

Livrable

Perspectives pour la construction de passages à faunes (localisation, aménagements)

Auteurs/Organismes

Sylvain Moulherat (Cinov/TerrOïko)
Justine Vassart (Setec)
Amos Houewatonou (Egis)

Yann Le Gallic (Setec)
Denis Le Roux (Setec)
Anne Ruas (Ifsttar)
Marc Chassande (Setec)

Structuration des données (Thème 3) Infrastructure et environnement (UC6)

MINnD_TH03_UC06_05_Perspectives_pour_construction_passages_faunes_019D_2017

Décembre 2017

RESUME

Des échanges successifs entre les domaines de conception

Les méthodes de travail actuelles pour la conception des infrastructures ont recours à des échanges successifs entre les domaines de conception. Les fichiers de chaque corps de métier doivent souvent être transformés avant d'être compilés ou ressaisis du fait des incompatibilités entre les logiciels et les formats. Ces manipulations entraînent une perte de temps et une dégradation des informations contenues dans les fichiers d'origine ce qui augmente le risque d'erreur.

Une analyse des flux d'échanges

L'objectif des études effectuées en tranche 2 de l'UC6 est tout d'abord d'analyser ces flux d'échanges autour des données environnementales des projets. Cela doit permettre :

- D'identifier les points de blocage existants.
- De déterminer quelles sont les évolutions de méthode de travail à mettre en œuvre pour fluidifier les échanges.

Une tranche 2 en 5 livrables

La tranche 2 comprend 5 livrables :

Nom du rapport	Contenu
Livrable 1 (UC6T2-1)	Analyse critique des outils existants pour charger et échanger des données environnementales et des données d'infrastructures.
Livrable 2 (UC6T2-2)	Processus pour l'étude des enjeux environnementaux liés aux infrastructures.
Livrable 3 (UC6T2-3)	Structuration et historisation des données d'infrastructures et environnementales.
Livrable 4 (UC6T2-4)	Perspectives pour la construction de passages à faunes (localisation, aménagements et analyse de performance).
Livrable UC6-3 version 2	Propositions réglementaires relatives aux infrastructures et aux données environnementales.

L'objectif du rapport

L'objectif de ce présent rapport est d'exposer, au travers de cas concrets, comment l'utilisation du BIM permettrait de consolider les études environnementales (biodiversité).

L'analyse détaillée dans ce livrable permet également de dégager des pistes en matière de standardisation des échanges et des procédures de contrôle de qualité des informations contenues dans le BIM.

Ce livrable a aussi un objectif de prospective qui vise à préparer l'intégration des nouvelles technologies, utilisables pour les études environnementales, dans les processus BIM. L'emploi de ces technologies, telles que la simulation numérique pour les espèces animales ou le recours aux outils de génétiques, est facilité par le BIM. En effet, ce dernier nécessite des systèmes de traitement, d'échange, de stockage et d'historisation de la donnée.

Deux cas présentés en annexe du rapport

Les deux cas d'étude alimentent le contenu des tous les rapports UC6T2. Ils sont présentés en Annexe 1 du rapport UC6T2_1.

GLOSSAIRE

Abréviation	Définition
ASF	Autoroutes du Sud de la France
BIM	Building Information Modeling – Building Information Model
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BVN	Bassin Versant Naturel
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CNPD	Conseil National de Protection des Données
CNPN	Conseil National de Protection de la Nature
DLE	Dossier Loi sur l'Eau
DPAC	Domaine Public Autoroutier Concédé
DREAL	Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
DUP	Déclaration d'Utilité Publique
ENS	Espace Naturel Sensible
EUNIS	European Nature Information System)
ICPE	Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
IFC	Industry Foundation Class (Norme ISO 16739)
IFSTTAR	Institut Français des Sciences et Technologies, des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux
IGN	Institut Géographique National
Impluvium	Système de captage des eaux pluviales.
INSPIRE	Infrastructure for Spatial Information in Europe
ISO	International Organization for Standardization
MINnD	Modélisation des INformations INteropérables pour les INfrastructures Durables
MNT	Modèle Numérique de Terrain.
NRE	Notice de Respect de l'Environnement
OA	Ouvrages d'Art
OGC	Open Géospatial Consortium
OSGeo	Open Source Geospatial (OSGeo)
PI	Passage Inférieur
PRE	Plan de Respect de l'Environnement
PS	Passage Supérieur
SIG	Système d'Information Géographique
SRCE	Schéma Régional de Cohérence Ecologique.
TVB	Trame Verte et Bleue
UML	Unified Modeling Language (Norme ISO 19501)

