aide d'outils numériques utilisés par les maîtres d'ouvrage, concepteurs et gestionnaires d'infrastructures. À ce titre le projet contribue aux défis :

- De développement et généralisation des pratiques du développement durable.
- D'utilisation de la transition numérique comme une opportunité pour le secteur.
- D'adaptation des coûts de construction et de maintenance des infrastructures.

2.5. Les potentiels d'application pour le secteur des infrastructures, les usages, l'exploitation

Sans se substituer aux besoins de réalisation d'expertises terrains spécifiques, 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 préfiguration 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 OptiBioNum sont transposables à d'autres secteurs d'activités tels que l'aménagement du territoire ou l'immobilier.

3. RESULTATS DES TRAVAUX

De par sa nature, le projet OptiBioNum a été mis en œuvre en deux temps principaux faisant intervenir deux blocs de compétences distincts qui ont été rapprochés en fin de projet. Le présent document présente les méthodes et résultats synthétiques du projet. Les détails méthodologiques et techniques sont disponibles dans les Annexes I et II du projet correspondant aux travaux des étudiants mobilisés sur le programme.

Dans un premier temps, des travaux d'écologie du paysage ont été conduits avec le support d'un stage de M2 en écologie (Annexe I) visant à développer une approche standardisée d'évaluation du fonctionnement écologique aux abords des infrastructures étudiées. Dans un second temps, des travaux de BIM ont été réalisés pour intégrer les

travaux d'écologie du paysage aux maquettes de gares et centre technique du Grand Paris Express existantes. Ces travaux ont été réalisés avec le support d'un alternant de master spécialisé (Annexe II). Enfin, à la croisée des deux disciplines, des scénarios alternatifs d'aménagements des ouvrages, visant à en améliorer les performances écologiques, ont été modélisés (modélisation du bâtiment et de ses abords et simulation des conséquences écologiques de ces aménagements) pour en tester les performances écologiques relatives (Annexe II). L'articulation entre les 2 champs disciplinaires est résumée dans la Figure 2.

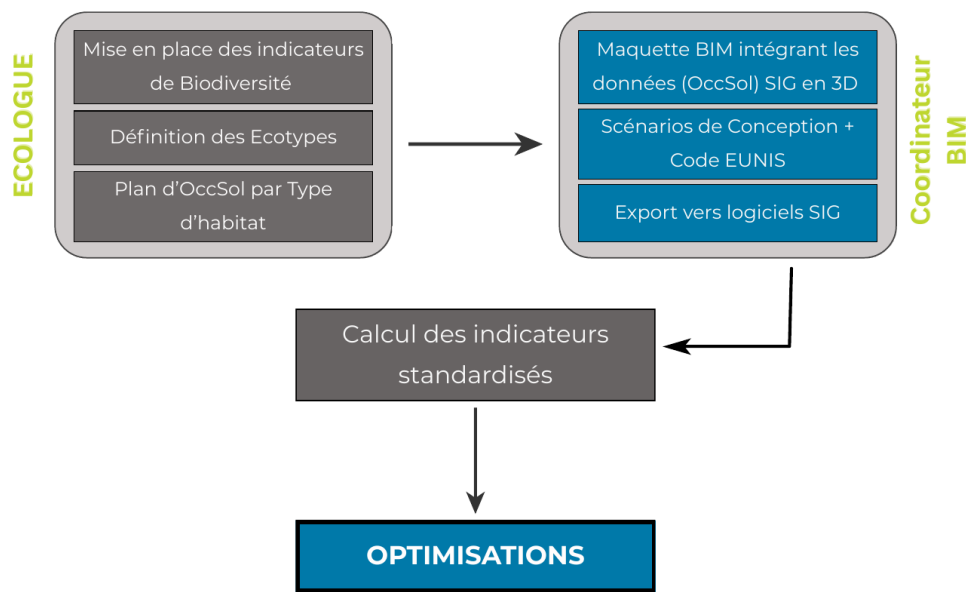


Figure 2 : Répartition des tâches entre les champs disciplinaires mobilisés dans OptiBioNum.

3.1. Ecologie du paysage du GPE

3.1.1. Périmètre des travaux d'écologie du paysage

L'analyse du fonctionnement écologique a été réalisée à l'échelle du territoire traversé par le Grand Paris Express (GPE) dans un périmètre de 5 km autour du tracé des lignes et gares du réseau GPE (Zone d'étude étendue (ZEE), Figure 3).

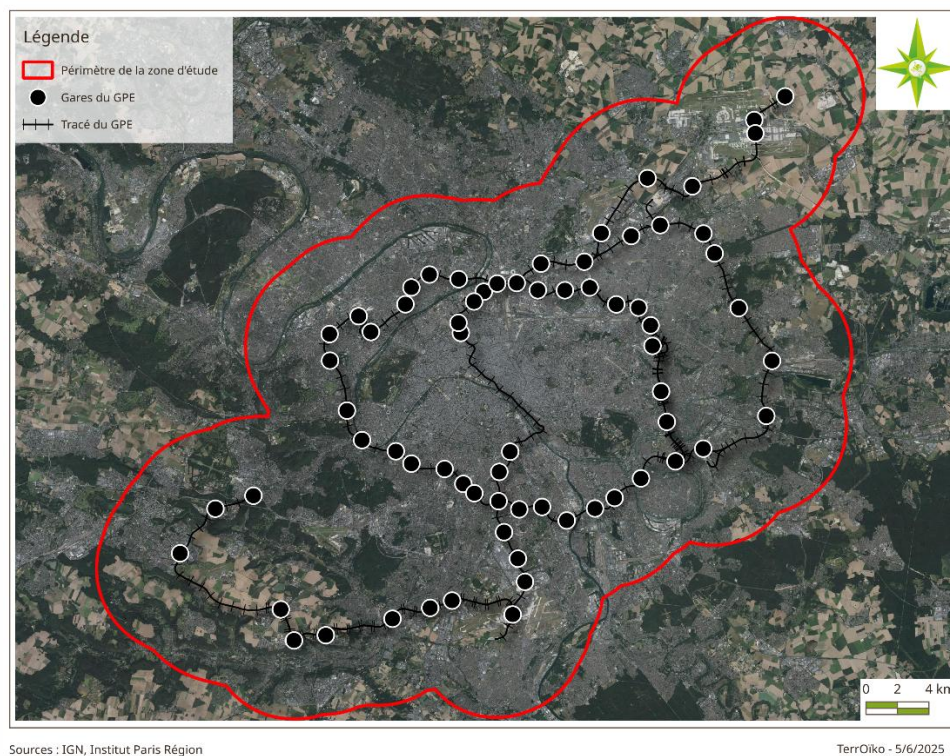


Figure 3 : Zone d'étude étendue (ZEE) du fonctionnement des réseaux écologiques aux abords du GPE.

3.1.2. Analyse de la structure paysagère

CONSTRUCTION DE LA CARTOGRAPHIE DES MILIEUX NATURELS

A l'échelle de la ZEE, une cartographie des milieux naturels a été établie à partir des données disponibles en accès libre (Tableau 1) et utilisant la typologie standard européenne EUNIS (Figure 4). Cette cartographie des milieux naturels répond à un double besoin pour le projet :

- Identifier les gares ou ouvrages les plus pertinents à étudier dans un contexte BIM suivant un gradient d'urbanisation (sélection de gares dans des milieux très densément urbanisés et d'autres dans des milieux plus naturels).
- Constituer la base des simulations numériques de dynamiques de populations d'espèces à la base des indicateurs de performances écologiques utilisés dans le projet.

Tableau 1 : Sources de données utilisées pour la constitution de la cartographie des milieux naturels standardisée utilisée dans le projet OptiBioNum.

Source	Type / Nom du jeu de données	Notes
Conservatoires d'espaces naturels, associations naturalistes, DREAL, Région, EPCI, communes, syndicats de rivière, PNR, PN, AFB, Fédérations des chasseurs, Fédérations de pêche, SAGE, SDAGE, Observatoires de biodiversité, etc.	Informations globales ou ponctuelles avec une résolution de digitalisation fine	Il peut s'agir d'une occupation du sol à l'échelle du département par exemple ou bien des données de localisation de mares, de haies, de zones humides, prairies calcicoles, etc.
IGN	BD Topo	Bâti, éléments anthropiques (parking, poste de transformation, etc.), réseau routier, réseau ferré, réseau hydrographique (distinction des eaux courantes et eaux stagnantes), réseau de haies, zones de végétation.
Institut Paris Région	MOS	Mode d'occupation du sol, 11 postes (2021)
Institut Paris Région	ECOMOS	Cartographie des milieux naturels. Complète le MOS
Institut Paris Région	ECOLINE	Éléments surfaciques, linéaires et ponctuels de biodiversité des paysages. Complète le MOS et ECOMOS

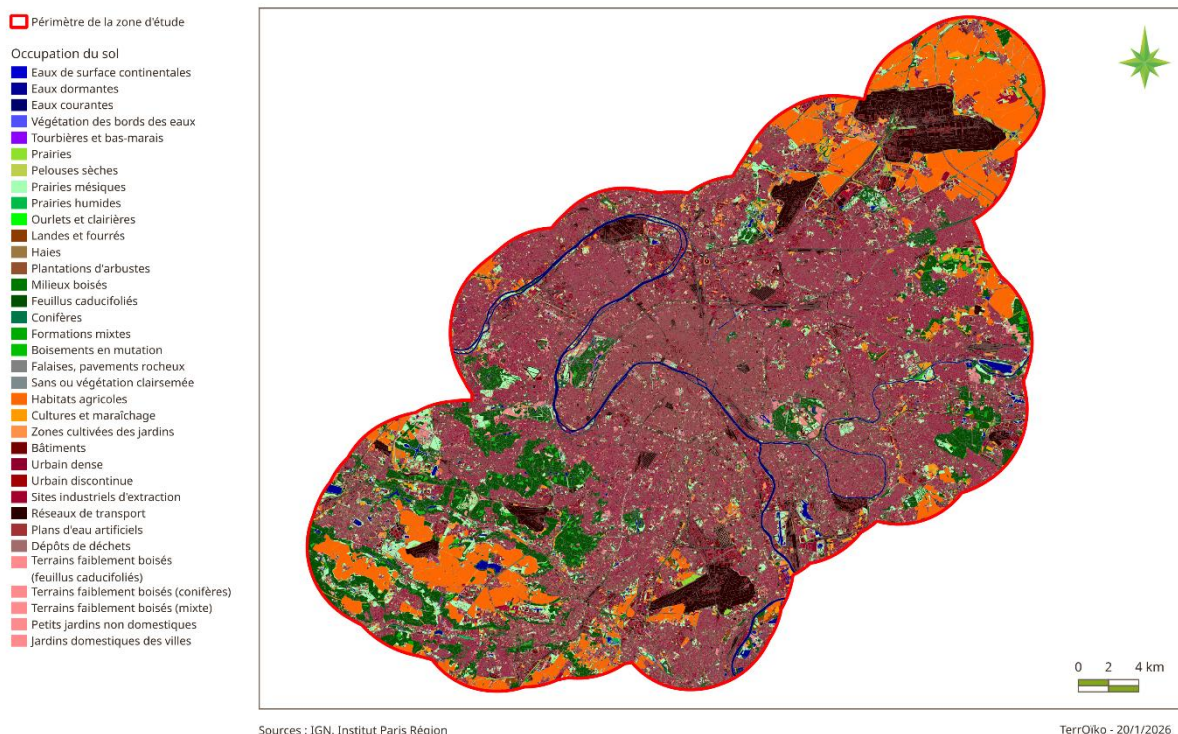


Figure 4 : Cartographie des milieux naturels de la ZEE du projet OptiBioNum (représentation simplifiée au niveau EUNIS 2 pour plus de lisibilité).

ANALYSE PAYSAGERE STRUCTURELLE POUR LA SELECTION DES GARES D'INTERET

Afin de bénéficier de contextes naturels contrastés pour sélectionner les gares d'intérêts pour le projet, une analyse de la structure paysagère à l'échelle de la ZEE a été réalisée. Une grille à mailles hexagonales de 1 250 m de côté a été générée à l'échelle de la ZEE. Pour chaque maille, 20 variables descriptives du paysage ont été calculées (proportion de chaque milieu naturel par maille et distance du centre de la maille à chaque type de milieu naturel considéré). L'analyse en composante principale (ACP) des caractéristiques paysagères de chaque maille montre que le premier axe, portant plus de 20 % de la variance des données, est largement dominé par le gradient d'urbanisation et c'est donc sur la base de coordonnées des mailles sur ce premier axe que le gradient d'urbanisation, support de la sélection des gares d'intérêts, a été représenté (Figure 5).