Sommaire

Avant-propos	5
1. CAS D'USAGE ET OBJECTIFS DES SIMULATIONS	6
2. MISE EN PLACE DES SIMULATIONS NUMERIQUES ECOLOGIQUES SUR LES CAS D'ETUDES	8
2.1. Le simulateur SimOïko®	8
2.2. Simulations sur l'A63	16
2.3. Simulations sur l'A64	17
2.4. Données utilisées pour les simulations	20
3. RESULTATS DE SIMULATION.....	23
3.1. Positionnement optimal d'un chiroptéroduct sur l'A63.....	23
3.2. Interopérabilité et propagation de l'erreur	26
3.3. Design optimal de l'écopont de l'A64.....	27
4. PERSPECTIVES BIM.....	30
4.1. Intégration des résultats dans la maquette numérique, établissement d'un workflow adapté	30
4.2. Recommandations et perspectives.....	31
BIBLIOGRAPHIE.....	32

Avant-propos

Le 4^e livrable de MINnD Ce rapport est le quatrième livrable écrit à l'issue de la tranche 2 du projet MINnD.

Une présentation des flux et modèles de données

Dans les livrables UC6T2-2, nous avons décrit les processus pour l'étude des enjeux environnementaux liés aux infrastructures. Le rapport UC6T2-3 présente les flux et modèles de données associés. Dans ce rapport, nous allons poursuivre cette réflexion par le biais d'analyses sur des exemples concrets.

Un rapport en 3 axes

Ce rapport s'articule en trois axes :

- Nous commençons par définir les cas d'usage dans lesquels nous nous plaçons.
- Nous détaillons la mise en place de simulations numériques à partir de ces cas d'usage.
- Enfin, nous expliquons les résultats obtenus et comment ces processus peuvent s'intégrer aux méthodologies actuelles de travail.

I. CAS D'USAGE ET OBJECTIFS DES SIMULATIONS

Définition	Les cas d'usage sont présentés en Annexe1 du rapport UC6T2-1. Nous présentons ici l'usage de méthodes de simulation pour améliorer les choix de localisation ou d'aménagement de passages animaliers de part et d'autre d'une autoroute.
L'exploitation des données mises à notre disposition	Notre objectif est d'exploiter les données mises à notre disposition pour les deux cas d'étude afin de répondre à des questions biologiques concrètes. Pour ce faire, nous effectuons des simulations numériques concernant les dynamiques spatio-temporelles d'espèces cibles.
Le cas d'étude concernant l'A63	Dans le cas d'étude concernant l'A63, la question biologique traitée est celle de l'optimisation du positionnement d'un passage à faune de type chiroptéroduct entre deux alternatives . Parmi les deux emplacements possibles, lequel devrait être le plus efficace pour maintenir un réseau écologique robuste pour les chiroptères forestiers et de ce fait préserver l'état de conservation de ce groupe taxonomique ?
Le cas d'étude concernant l'A66	Dans le cas d'étude concernant l'A64, la question est celle de l'optimisation de l'aménagement d'un passage de type écopont à destination des espèces forestières (sur un corridor forestier SRCE). Dans ce cas, trois designs de l'écopont sont proposés. Il s'agit alors d'identifier lequel présente le plus d'intérêt pour le rétablissement des échanges d'espèces forestières de part et d'autre de l'autoroute.
Des simulations réalisées avec SimOïko	<p>Ces simulations sont réalisées grâce au logiciel SimOïko développé par la société TerrOïko (CINOV), partenaire de l'UC6. Le groupe de travail a choisi de se pencher sur la question de la simulation numérique avec SimOïko, car cet outil est initialement un outil de recherche et donc très flexible. Cet outil :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Est capable d'intégrer des données très variées (usuelles), des études sur le volet biodiversité, mais aussi des données plus transversales : nuages de points LIDAR fusionné à la BD alti 5m, hydrologie, données de conceptions ... aux sources et aux formats divers. • Permet de réaliser des expériences d'aménagements in silico : différents scénarios pour l'aménagement menant à une succession de choix à faire et à historiser. • Nécessite des données SIG d'excellente qualité (couches cartographiques (.shp) sans problèmes topologiques) : standardisation des couches cartographiques (qualité et informations attributaires). • Est utilisable à toutes les étapes de la conception d'un projet. • Est utilisable avec différents LOD suivant les besoins à chaque étape des études. • Peut utiliser les résultats d'autres modèles utilisés sur l'acoustique, la pollution... • Produit des sorties très diverses avec des formats multiples et des volumes de données importants. • Est un type d'outil encore peu utilisé et sous exploité pour la conception des infrastructures linéaires.
Les objectifs	<p>Les objectifs sont les suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Identifier et de formater les données nécessaires à la réalisation de ces simulations. • Identifier et de comprendre les problèmes d'interopérabilité et de proposer des solutions de résolution. • Reproduire des processus décisionnels quant au choix d'aménagements réalisés et faire des propositions concrètes sur les informations à historiser dans ce processus. • Générer des données exploitables directement par l'aménageur ou les autres acteurs des études. • Comprendre les apports de ces simulations pour le choix et la localisation des mesures environnementales des projets d'infrastructures linéaires, mais aussi d'en cerner les implications en termes de conception d'un BIM infrastructure.

**Rappel sur le Cas
d'usage de l'A63**

Cf. « Premier cas d'étude : chiroptéroduct sur l'A63 », UC6T2 – 1.

Pour rappel, lors des études du projet d'élargissement à 2x3 voies de l'A63, les possibilités de franchissements de l'infrastructure par les chiroptères ont été estimées suffisantes pour assurer la transparence écologique du site. Toutefois, dans le cadre de nos recherches pour l'UC6, nous souhaitons analyser par le biais de simulations écologiques, l'impact de la mise en place d'un chiroptéroduct et de sa localisation sur les populations de chiroptères.

Cette analyse est réalisée sur une zone d'étude choisie par le groupe (et comprise dans l'emprise des données fournies par Vinci) pour ses caractéristiques environnementales.

**Rappel sur le
Cas d'usage de l'A64**

Cf. « Deuxième cas d'étude : écopont sur l'A63 », UC6T2 – 1.

Le projet d'écopont sur l'A64 prévoit la réalisation d'un certain nombre d'aménagements autour de l'ouvrage pour le rendre plus attractif. Par le biais des simulations, nous souhaitons analyser l'impact de différents scénarios d'aménagements sur la faune.

2. MISE EN PLACE DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES ÉCOLOGIQUES SUR LES CAS D'ÉTUDES

2.1. Le simulateur SimOïko®

Concepts mis en jeu et fonctionnement du simulateur

Bases conceptuelles du fonctionnement de SimOïko

SimOïko est le logiciel de simulation numérique développé par la start-up TerrOïko (partenaire de l'UC6 pour le CINOV). Cet outil est dérivé du modèle de recherche MetaConnect (Moulherat, 2014). Il est développé en partenariat avec la Station d'Ecologie Théorique et Expérimentale du CNRS à Moulis (FR).

SimOïko valorise les travaux de recherche issus de plusieurs projets nationaux et européens concernant le fonctionnement des métapopulations animales et végétales :

- ANR : Mobigène.
- DIAMES.
- Projets européens : FP6 TenLAMAS et FP7 SCALES.

SimOïko a été testé et validé par :

- La comparaison des résultats obtenus grâce à ce simulateur avec les résultats obtenus par d'autres modèles.
- La comparaison avec des données réelles issues du terrain.

Ces validations ont été effectuées pour chaque module de base de SimOïko et ont donné lieu à publications scientifiques (Moulherat, 2014, Gunton et al., 2016).

SimOïko est un outil de simulation numérique « individu centrée » et « spatialement explicite » des dynamiques de métapopulations. C'est-à-dire que SimOïko simule la dynamique des populations d'espèces cible, leurs déplacements mais aussi les flux de gènes selon ces 2 approches.

Simulation numérique de dynamique des populations individu centrée

La dynamique des populations correspond à l'étude de la vie de l'espèce considérée. SimOïko est dit individu centré, car le cycle de vie de chacun des individus d'une population est simulé dans son intégralité.

Le simulateur offre donc la possibilité de suivre les trajectoires des individus. Pour chaque pas de temps (ici, une année), les informations suivantes sont enregistrées :

- Le nombre d'individus présents dans chaque patch d'habitats.
- Les endroits où ils se déplacent pour aller d'un patch à un autre.

En fin de simulation, nous avons donc :

- Une idée des probabilités de maintien :
 - Des populations dans chaque patch d'habitat.
 - Des tailles de populations dans chacun de ces patches.
 - Des mouvements effectués par les individus dispersants.
- Des informations sur la génétique des populations : (consanguinité et degré d'isolement génétique).

Ainsi, SimOïko permet, à partir d'informations simples (fécondité, survie...), de simuler la dynamique d'une population en prenant en compte la variabilité qu'il peut exister entre deux individus, deux années... (stochasticité démographique, variabilité interindividuelle...).

À l'échelle d'un patch d'habitat, les résultats obtenus permettent :

- D'estimer des tailles de populations.
- De déterminer des probabilités d'extinction de ces populations.