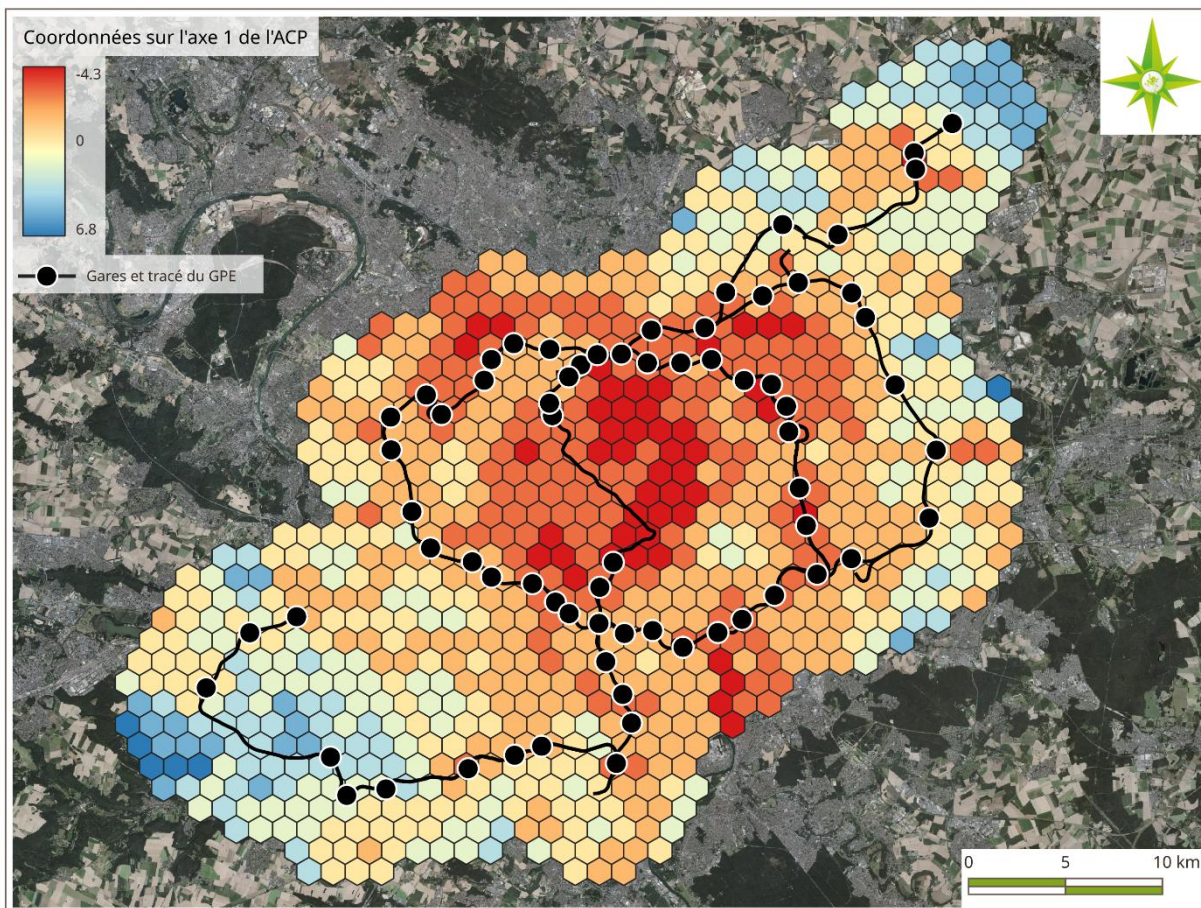


Figure 5 : Localisation du tracé du GPE et de ses gares le long du gradient d'urbanisation représenté dans des mailles hexagonales de 1250 m de côté.

3.1.3. Approche standardisée par guildes fonctionnelles

APPROCHE PAR HABITAT (SOUS-TRAME)

Dans la perspective d'une approche standardisée à l'échelle nationale, OptiBioNum a adopté une approche par sous-trame classiquement utilisée pour les études de fonctionnement de réseaux écologiques lors de l'élaboration des documents de planification territoriale ou les études d'impacts. Le projet s'est donc focalisé à traiter les sous-trames obligatoires[†] forestières, ouvertes et humides et y a ajouté celles des milieux agricoles, urbains et semi-ouverts (friches) particulièrement intéressantes dans le cadre de projets d'infrastructures urbaines.

CONSTRUCTION D'UNE BASE DE DONNEES DE TRAITS D'HISTOIRE DE VIE

Une fois ces 6 sous-trames qualifiées, une recherche bibliographique a permis de constituer une base de données des traits d'histoire de vies (caractéristiques des espèces comprenant notamment leurs caractéristiques démographiques, de déplacement et d'habitat naturel) de mammifères, oiseaux, amphibiens, reptiles et pollinisateurs

[†] N.B. : la sous-trame obligatoire des milieux littoraux n'a pas été traitée dans OptiBioNum et devra faire l'objet de travaux complémentaires pour une transposition complète de l'approche sur des sites d'aménagements littoraux.

terrestres européens. Une base de données de traits d'histoire de vie de 806 espèces a donc été constituée à partir de 68 bases de données sources.

CONSTRUCTION DES GUILDES FONCTIONNELLES

Pour chaque groupe taxonomique associé à chaque sous-trame, une analyse de clustering a été conduite pour grouper les espèces les plus semblables et constituer des guildes fonctionnelles (Figure 6). Chaque dendrogramme a été analysé pour identifier le nombre de guildes à conserver présentant le rapport le plus pertinent entre nombre de guildes, différences entre guildes et nombre d'espèces par guildes afin d'assurer la représentativité des guildes ainsi construites.

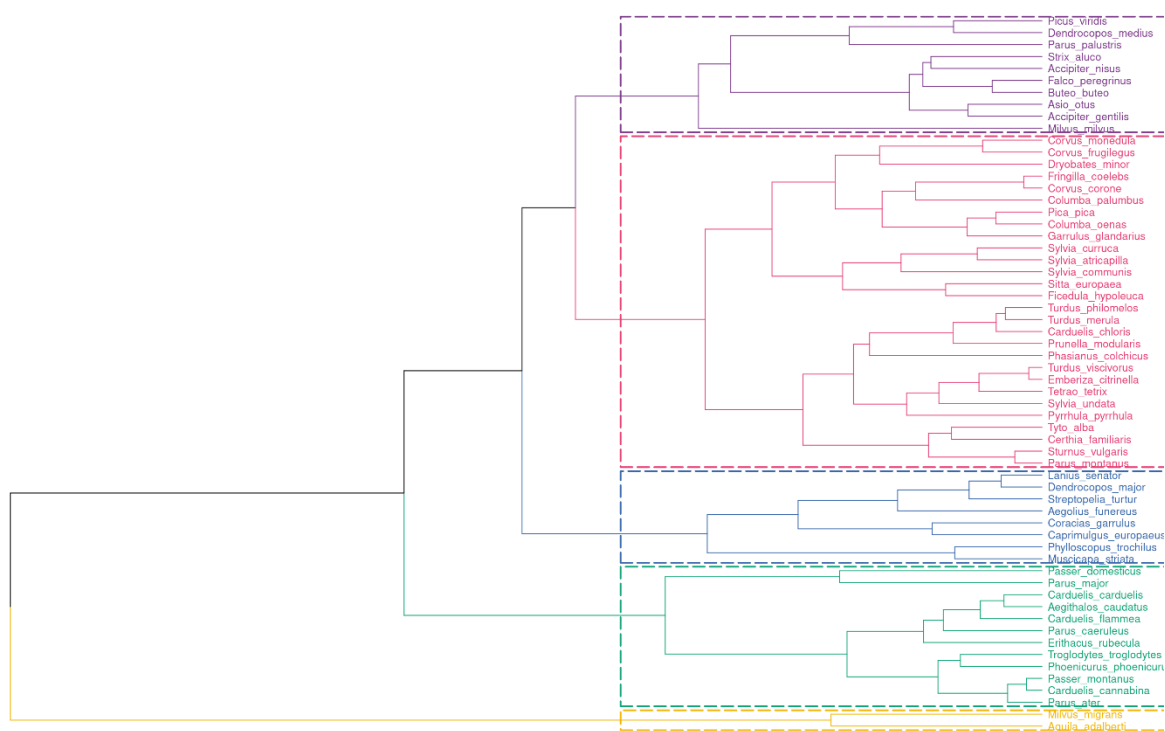


Figure 6 : Exemple de résultat de clustering à 5 guildes obtenu pour les oiseaux forestiers. Chaque espèce est associée aux espèces les plus semblables fonctionnellement pour constituer une guildes représentée par une couleur.

A partir de l'ensemble des espèces constitutives d'une guildes, une « espèce moyenne » ou écotype est construit. Cette espèce correspond au centroïde de l'ellipse correspondant à la guildes considérée dans l'ACP réalisée à partir des traits d'histoires de vie du taxon considéré dans le milieu traité (Figure 7). La position du centroïde de l'ellipse de chaque guildes permet de calculer les traits d'histoire de vie moyens associés à l'écotype de la guildes (Prima et al. 2024).

Ce sont ainsi 70 guildes fonctionnelles représentatives des 6 sous-trames étudiées qui ont été construites et pour lesquelles un écotype a été configuré. Ces 70 guildes sont applicables à l'ensemble des habitats terrestres européens, assurant une forte comparabilité entre sites à cette échelle.

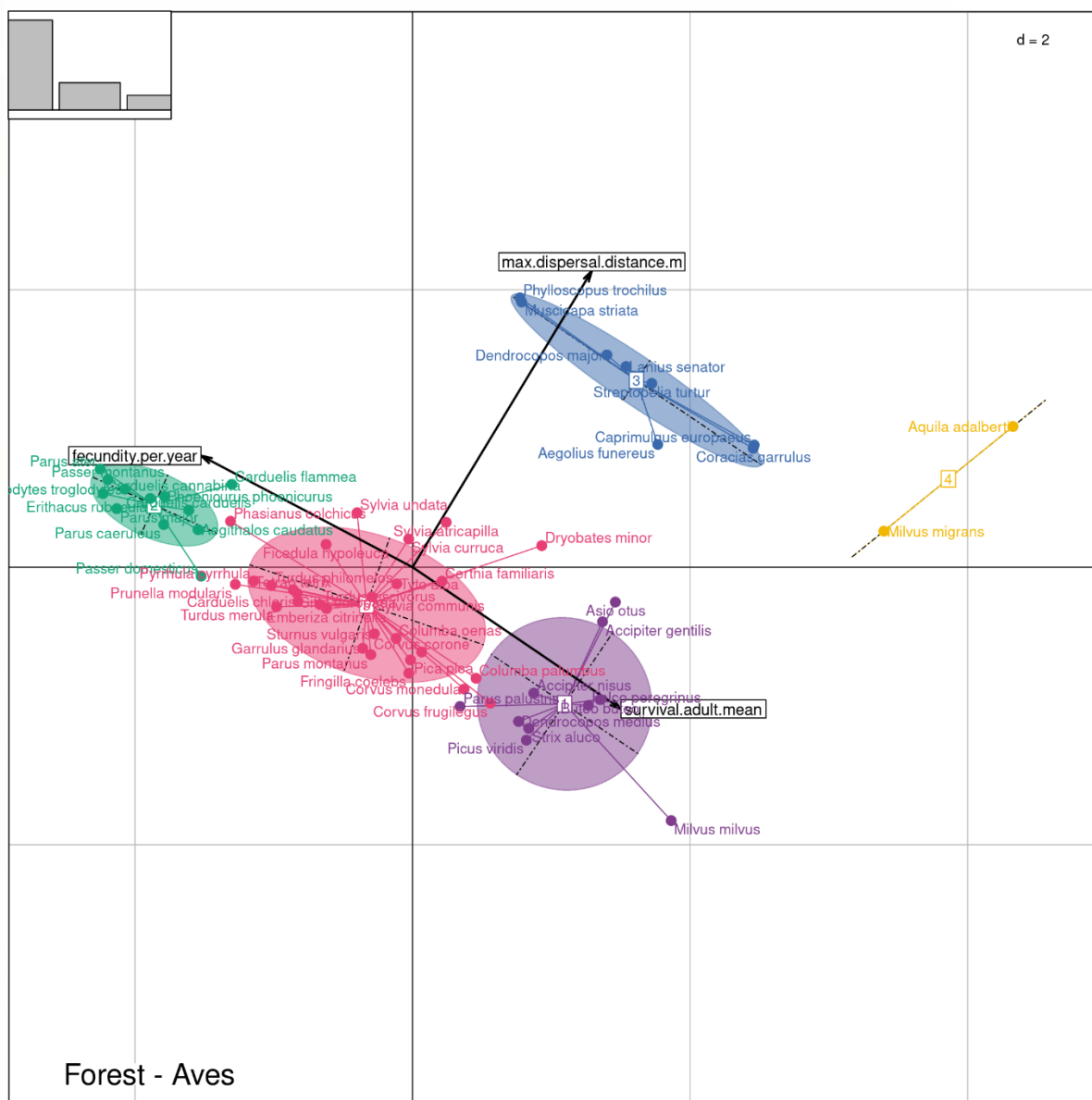


Figure 7 : Représentation des guildes fonctionnelles dans le premier plan factoriel de l'ACP sur les traits d'histoires de vie des oiseaux forestiers.