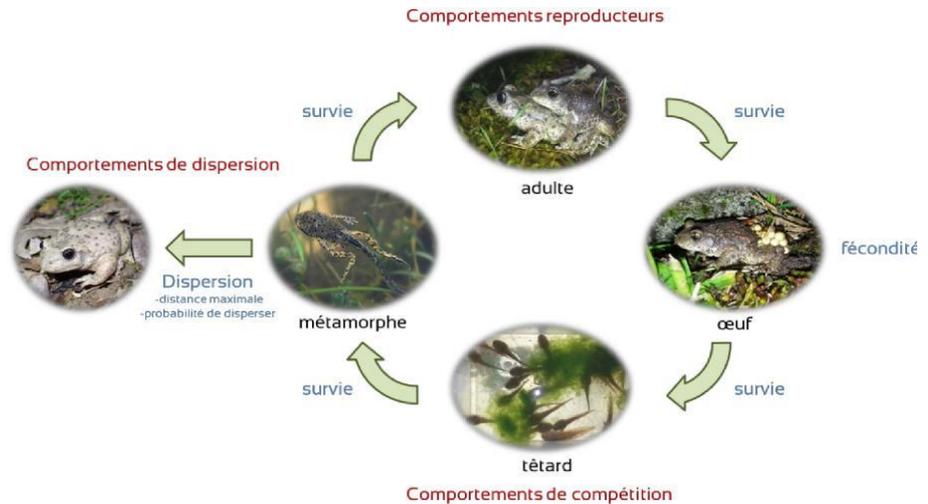


Figure 1 : Cycle de vie du crapaud accoucheur tel que simulé dans SimOïko

Simulation spatialement explicite de dynamique de métapopulations

Une métapopulation est un réseau de populations plus ou moins connectées entre elles grâce à des flux d'individus se déplaçant d'un patch à l'autre (Clobert et al, 2001). Une métapopulation est donc un réseau écologique. SimOïko est dit « spatialement explicite », car il permet de simuler le comportement des individus lors de leurs déplacements entre les patches d'habitats favorables lors des phases de dispersion. Dès lors, chaque individu se déplace au sein du paysage en fonction de ses affinités avec les milieux naturels rencontrés. Ces préférences sont exprimées sous la forme de coefficients de friction ou perméabilité ou encore rugosité. En fonction des espèces et des besoins de l'étude, une large gamme d'algorithmes de dispersion est utilisable. On note en particulier la disponibilité des algorithmes :

- De marches aléatoires (RW) qui sont strictement équivalentes aux algorithmes utilisés dans les méthodologies dites de coût/déplacement, d'aire de migration simulée, etc.
- De chemin de moindre coût (LCP) notamment utilisé dans l'approche par graphes paysagers.
- Stochastic Movement Simulator (SMS) (Palmer et al., 2011). À l'heure actuelle, il s'agit du seul algorithme de dispersion qui a pu montrer une congruence réaliste entre résultats de simulation et réalité de terrain (Coulon et al., 2015).

Grâce à son caractère spatialement explicite, SimOïko permet d'identifier les secteurs préférentiels de déplacement des espèces/guildes et de produire des cartes de fréquentation. Comme pour la fonctionnalité des réservoirs, il est possible d'estimer la fonctionnalité des corridors biologiques ainsi identifiés.

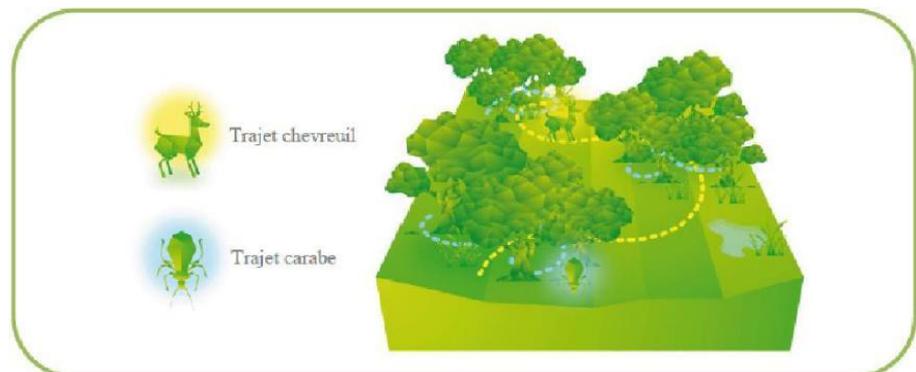


Figure 2 : Illustration du fonctionnement des déplacements individuels simulés par SimOïko