3.1.4. Simulations numériques et fonctionnement des réseaux écologiques

OptiBioNum se focalise sur l'intégration d'indicateurs dérivés des résultats de simulation réalisées avec SimOïko car sa version expérimentale actuelle est le seul modèle existant capable de réaliser des simulations 3D explicite industrialisées et utilisées dans le cadre de travaux de planification territoriale, études d'impacts, etc. C'est aussi le seul modèle moderne qui ait formellement démontré sa capacité à reproduire le fonctionnement des populations animales à haute résolution (Moulherat 2025). SimOïko constitue donc à ce titre un modèle particulièrement intéressant pour travailler sur la convergence technique entre SIG et BIM. Toutefois, les indicateurs dérivés des résultats de SimOïko peuvent être remplacés ou complétés par d'autres indicateurs de

performances issues d'autres sources dans les processus mis en place et décrit par OptiBioNum.

ETAT ACTUEL DE REFERENCE DES INDICATEURS

SimOïko est un simulateur de dynamique de populations multi-agent spatialement explicite qui, à partir de la cartographie des milieux naturels d'un territoire et des traits d'histoire de vie d'une espèce, permet d'estimer le fonctionnement de populations d'espèces cibles (probabilité d'extinctions, tailles de populations, déplacements d'individus, fonctionnement de réseaux écologiques, etc.).

Dans OptiBioNum, 40[‡] écotypes représentatifs de guildes ont fait l'objet de simulations à l'échelle de la ZEE à une résolution spatiale de 5 m (Figure 8). Les indicateurs de performances *Diversité*, *Accessibilité* et *Responsabilité* sont alors calculés à partir des résultats de simulations à l'espèce puis agrégés à l'échelle de la sous-trame.

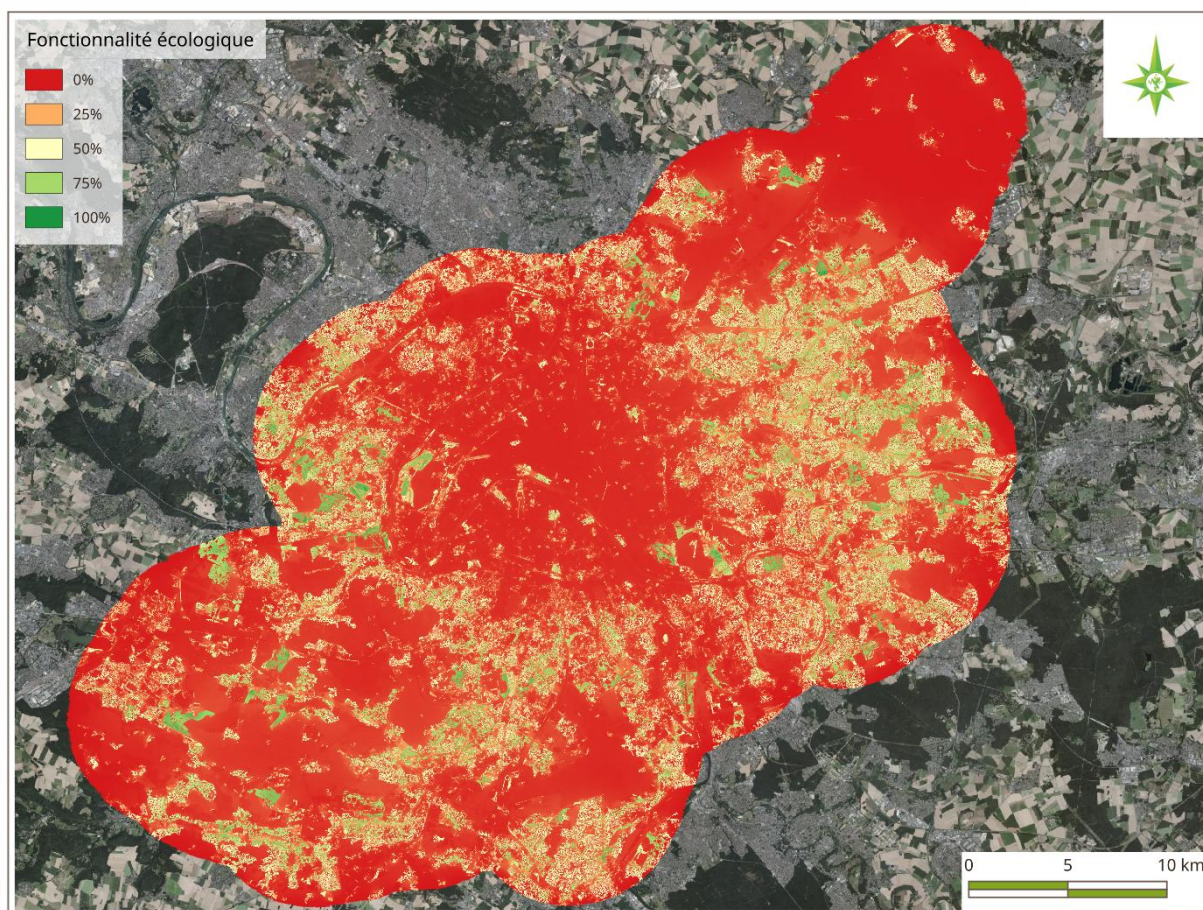


Figure 8 : Fonctionnalité écologique générale (résultats agrégés des 40 écotypes) à l'échelle de la ZEE.

Diversité : cet indicateur, calculé uniquement à l'échelle de la sous-trame, rend compte du nombre d'écotypes susceptibles de se maintenir (probabilité d'extinction locale < 0,8)

[‡] Bien que 70 guildes aient été identifiées, seules 40 ont fait l'objet de simulations faute de temps/budget sur le projet.

dans un périmètre donné. Il représente la proportion d'écotypes se maintenant parmi les écotypes simulés de la sous-trame.

Accessibilité : l'indicateur rend compte de la capacité du site (z) étudié à échanger des individus (n_{vc}) avec les espaces associés à la sous-trame considérée (n_v) dans un rayon (r) de 1 km. L'accessibilité (A) est calculée telle que :

$$A_{(z,r)} = \frac{n_{vc(z,r)}}{n_v(z,r)}$$

Responsabilité : est un indicateur composite qui rend compte de l'importance du site dans le réseau écologique (centralité intermédiaire du site z $C_{(z)}$) au regard de la population d'individus ($P_{(z)}$) qu'il abrite par rapport à la population existante dans le rayon r de 1 km ($PT_{(z,r)}$) abritée dans l'ensemble des patches d'habitats favorables dans le rayon de 1 km autour du site z (Nt). La responsabilité (R) est donc calculée telle que :

$$R_{(z,r)} = \frac{P_{(z)}}{PT_{(z,r)}} + \frac{C_{(z)}}{(Nt - 1)(Nt - 2)}$$

INDICATEUR DE QUIETUDE

L'indicateur *Quiétude* est un indicateur de pressions s'exerçant sur les écotypes du site. A ce stade, cet indicateur simple prend en considération les nuisances lumineuses et sonores jouant un rôle connu sur la composition et la fonctionnalité des populations d'espèces qui y sont soumises (Sordello et al. 2025). L'indicateur est construit comme la moyenne des valeurs de pressions normalisées, la pollution lumineuse ($PL_{(z)}$, Figure 9) étant exprimée à travers le calcul du NSB⁵ (*Night Sky Brightness*) (Deverchère et al. 2022) et la pollution sonore ($PS_{(z)}$) en Ln et $Lden$ (Moulherat et al. 2023). L'indicateur de *Quiétude* (Q), est alors calculé tel que :

$$Q_{(z)} = \frac{1}{2}((1 - PL_z) + (1 - PS_z))$$

⁵ Dans le cadre du projet OptiBioNum, seule la pollution lumineuse a été considérée sur la base des travaux réalisés par la Métropole du Grand Paris. BruitParif a refusé de partager les données brutes de Ln et $Lden$ nécessaires au travaux (Moulherat et al. 2023).

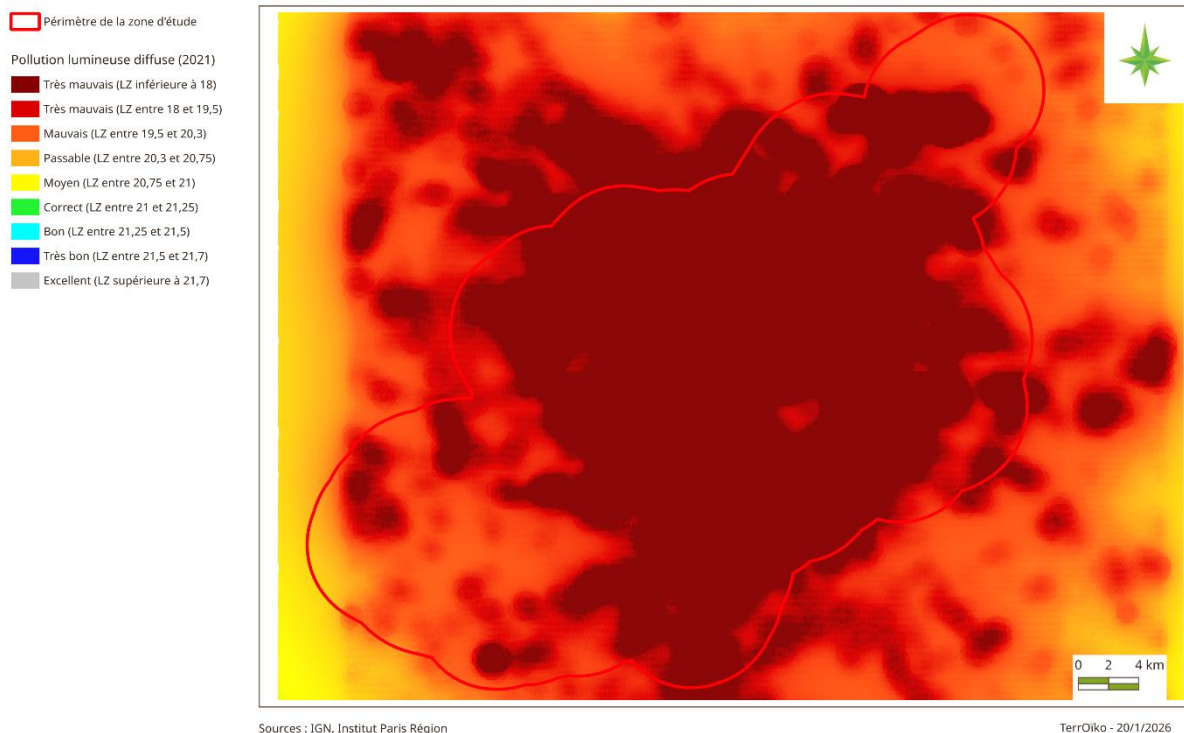


Figure 9 : Pollution lumineuse sur la ZEE représentée par la NSB estimée par Dark Sky Lab pour la Métropole du Grand Paris (2023)

3.1.5. Sélection des sites démonstrateurs et calcul des indicateurs de référence

Quatre sites de démonstration ont été sélectionnés lors d'un atelier interne au projet. Les sites ont été sélectionnés au regard des critères suivants :

- positionnement dans les réseaux écologiques et notamment au regard du gradient d'urbanisation (Figure 5),
- stratégies spécifiques de sites au regard des enjeux biodiversité,
- opportunité d'aménagement, modifications marginales des projets ou infrastructures existantes,
- accessibilité des maquettes BIM.

Chaque site a dès lors bénéficié de scénarios visant à optimiser son impact sur la biodiversité au regard du contexte de fonctionnement des réseaux écologiques alentours, et les indicateurs de performance écologique de référence (état actuel incluant les infrastructures construites dans certains cas) ont été calculés. Quatre sites ont ainsi été sélectionnés et étudiés.

LE CENTRE D'EXPLOITATION DE CHAMPIGNY

Le centre d'exploitation de Champigny se situant dans un secteur de forte densité urbaine, bénéficie d'une toiture végétalisée intégrant un système de potagers urbains

(Figure 10). Toutefois, ce type de milieu semble ne présenter qu'un intérêt modéré d'un point de vue écologique au regard des milieux alentours et du fonctionnement des réseaux écologiques. Un scénario alternatif consistant à modéliser un couvert de type forestier plutôt que de potagers a été simulé dans le cadre du projet OptiBioNum.



Figure 10 : Vue d'après projet du centre d'exploitation de Champigny couvert de potagers (source SGP).

En l'état et au regard du contexte écologique du site, ses performances sont limitées (Figure 11) dans la mesure où le site ne contribue que marginalement au fonctionnement de la sous-trame semi-ouverte (les potagers y sont associés).

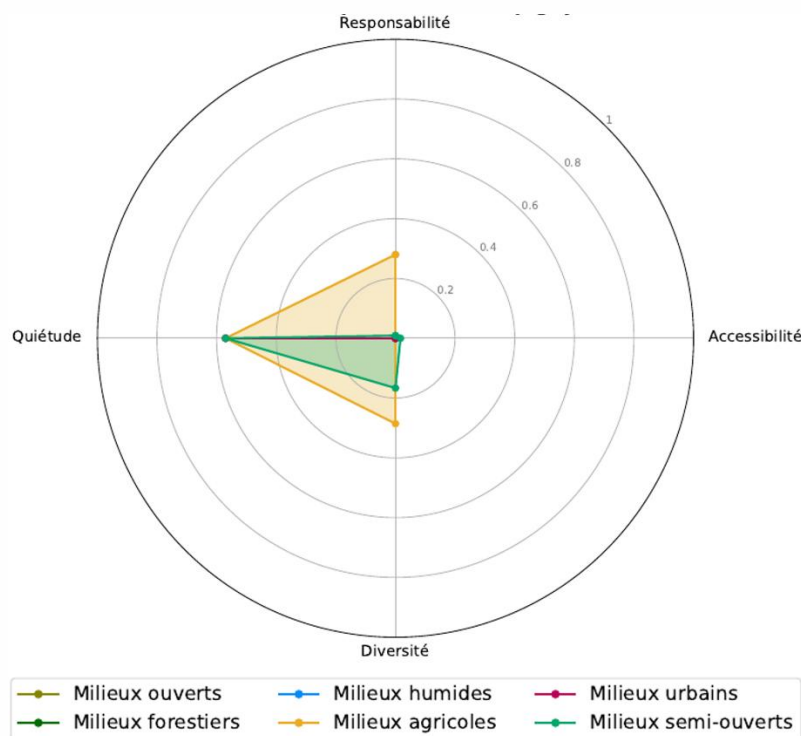


Figure 11 : Performance écologique de référence du centre d'exploitation de Champigny.

LA GARE DE CLICHY MONTFERMEIL

La gare de Clichy-Montfermeil présente une minéralisation importante (Figure 12), mais qui se situe le long d'un axe de déplacement particulièrement intéressant pour les espèces de milieux ouverts et forestiers avec la proximité de la promenade de la Dhuis.

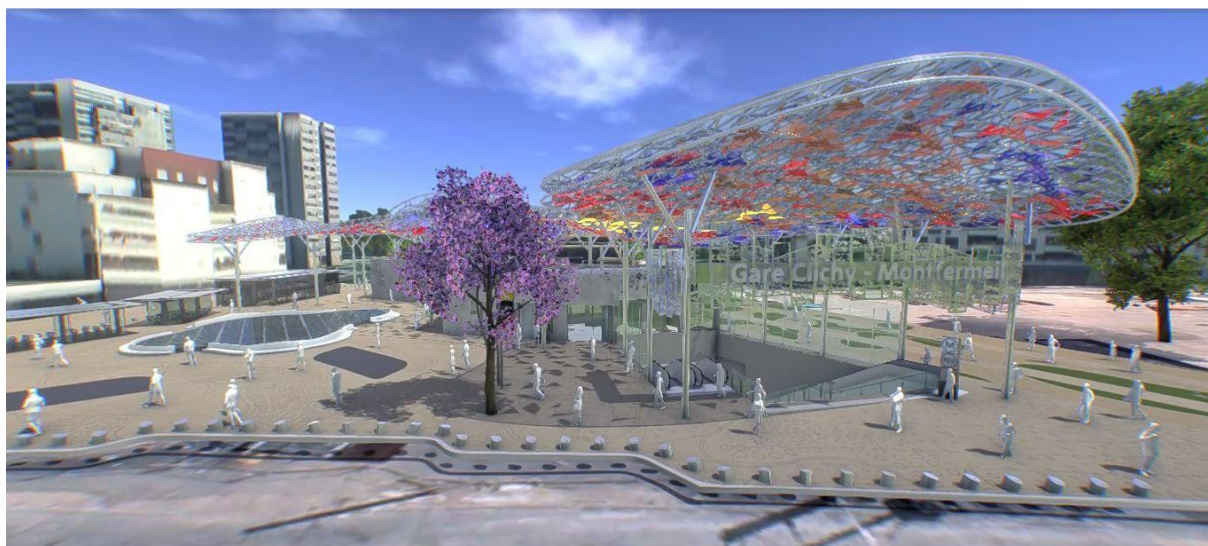


Figure 12 : Extrait de la maquette territoriale 3D illustrant le projet de gare de Clichy-Montfermeil (source SGP).

En l'état, ne participant que de manière limitée à la sous-trame urbaine (Figure 13), l'aménagement de la promenade en faveur des espèces forestières et de milieux ouverts est susceptible de grandement améliorer les performances écologiques du site.

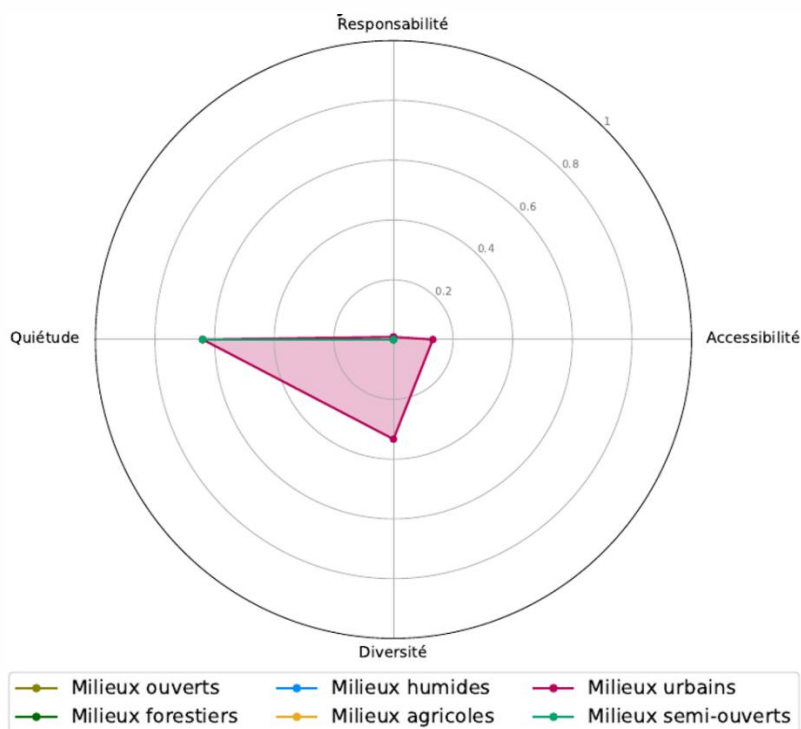


Figure 13 : Performance écologique de référence de la gare de Clichy-Montfermeil.

LA GARE DE ST-CLOUD

Situé dans un environnement dense, la gare de St-Cloud bénéficie à la fois de parcs et jardins ainsi que des berges de la Seine dans son voisinage. Cette proximité avec des espaces semi-naturels lui confère un intérêt pour la sous-trame urbaine qui pourrait-être renforcée (Figure 14).

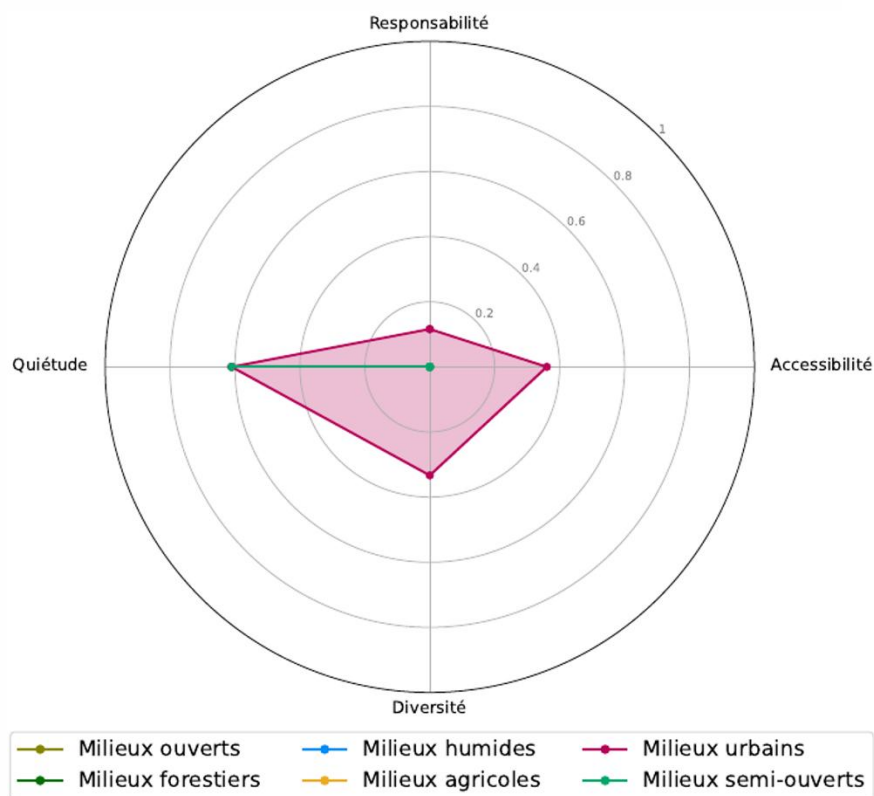


Figure 14 : Performance écologique de référence de la gare de St-Cloud.

LE CENTRE D'EXPLOITATION DE PALAISEAU

Le centre d'exploitation de Palaiseau est prévu dans le secteur le moins densément urbanisé du GPE. Par ailleurs, contrairement aux autres sites en cours de construction ou déjà construits, l'état de référence de ce site est établi à partir de la contribution de l'emprise prévue du site avant travaux ; soit l'état équivalent à celui de l'état initial de l'environnement associé à son étude d'impact. C'est pourquoi les performances écologiques de référence du site sont bien supérieures à celles des autres sites sélectionnés, et celui-ci joue un rôle particulièrement intéressant pour le fonctionnement de la sous-trame ouverte (Figure 15).