2.1 Le simulateur SimOïko® | Concepts mis en jeu et fonctionnement du simulateur

Fonctionnement du réseau écologique

SimOïko permet d'évaluer la fonctionnalité des réseaux écologiques. En effet, il est le seul outil de modélisation où le déplacement des individus est étroitement lié à la dynamique des populations des patches émetteurs d'individus dispersants. SimOïko permet ainsi de réaliser une analyse de la fonctionnalité des réseaux écologiques à l'échelle du réseau dans son ensemble. Il permet ainsi :

- Le diagnostic de la fonctionnalité des réservoirs et corridors.
- La détection de corridors en pas japonais ou de patches relais dans le cas où les corridors biologiques sont ponctués de patches d'habitats potentiels présentant des dynamiques d'extinction-recolonisation importantes (patch trop petit, de qualité insuffisante ou trop peu connectée pour permettre de constituer un réservoir fonctionnel).
- D'identifier la source des problèmes de fonctionnement du réseau (présence d'obstacle ? Structure paysagère inadaptée ? Qualité de l'habitat ? ...).
- La hiérarchie des actions de protection/restauration.

Ainsi, à titre d'exemple, un patch de qualité insuffisante voit sa population disparaître. De ce fait, même si la structure paysagère alentour est favorable au déplacement des individus, et donc à la présence de corridors, ceux-ci ne sont pas fonctionnels. Dans cet exemple, la source du problème est la qualité du patch. La hiérarchisation des actions permet d'améliorer la qualité du patch.

Affinité au milieu et coefficients de perméabilité

La méthode de calcul des coefficients de perméabilité utilisée par TerrOïko permet de traduire, dans les algorithmes de dispersion, la modification des capacités de dispersion d'une espèce en fonction du type de milieu traversé.

La définition de cette interaction entre l'espèce modélisée et les milieux naturels lors des événements de dispersion passe par l'estimation de coefficients de perméabilité. Une estimation de ces coefficients, sans protocole d'acquisition ni harmonisation entre sources d'information (avis d'expert et littérature), peut aboutir à des biais de résultats (certains experts notent entre 1-5 d'autres entre 1-100, ...). Dans un souci d'harmonisation de la méthodologie d'estimation de ces coefficients de perméabilité, TerrOïko utilise une procédure plus représentative de la réalité de terrain.

Les coefficients de perméabilité estimés par TerrOïko sont normalisés entre 1 et 10, où :

- La valeur 1 correspond aux milieux dans lesquels l'espèce peut se déplacer le plus loin (100 % de ses capacités).
- La valeur 10 correspond à un milieu infranchissable.

Le coefficient de perméabilité d'un milieu donné est alors estimé selon la réduction relative des capacités de dispersion de la guilda dans ce milieu par rapport au milieu de référence (de valeur 1).

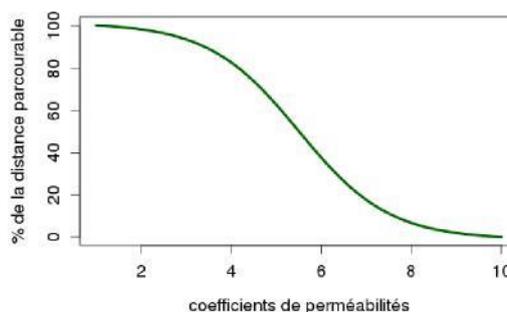


Figure 3 : Représentation des coefficients de perméabilité en fonction de la réduction de la distance parcourable

2.1 Le simulateur SimOïko® | Concepts mis en jeu et fonctionnement du simulateur

Affinité au milieu et coefficients de perméabilité

Selon les sources, l'information de capacité de dispersion d'une espèce dans un milieu est donnée :

- Soit par sa distance de dispersion (m).
- Soit par une mesure de l'efficacité de dispersion relative au milieu de référence (% ou coefficient de perméabilité sur une échelle linéaire bornée).

SimOïko réalise alors des conversions entre distance de dispersion et valeur du coefficient de perméabilité au cours du processus de normalisation. Ainsi, une réduction de 1 point du coefficient de perméabilité peut tout à fait être traduite en une réduction de la distance de dispersion et vice-versa. Ainsi, au cours de la validation des coefficients de perméabilité par des experts locaux, ceux-ci peuvent renseigner l'un ou l'autre des paramètres sans impact sur cette méthode de calcul.

Sur des terrains accidentés, la topographie est susceptible de modifier les interactions espèces/milieus naturels en amplifiant la difficulté d'un individu à traverser un milieu donné lorsque la pente est importante. SimOïko est capable de modifier les capacités de déplacement des individus en fixant un angle seuil au-delà duquel les espèces ne sont plus capables de traverser le milieu.