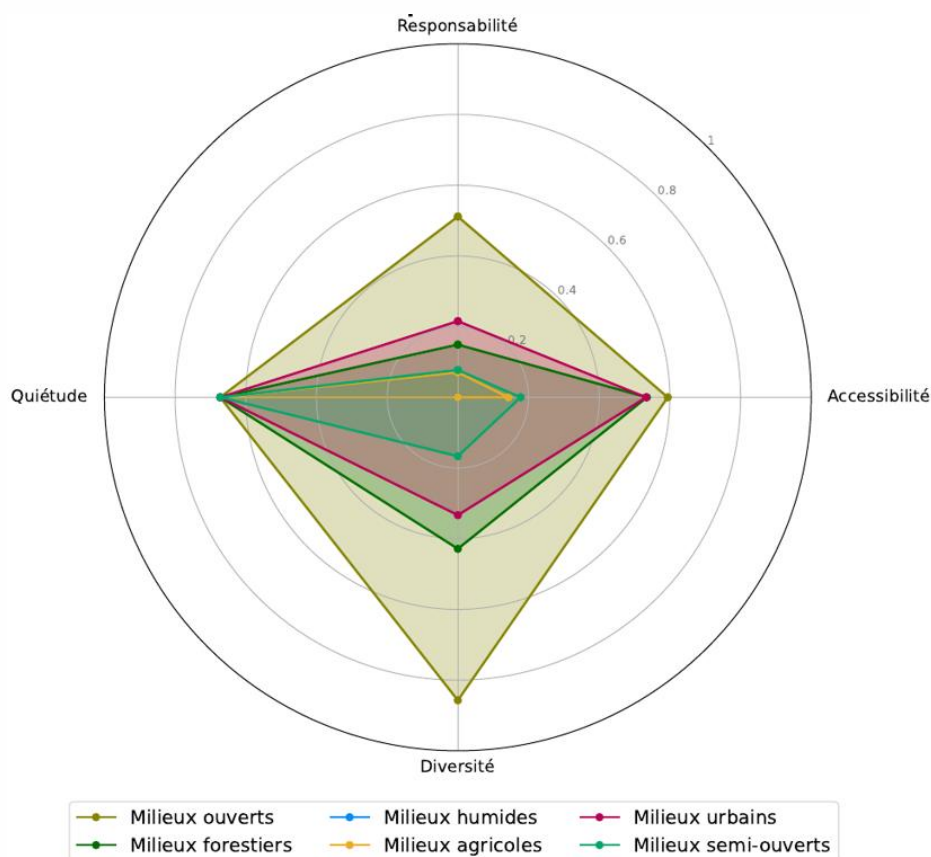


Figure 15 : Performance écologique de référence du centre d'exploitation de Palaiseau.

3.2. Intégration du calcul des indicateurs au sein des maquettes des infrastructures

Les travaux conceptuels d'intégration du calcul des indicateurs de performance écologique dans les maquettes des infrastructures ainsi que les travaux d'automatisation, ont été réalisés en se basant sur la première maquette BIM exploitable mise à disposition par la SGP, le centre d'exploitation de Champigny.

Autant que possible avec les ressources disponibles du projet, les processus BIM conçus et mobilisés ont été mis en œuvre avec des outils ouverts (Blender, eveBIM, etc.) et mis en perspective d'équivalents propriétaires (Revit principalement). Cette section du rapport reprend succinctement les étapes-clés du projet sans entrer dans le détail technique complet disponible en Annexe II. L'annexe II détail notamment l'ensemble des difficultés techniques rencontrées lors de la réalisation du processus BIM du projet et comment elles ont été surmontées.

Par ailleurs les utilitaires Python développés pour le projet sont disponibles sur le GitLab du projet**.

3.2.1. Définition du cas d'usage et construction du BPMN associé

** <https://oikolab.terroiko.fr/optibionum>

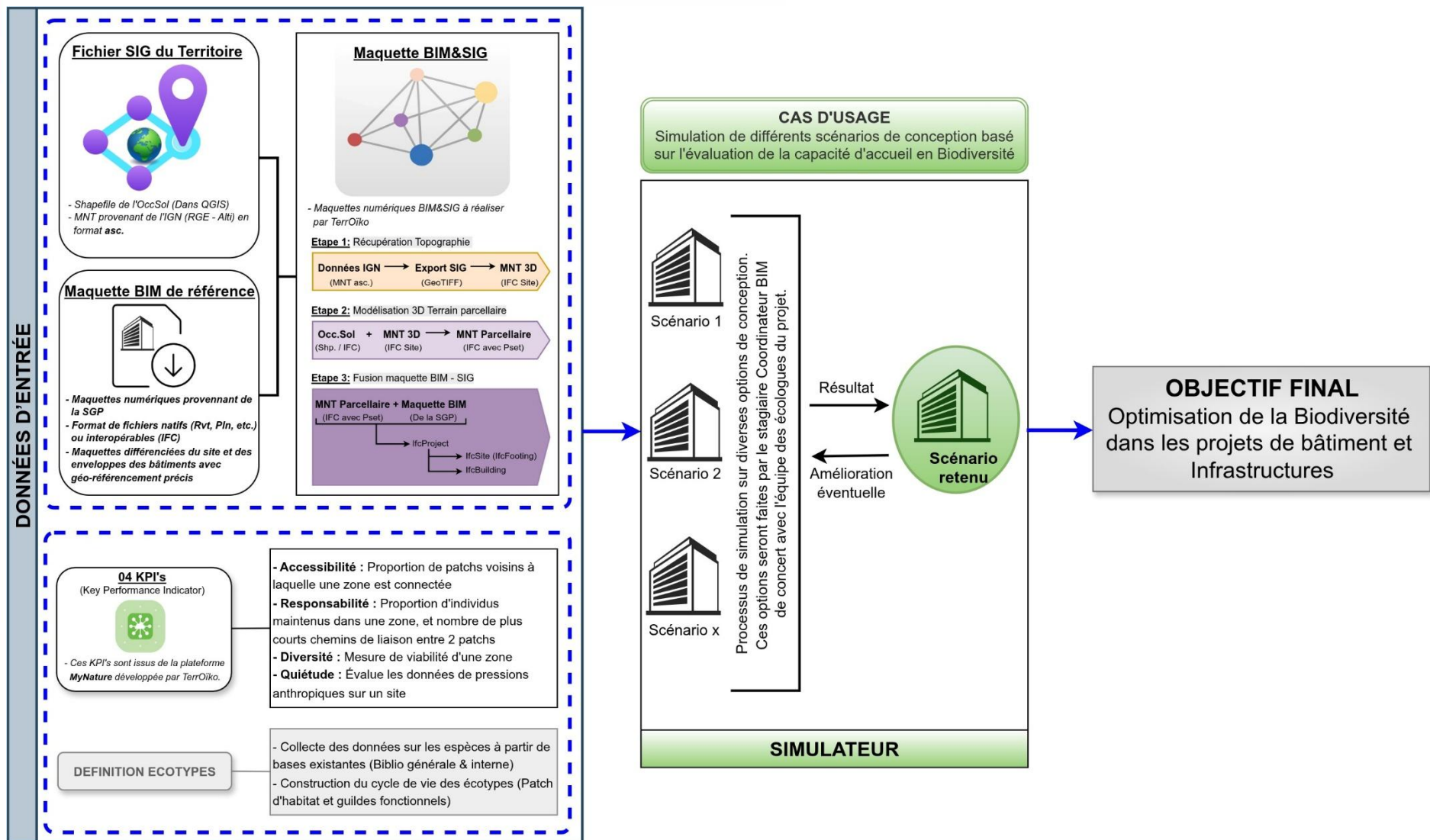


Figure 16 : Définition du cas d'usage développé au sein du projet OptiBioNum.

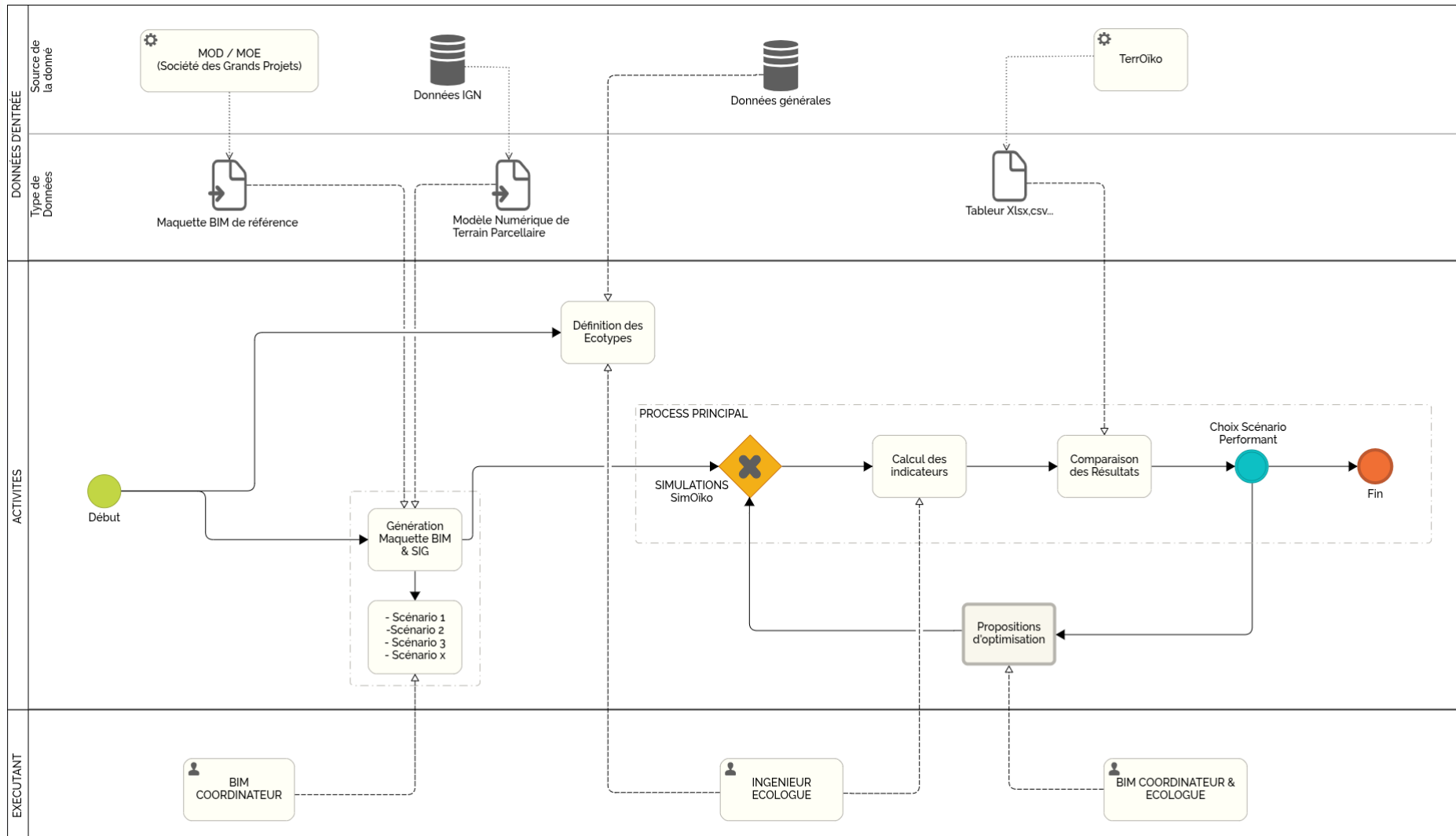


Figure 17 : BPMN associé au cas d'usage développé dans OptiBioNum.

3.2.2. Fédération des maquettes SIG écologiques et BIM sur le site de Champigny

L'évaluation des performances écologiques des sites de démonstration ne peut se faire à l'échelle de l'infrastructure seule. Elle doit se faire au regard du contexte écologique dans lequel elle se situe. Les sites de démonstration ont donc été analysés dans un contexte écologique d'1 km de rayon.

ETAPE 1 – CONSTRUCTION DE LA MAQUETTE ECOLOGIQUE

A partir des données raster de modèle numérique de terrain (MNT) du RGE-Alti de l'IGN, un IFC de ce MNT a été généré sous Blender à l'aide du plugin Bonsaï (Figure 18).

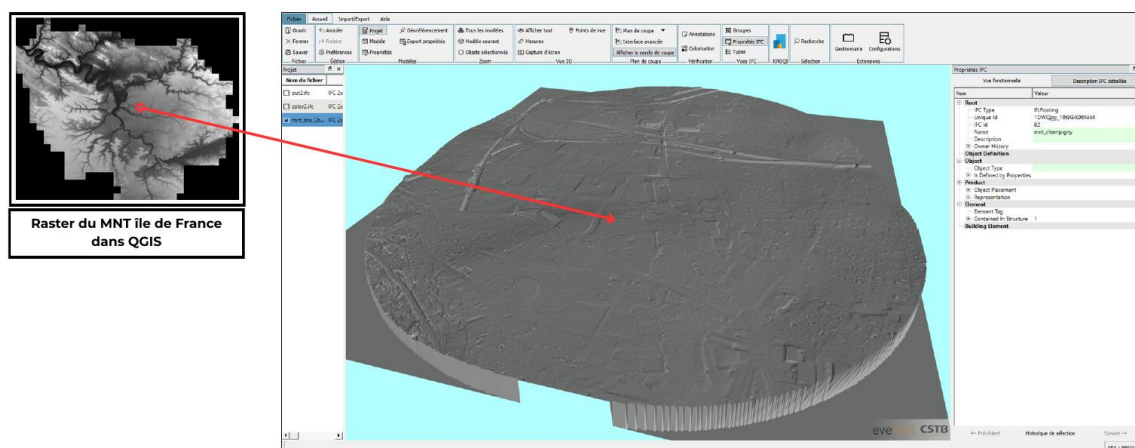


Figure 18 : Vue sous eveBIM de l'IFC du MNT du site de Champigny et de son contexte géographique (1 km de rayon) généré à partir des dalles du RGE-Alti de l'IGN et du plugin Bonsaï de Blender.

En parallèle, la cartographie des milieux naturels a été convertie en IFC à l'aide des utilitaires Python développés dans le projet DeMo^{††} (Catalano et al. 2021), contenant les données de supports de la simulation numérique avec SimOïko (Figure 19).

^{††} <https://www.terroiko.fr/fr/demo-utilisation-du-bim-pour-la-gestion-de-la-biodiversite-de-la-planification-au-projet>

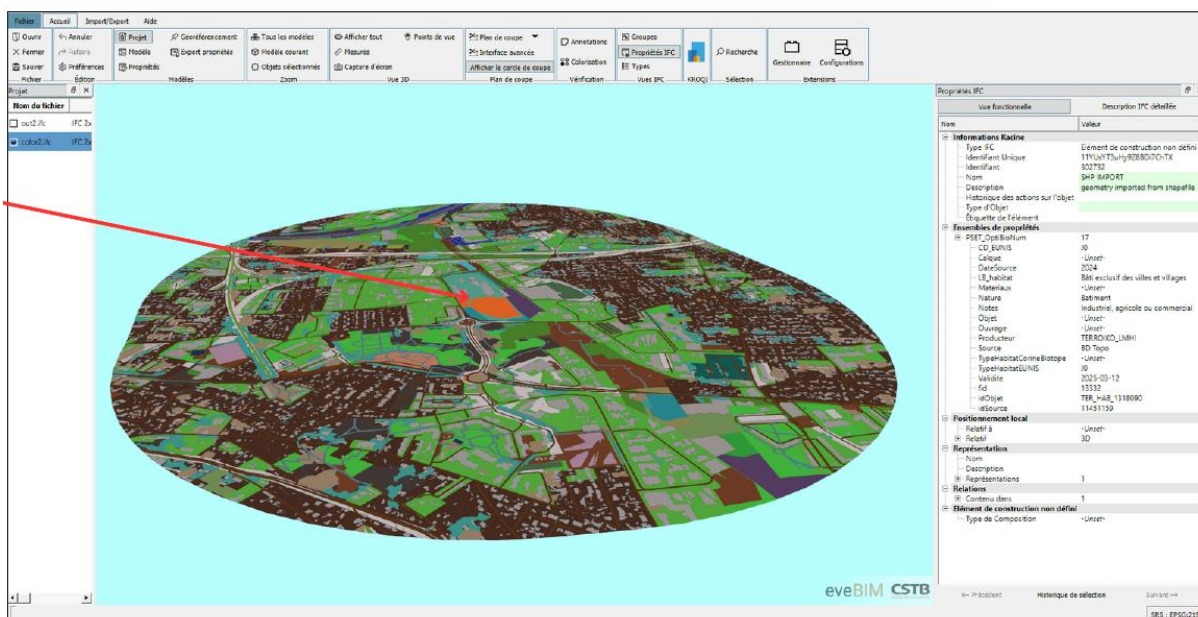


Figure 19 : Vue sous eveBIM de l'IFC 2D des milieux naturels dans un rayon de 1 km autour du site de Champigny, lui-même supprimé de l'IFC dans la perspective de l'intégration de la maquette fournie par la SGP.

Le MNT et la cartographie des milieux naturels ont été fusionnés à l'aide d'utilitaires Python pour obtenir une cartographie des milieux naturel avec élévation en IFC (Figure 20).

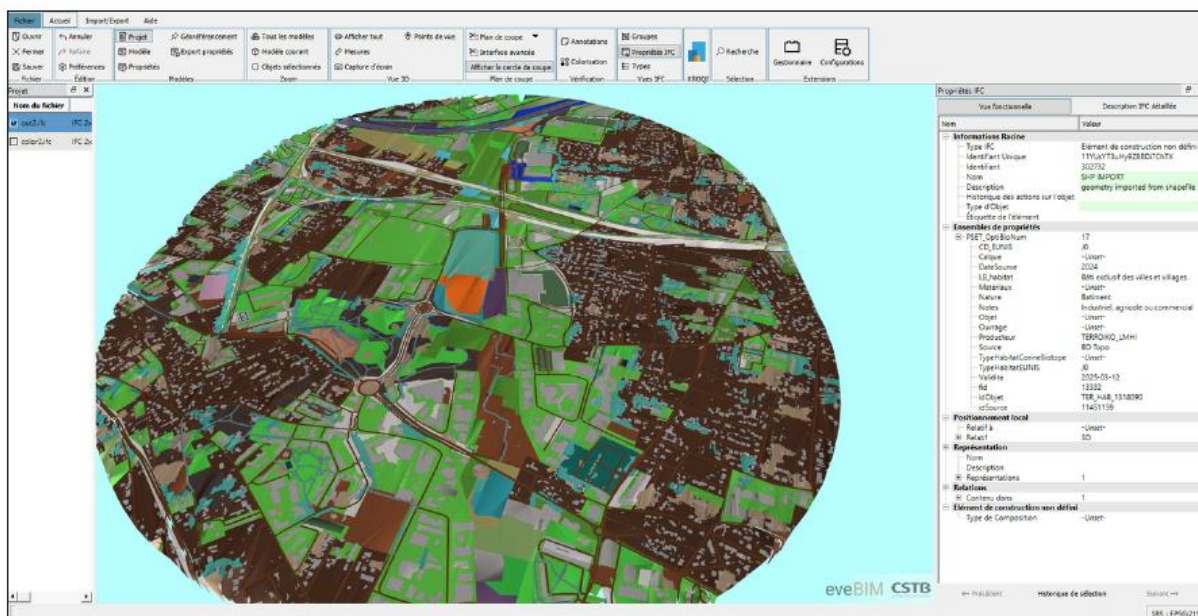


Figure 20 : Vue sous eveBIM de la maquette écologique comprenant les informations sur les milieux naturels nécessaires à l'évaluation des indicateurs de performance écologique du site de Champigny et leur élévation.

ETAPE 2- FEDERATION DES MAQUETTES ECOLOGIQUES (SIG) ET DU CENTRE D'EXPLOITATION DE CHAMPIGNY (BIM)

Une fois l'IFC de la maquette du contexte écologique générée, il a été fédéré avec celui du centre d'exploitation de Champigny sous Revit (Figure 21).

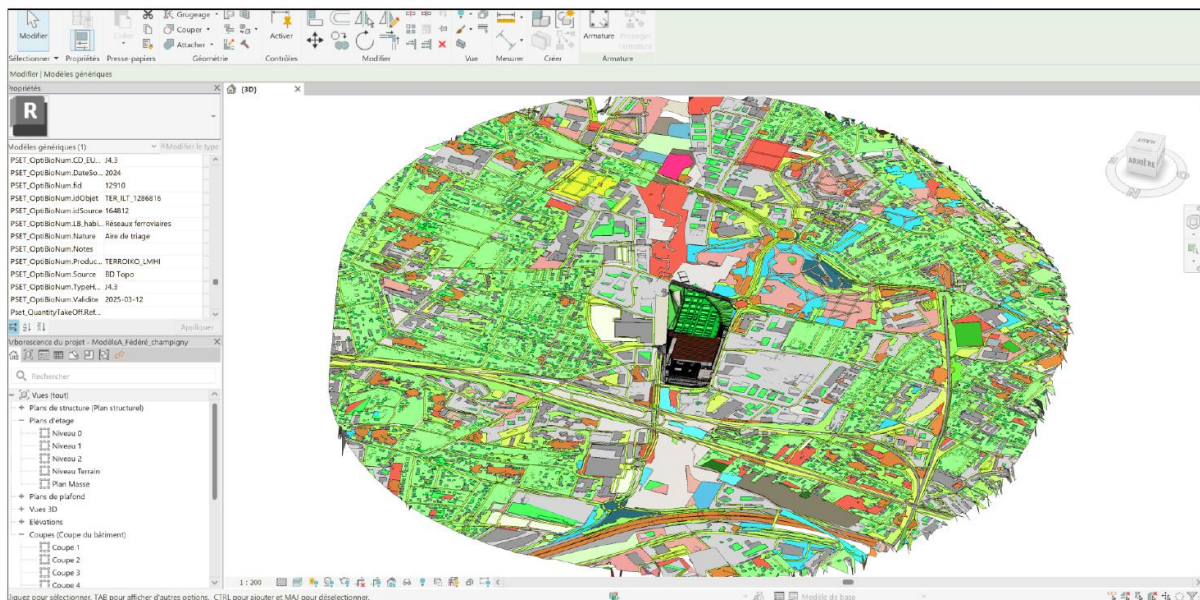


Figure 21 : Vue de la maquette fédérée du site de Champigny sous Revit.

3.2.3. Modélisation des scénarios d'aménagement

Pour le site de Champigny, 2 scénarios alternatifs^{‡‡} au scénario de référence (scénario 1) ont été envisagés (voir section 3.1.5) :

- Scénario 2 : pas de végétalisation du toit du centre d'exploitation, correspond au cas général de référence dans les projets de construction et permet au projet d'évaluer les gains du projet de référence (scénario 1 avec potager) par rapport à un projet complètement minéralisé.
- Scénario 3 : mise en place d'un boisement sur la toiture du centre d'exploitation et dans ses dépendances pour une meilleure mise en accord avec le fonctionnement des réseaux écologiques alentours.

Ces trois scénarios ont été modélisés dans Revit (Figure 22).

^{‡‡} Ces scénarios n'ont pas vocation à être réalisés ni à être complètement réalistes (scénario 3 notamment qui demanderait de grosses reprises structurelles du bâtiment et par conséquent aurait des impacts majeurs sur ses coûts et bilan carbone).

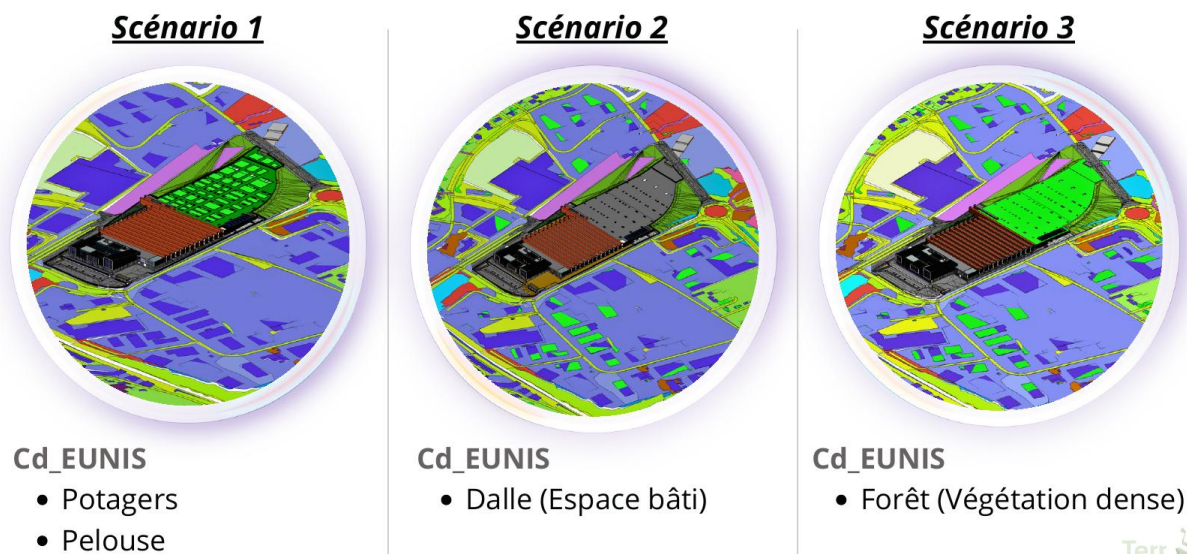


Figure 22 : Extraits de vue des trois scénarios d'aménagement du centre d'exploitation de Champigny ne différant que par la nature de leur couverture (code EUNIS) représentée par le p_set, Cd_EUNIS.