Données d'entrées

Aire d'étude, occupation du sol et topographie

L'aire d'étude pour les deux cas d'étude est de 5 km autour du linéaire ou du point de projet. Cette aire d'étude permet d'éviter les effets de bords générés par l'utilisation du modèle (Moulherat, 2014). Elle permet également de comprendre l'intérêt de cette zone pour toutes les espèces simulées. Cette largeur de bande permet de réaliser un diagnostic à fine échelle de l'effet du projet sur les déplacements des espèces les plus sensibles à la fragmentation (petites et moyennes espèces à capacité de dispersion faibles) (<1 km) à moyenne (<5 km) et faibles tailles de populations (Fahrig 2003). Cette largeur de zone d'influence est aussi pertinente pour les espèces de plus grandes tailles et à meilleure capacité de dispersion (>5 km) (grands mammifères, oiseaux, chiroptères). Pour ces dernières, les modifications dans le comportement de dispersion sont détectées.

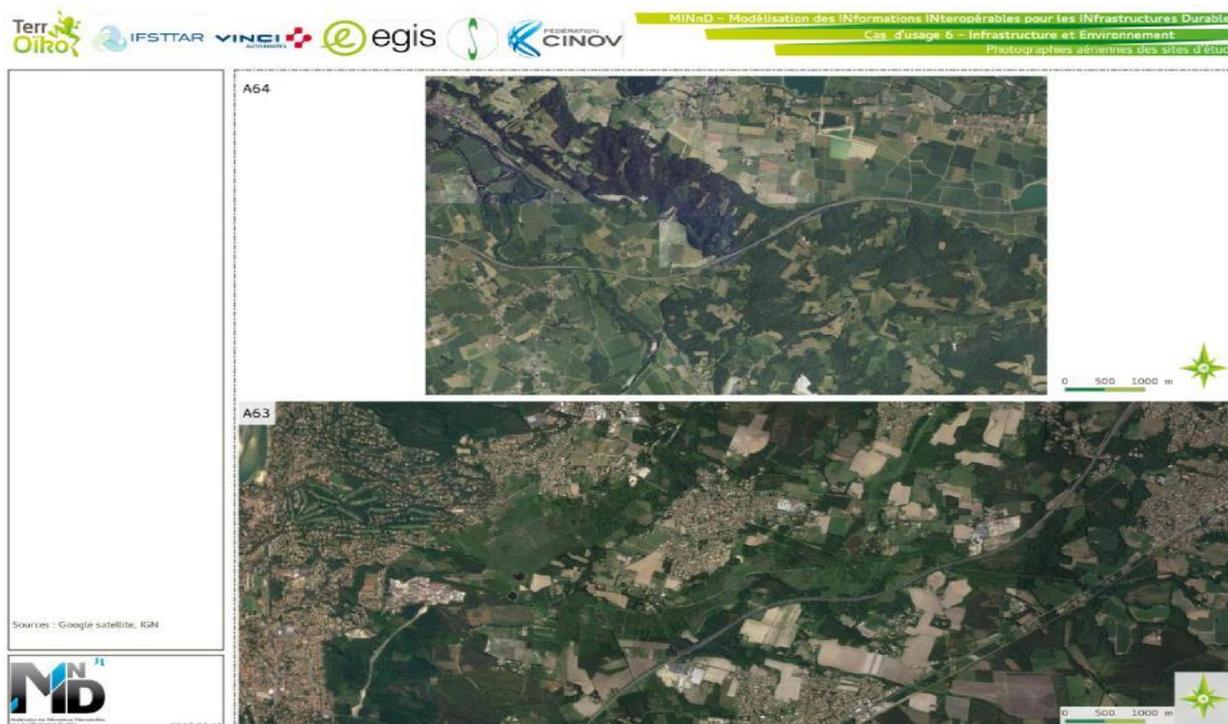


Figure 4 : Photographies aériennes des sites d'étude

2.1 Le simulateur SimOïko® | Données d'entrées

Aire d'étude, occupation du sol et topographie

SimOïko utilise comme donnée d'entrée principale, une cartographie de l'occupation du sol au format ESRI shapefile. La couche d'occupation du sol doit être définie sur la totalité de l'aire d'étude. L'ensemble des polygones qui la constitue doit être parfaitement jointif et la couche ne doit pas présenter de problèmes de topologie :

- Pas de superposition de polygones.
- Pas d'auto-intersection de polygone.
- Etc.

La table attributaire de cette couche doit comprendre à minima 1 champ de définition de l'occupation du sol utilisant de préférence la codification CORINE Land Cover ou CORINE Biotope ou EUNIS (des codifications « custom » sont possibles).