3.2.4. Calcul des indicateurs de performances

Trois des 4 indicateurs de performances écologiques utilisés dans le projet sont dérivés de résultats de simulation numérique de dynamique de populations réalisées avec SimOïko, qui, comme l'ensemble des modèles comparables, nécessite des données d'entrée en raster ou voxel (Urban et al. 2022, Dutta et al. 2022). Le passage de l'IFC au format raster est possible avec des logiciels propriétaires tels que Global Mapper Pro, ArcGis Pro ou FME auxquels le projet n'a pas eu accès. Il semble par ailleurs qu'aucun outil ouvert fonctionnel ne soit actuellement disponible pour effectuer cette conversion. Les spécifications fonctionnelles pour la création d'un utilitaire dédié ont été réalisées au cours du projet mais le développement de l'utilitaire n'a pas pu être réalisé dans la durée du projet.

Pour pallier à ce verrou technique, la création des données d'entrées pour SimOïko ont donc été réalisées manuellement sous SIG à partir des scénarios de maquette réalisés sous Revit.

Le scénario 2 met en avant que le site sans aménagement écologique spécifique présente un intérêt limité pour les espèces des sous-trames des milieux urbains et semi-ouverts grâce aux emprises périphériques du bâtiment (Figure 23).

Les performances écologiques des scénarios 1 et 3 sont plus intéressantes écologiquement que celles du scénario 2 mais contrastées (Figure 23). Les résultats montrent que le scénario 1 de référence permet d'accueillir une diversité modérée d'espèces des milieux agricoles et semi-ouverts bien que l'indicateur d'accessibilité soit faible, ce qui atteste d'un fonctionnement local isolé du reste des réseaux écologiques agricoles et semi-ouverts. Si ce fonctionnement isolé pour la sous-trame semi-ouverte ne semble pas problématique (indicateur de responsabilité nul), il l'est plus pour la sous-trame agricole au sein de laquelle le site joue un rôle relativement important. Ce signal correspond à la création *ex nihilo* d'espaces agricoles hors réseau écologique agricole

fonctionnel aux alentours. Concernant le scénario 3, le renforcement du réseau écologique forestier semble efficace à travers l'augmentation de l'indicateur d'accessibilité et de celui de responsabilité, le site pourrait jouer un rôle de relai pour cette sous-trame. Par ailleurs, ce rôle de relai pour la sous-trame forestière offre l'opportunité de renforcer localement la sous-trame urbaine en devenant un petit réservoir pour cette sous-trame (augmentation de l'indicateur de diversité et d'accessibilité).

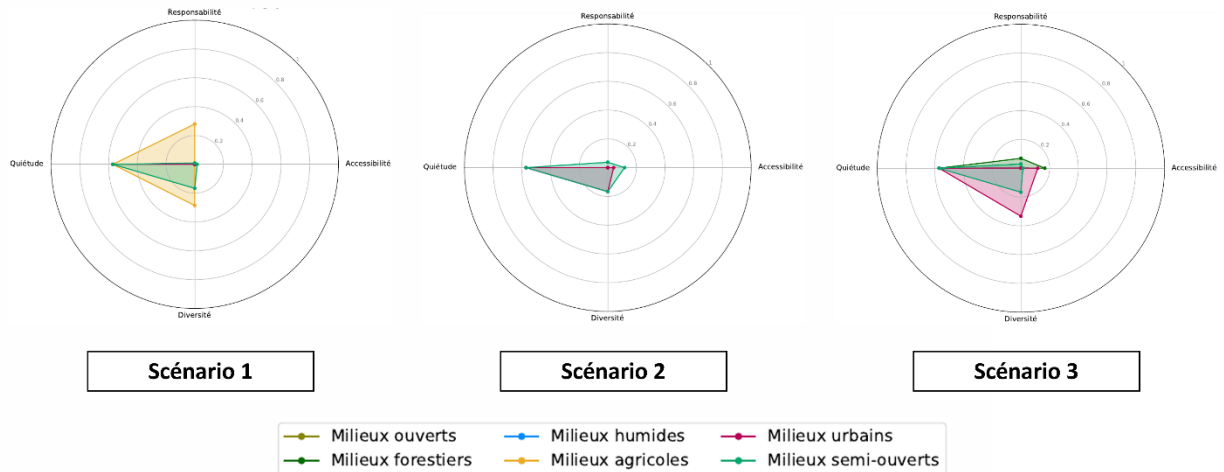


Figure 23 : Performances écologiques des scénarios 1 et 3 du site de Champigny.

3.2.5. Généralisation du processus à l'ensemble des sites de démonstration

Les processus développés et mis en œuvre sur le site de Champigny ont été généralisés à l'ensemble des sites de démonstration. A ce jour, seul le site de Palaiseau n'a pas pu être traité faute d'accès à la maquette du centre d'exploitation.

GARE DE CLICHY-MONTFERMEIL

Le scénario étudié pour la gare de Clichy-Montfermeil consiste à aménager la promenade de la Dhuys sur l'emprise de la gare de manière à créer une lisière poursuivant structurellement celle de la forêt de Bondy et susceptible de renforcer la connectivité fonctionnelle des sous-trames associées aux boisements (forestière, semi-ouverte et urbaine).

Les performances écologiques du scénario modélisé semblent limitées dans la mesure où elles permettent une amélioration marginale du fonctionnement de la sous-trame semi-ouverte mais réduisent la diversité des espèces de la sous-trame urbaine.

L'aménagement proposé semble pouvoir contribuer au renforcement de la sous-trame semi-ouverte. Cependant, son emprise très limitée ne semble pas suffisante pour avoir un effet significatif sur le fonctionnement de cette sous-trame. Son extension à l'ensemble de la promenade telle qu'évoquée lors de l'atelier avec la SGP est susceptible d'améliorer grandement le fonctionnement de cette sous-trame au regard des résultats obtenus à l'échelle d'intervention restreinte du site.

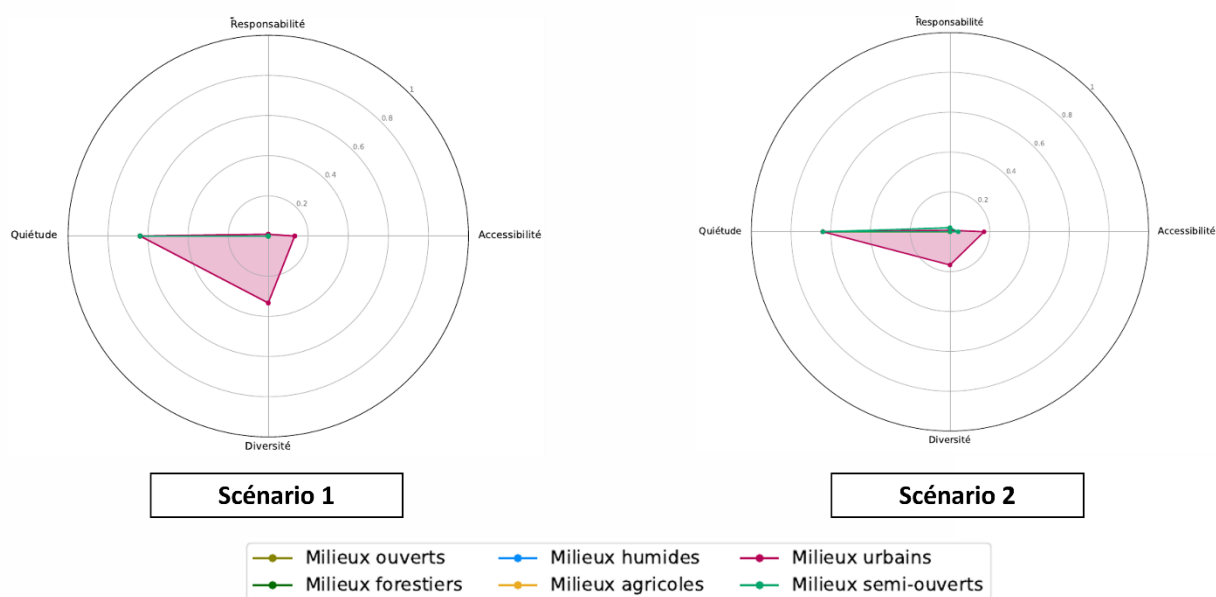


Figure 24 : Performances écologiques des scénarios 1 et 2 du site de Clichy Montfermeil

GARE DE ST-CLOUD

Pour la gare de St-Cloud, le scénario envisagé consiste végétaliser le toit de la gare et à installer en encorbellement une passerelle favorable aux mouvements des petites espèces de milieux ouverts, urbains et semi-ouverts sur la passerelle piétonne existante, afin de renforcer la connectivité écologique de part et d'autre de la voie tout en aménageant une continuité écologique structurelle facilitant la connexion entre les deux niveaux topologiques du site (Figure 25).

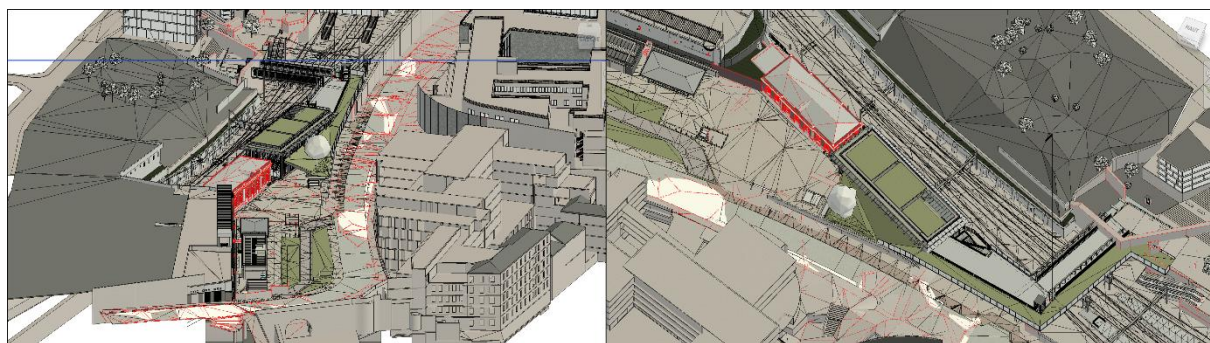


Figure 25 : Modélisation du scénario d'aménagement sous Revit.

Le scénario proposé ne semble pas présenter de performances écologiques différentes du scénario actuel (Figure 26).

L'absence de gain de performance du scénario envisagé peut s'expliquer de deux manières :

- La première, écologique, est due au fait que le site se situe dans un secteur déjà très peu fonctionnel, éloigné de tout réservoir de biodiversité. Dès lors, l'aménagement ne change pas significativement le fonctionnement des réseaux écologiques étudiés. Les espèces exploitant le site sont déjà des

espèces volantes urbanophiles pour lesquelles l'aménagement ne change pas fondamentalement le fonctionnement, et les espèces plus sensibles ne voient pas leurs conditions locales de vie suffisamment améliorées pour s'installer, ni même fréquenter la zone.

- La seconde, technique, est due à notre incapacité dans le projet à traiter les données de la maquette dans un environnement 3D explicite. La capacité des individus à exploiter pleinement la passerelle est donc de ce fait sous-estimée en raison de la complexité 3D de l'environnement associé au scénario d'aménagement.



Figure 26 : Performances écologiques des scénarios 1 et 2 du site de St-Cloud.

4. CONCLUSION DE SYNTHÈSE

Le projet OptiBioNum a permis par sa mise en œuvre de démontrer que le thème de la biodiversité peut être intégrée dans une démarche BIM d'infrastructure de transport et que ce thème peut constituer une dimension mesurable et pilotable du projet. Bien que le projet se soit focalisé sur les gares et centres techniques du GPE, les méthodes et outils mis en œuvre sont scalables et peuvent être appliqués directement à l'échelle de l'infrastructure ou du territoire⁵⁵ en mobilisant une large diversité d'indicateurs de performance écologique.

Si le projet a mis en avant que cette intégration et notamment la fédération des maquette SIG utilisées en écologie du paysage et les maquettes BIM des gares et centres techniques peuvent être totalement réalisées avec des outils propriétaires, cette mise en œuvre dans un environnement totalement open-source doit encore faire face à quelques difficultés techniques. Ainsi la principale difficulté technique rencontrée au cours du projet dans ce sens a été la manipulation des voxels et rasters qui ne bénéficient pas d'outils de conversion entre BIM et SIG open-source performant.

Au croisement entre écologie du paysage et conception d'infrastructure, le projet OptiBioNum a mis en avant non pas des difficultés techniques majeures pour intégrer le thème de la biodiversité dans le BIM des ouvrages du GPE, mais des difficultés dans la gestion des projets BIM complexes qui semblent souffrir d'un manque de ressources et compétences à l'origine de la grande majorité des difficultés rencontrées au cours du projet et détaillés dans l'annexe II (ex : géoréférencement des maquette, non-respect des cahiers des charges, difficultés de contrôle qualité, etc.). Il semble ainsi, à l'issue du projet que les plus grandes difficultés auxquelles s'attendre pour l'intégration du thème de la biodiversité dans le BIM des projets d'infrastructure ne soient plus réellement techniques associées aux métiers mais plutôt relatives aux difficultés connues et documentées de la généralisation du déploiement du BIM.

5. VALORISATION DU PROJET

Valorisations attendues :

- V1 : Rapport de projet incluant la description détaillée du cas d'usage.
- V2 : Article scientifique sur les indicateurs mobilisés et leur traitement dans l'environnement mixte BIM/SIG de l'EES – cible : *Environmental Modelling & Software, Ecological Indicators, Ecological Informatics*.
- V3 : Proposition de communication pour la conférence internationale IENE 2026
- V4 : Enrichissement du logiciel libre EES
- V5 : Ouverture de discussion avec les organismes porteurs de labels (CIBI, etc)
- V6 : Labellisation ITTECOP

Tableau 2 : Liste des livrables attendus du projet et des réalisations

⁵⁵ des travaux expérimentaux se poursuivent actuellement à l'échelle du GPE pour le volet infrastructure et avec la région Occitanie dans le cadre du projet [Gaia Predict](#).

Valorisation	Avancement	Ressource	Commentaires
V1	Réalisé	https://www.terroiko.fr/fr/recherche-et-developpement/optibionum	
V2	En préparation		Soumission envisagée pour fin 2026
V3	Fait		Soumission d'une communication orale pour la conférence IENE 2026 le 24/04/2026
V4	Fait	https://oikolab.terroiko.fr/ees	Spécifications réalisées mise développement en cours
V5	Fait		Contribution réalisée lors de l'actualisation du label Biodivercity
V6	Fait	https://www.terroiko.fr/fr/recherche-et-developpement/optibionum	

6. POURSUITE DES TRAVAUX

Le projet OptiBioNum a contribué à la construction de 2 projets européens en cours d'instruction visant à poursuivre les travaux à grande échelle.

6.1. REMEDY – Restoration and modelling of ecosystem dynamics

LE PROJET EN QUELQUES CHIFFRES ET REFERENCES

Référence du call: HORIZON-CL6-2025-01-BIODIV-05

Type d'action: RIA

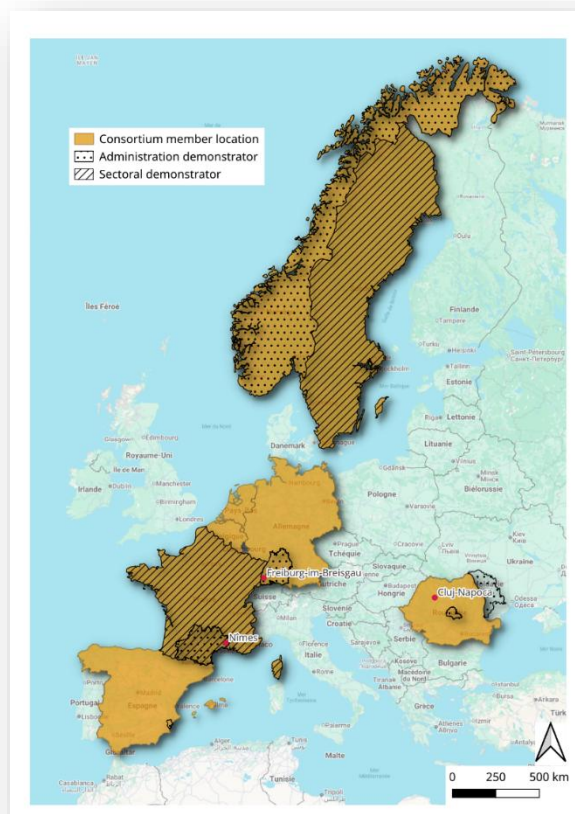
Durée: 36 mois

Budget: 6M€

Nombre de partenaires: 12

Nombre de démonstrateurs: 8 dont 3 sur les infrastructures de transports

Coordination: IENE (Administrative) / TerrOïko (Technique)



RESUME DU PROJET

La perte et la fragmentation des habitats constituent l'une des principales menaces pour la biodiversité mondiale. À travers leurs objectifs de restauration, les États membres de l'UE entendent lutter contre la crise environnementale mondiale, le changement climatique, la désertification et la perte de biodiversité en Europe.

À ce jour, les efforts de restauration restent limités car, malgré les progrès réalisés dans les domaines des connaissances scientifiques et de la modélisation écologique, les praticiens et les décideurs politiques ne disposent pas de solutions fiables et prêtes à l'emploi pour planifier et évaluer les stratégies de restauration. REMEDY comblera cette lacune en développant STREAM (Strategies & Tools for Restoration Ecology Activities supported by Modelling), une plateforme ouverte, conviviale et modulaire qui intègre une modélisation de pointe de la dynamique écologique, des services écosystémiques et des données socio-économiques. STREAM permettra aux praticiens, aux planificateurs et aux décideurs de concevoir, de suivre et d'adapter les plans nationaux de restauration et autres stratégies de restauration à l'aide d'une modélisation multicritères basée sur des scénarios qui équilibre la biodiversité, le climat, les politiques d'utilisation des sols et les

objectifs socio-économiques à toutes les échelles. Huit démonstrateurs divers à travers l'Europe co-développeront et valideront STREAM, garantissant sa facilité d'utilisation, son évolutivité et sa durabilité à long terme. Un programme solide de renforcement des capacités formera les praticiens de la restauration, les décideurs politiques et les consultants à l'application de STREAM pour la restauration écologique, la planification de la connectivité et l'intégration avec les politiques climatiques et d'utilisation des sols.

Ce faisant, REMEDY contribuera directement aux objectifs de la loi européenne sur le climat et de la stratégie de l'UE en matière de biodiversité à l'horizon 2030, en veillant à ce que les politiques en matière de biodiversité et de climat soient cohérentes et se renforcent mutuellement. Il améliorera les connaissances et les outils de modélisation guidant la restauration, renforcera Natura 2000 et d'autres réseaux écologiques, et garantira que la restauration soit pleinement intégrée dans les cadres de modélisation du climat et de l'utilisation des sols, favorisant ainsi à terme une transition transformatrice vers des paysages respectueux de la nature et résilients au changement climatique dans toute l'Europe.

6.2. RESTORE –

LE PROJET EN QUELQUES CHIFFRES ET REFERENCES

Référence du call : HORIZON-CL5-2026-01-D6-07

Type d'action : IA

Durée : 40 mois

Budget : 11M€

Nombre de partenaires : 19

Nombre de démonstrateurs : 12

Coordination : UCD (*University College Dublin*)



RESUME DU PROJET

RESTORE est une action d'innovation qui vise à soutenir la résilience, la durabilité, la circularité et la biodiversité à travers le réseau de transport européen TEN-T. Le TEN-T est essentiel à la libre circulation des personnes et des marchandises qui sous-tend l'économie européenne, et les corridors représentent la partie la plus importante du réseau sur le plan stratégique. Une grande partie du réseau est déjà en place, mais d'importants travaux de construction sont prévus dans les années à venir ; ces activités doivent se dérouler parallèlement à l'entretien des infrastructures existantes. Tout cela se déroule dans un environnement dynamique, alors que l'Europe s'efforce de décarboner les processus de construction et de stimuler la circularité, tout en prenant des mesures pour faire face à la crise de la biodiversité et rendre notre réseau plus résilient face aux

perturbations. Tout cela doit se faire de manière transparente et rentable, et apporter une valeur ajoutée aux citoyens européens.

RESTORE relèvera ces défis en passant des pratiques d'ingénierie traditionnelles à une nouvelle approche holistique de la gestion des corridors et des nœuds de transport. RESTORE tirera parti des progrès des technologies numériques et les appliquera à quatre principes clés. RESTORE :

- Renforcer la résilience grâce à l'adaptation.
- Soutenir l'économie circulaire et réduire le carbone incorporé grâce à l'utilisation de matériaux de construction plus durables.
- Générer des impacts positifs pour les utilisateurs du réseau, les écosystèmes et la biodiversité grâce à l'utilisation accrue de solutions basées sur la nature.
- Développer et valider des solutions adaptées à tous les modes de transport.

RESTORE ciblera les aspects environnementaux, techniques, sociaux, organisationnels et économiques, et appliquera des innovations à des sites pilotes couvrant tous les modes de transport et toutes les étapes du cycle de vie. Cette approche sera validée avec le soutien d'une solide équipe multidisciplinaire couvrant l'ensemble de la chaîne de valeur. Des mesures claires du succès sont identifiées, et celles-ci stimuleront l'innovation en matière de résilience climatique et de pratiques de transport durables.

7. REFERENCES

- Catalano, C., M. Meslec, J. Boileau, R. Guarino, I. Aurich, N. Baumann, F. Chartier, P. Dalix, S. Deramond, P. Laube, A. K. K. Lee, P. Ochsner, M. Pasturel, M. Soret, and S. Moulherat. 2021. Smart Sustainable Cities of the New Millennium: Towards Design for Nature. *Circular Economy and Sustainability* 1:1053–1086.
- Deverchère, P., S. Vauclair, G. Bosch, S. Moulherat, and J. H. Cornuau. 2022. Towards an absolute light pollution indicator. *Scientific Reports* 12:17050.
- Djema, M. 2022. Le BIM et les mesures environnementales. Page 172. ESTP - Egis, Paris.
- Dutta, T., S. Sharma, N. F. V. Meyer, J. Larroque, and N. Balkenhol. 2022. An overview of computational tools for preparing, constructing and using resistance surfaces in connectivity research. *Landscape Ecology* 37:2195–2224.
- Moulherat, S. 2017. Simulation de déplacements animaliers et transparence des infrastructures de transport. Paris.
- Moulherat, S. 2025, October 21. Evaluating an individual-based spatially-explicit model for predicting genetic structure across landscape. Kashiwa, Japan.
- Moulherat, S., D. Le Roux, C. de Roince, M. Barbier, and C. Delran. 2019. Biodiversité, BIM et Infrastructures. Page 52.
- Moulherat, S., C. Plotard, C. de Roince, and J. Cornuau. 2023. Prendre en compte la pollution sonore dans une modélisation de dynamiques de populations d'espèces. *Sciences Eaux & Territoires*:43–47.
- Moulherat, S., M. Teillagorry, and F. Jehan. 2022. Report on Application of BIM and other Tools to Standardise Data Record and Management. Page 75. BISON project, Bruxelles.
- Prima, M., J. Renaud, I. Witté, L. Suarez, P. Rouveyrol, M. Fernando, A. Sacchi, F. Cosentino, L. Santini, L. Maiorano, F. Moreira, J. Dertien, N. Fernández, and W. Thuiller. 2024. A comprehensive

framework to assess multi-species landscape connectivity. *Methods in Ecology and Evolution* 15:2385–2399.

Seiler, A., M. Teillagorry, O. Pichard, J. Wissman, M. Herold, P. Bartel, M. Pasturel, S. Moulherat, F.

Bénard, C. Desplechin, and S. Ménard. 2022. Report on emerging trends and future challenges. Page 125. BISON project, Bruxelles.

Sordello, R., J. Cornuau, A. Coulon, F. Paquier, Y. Reyjol, and S. Vanpeene. 2025. Manifesto for multidimensional ecological networks: a perspective to better account for the complexity of habitat loss and fragmentation. *Landscape Ecology* 40:110.

Urban, M. C., J. M. J. Travis, D. Zurell, P. L. Thompson, N. W. Synes, A. Scarpa, P. R. Peres-Neto, A.-K.

Malchow, P. M. A. James, D. Gravel, L. De Meester, C. Brown, G. Bocedi, C. H. Albert, A.

Gonzalez, and A. P. Hendry. 2022. Coding for Life: Designing a Platform for Projecting and Protecting Global Biodiversity. *BioScience:biab099*.