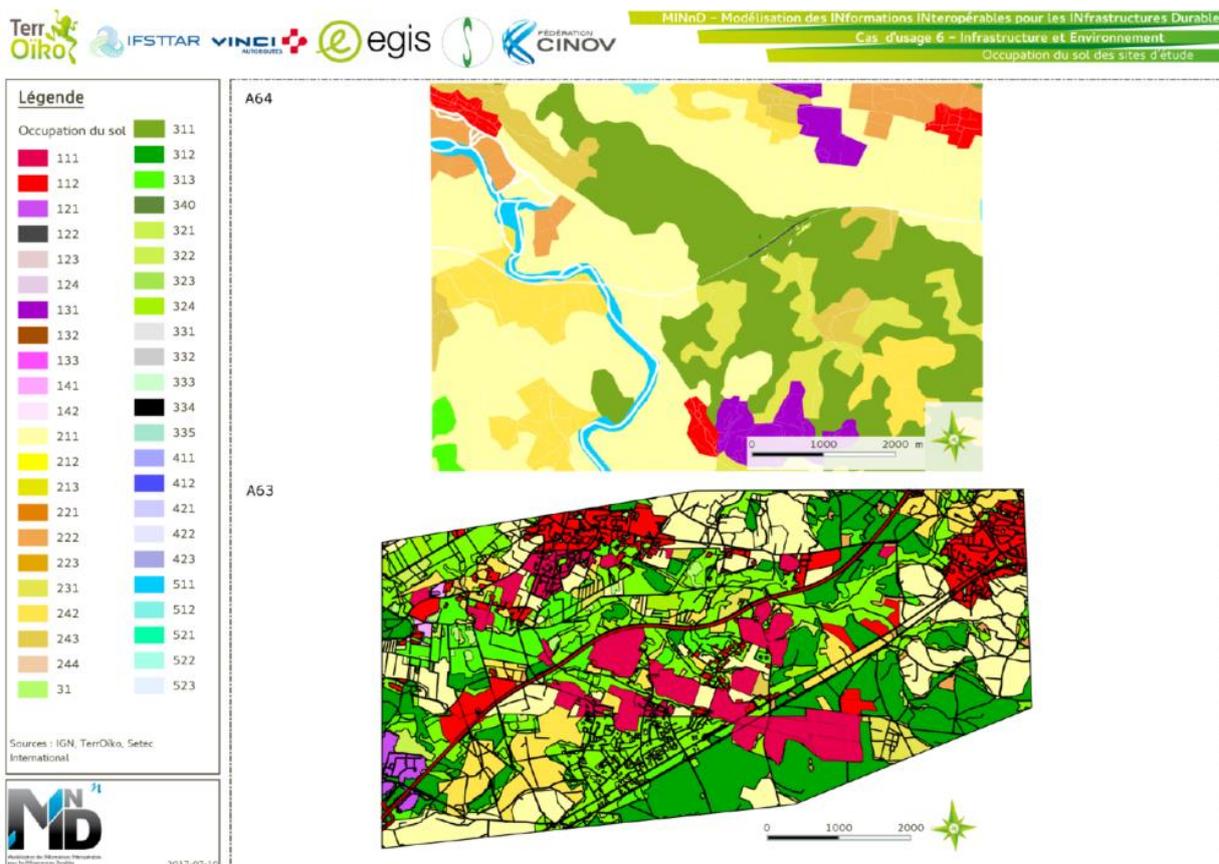


Figure 5 : Extrait de Cartes d'occupation des sols des 2 zones

2.1 Le simulateur SimOïko® | Données d'entrées

Aire d'étude, occupation du sol et topographie

Optionnellement, il est possible d'intégrer la topographie (le relief) à l'analyse. Pour ce faire, les données doivent être fournies au format nuage de point (x, y, z) ou raster.

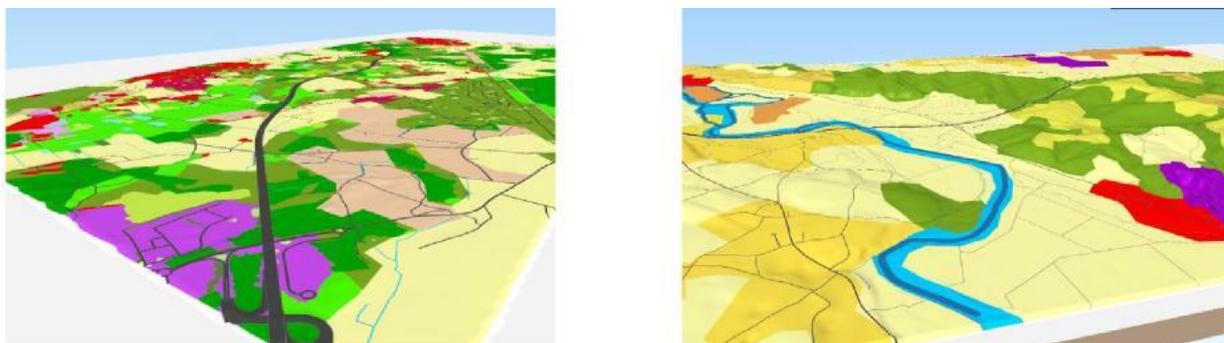


Figure 6 : Occupation du sol plaqué sur le MNT – A63 à gauche, A64 à droite

Écologie des espèces simulées

Une fois le paysage d'étude identifié, il s'agit de savoir quelles espèces sont simulées et de décrire leur cycle de vie. Les données d'entrée à cette étape sont donc aisément paramétrables grâce aux informations de la littérature scientifique et technique concernant :

- L'espérance de vie de l'espèce.
- La fécondité de l'espèce.
- La distance de dispersion de l'espèce.

SimOïko a de plus une base de données propre de près de 150 espèces préconfigurées et utilisées en routine.

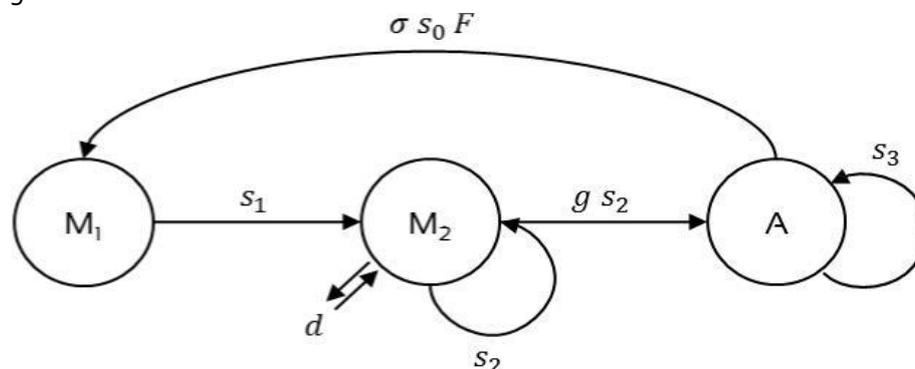


Figure 7 : Représentation du cycle de vie pour le triton palmé.

Ces données sont soit extraites directement de la base de données de TerrOïko soit entrées manuellement dans l'interface utilisateur existant. Dans les deux cas, le simulateur utilise un fichier .xml pour construire le cycle de vie.

Paramètre	Symbole	Description
Classe d'âge : Métamorphe	M	Classe d'âge correspondant aux métamorphes d'âge i
Classe d'âge : Adulte	A	Classe d'âge correspondant aux adultes reproducteurs
Sexe ratio primaire		Sexe ratio des œufs au moment de la ponte
Survie	s	Probabilité de survie annuelle des individus de la classe i
Fécondité	F	Fécondité moyenne des femelles (nombre d'œufs/pontes)
Dispersion	d	Probabilité qu'un individu disperse
Densité dépendance	g	Fonction de densité dépendance limitant la croissance de la population (compétition intraspécifique, ici fonction de Beverton-Holt)

Tableau I : Description des paramètres du cycle de vie

2.1 Le simulateur SimOïko® | Données d'entrées

Écologie des espèces simulées

À chaque type de milieu naturel identifié sur l'occupation du sol est alors associé un coefficient de friction dans la table attributaire de la couche d'occupation du sol. La couche vectorielle ainsi renseignée est rastérisée par SimOïko au format propriétaire GMC. Ces données d'entrées (informations concernant la facilité de l'espèce simulée à traverser différents milieux naturels) sont obtenues :

- Soit à partir de données de la littérature scientifique.
- Soit par la consultation d'experts naturalistes des espèces simulées.

Forme des résultats de simulation**Résultats démographiques**

SimOïko produit une grande variété de sorties concernant la dynamique des mé-tapopulations qu'il simule :

- La taille de population de chaque patch à chaque pas de temps et chaque répétition.
- La structure de population de chaque patch à chaque pas de temps et chaque répétition (nombre d'individus de chaque classe d'âge et sexe).
- Le nombre de petits produits ou taille de ponte, à chaque pas de temps et à chaque répétition.
- Le nombre de morts pour chaque classe d'âge à chaque pas de temps et chaque répétition.
- La probabilité d'extinction globale de la population en fin de simulation.

Ces données sont produites par le simulateur sous la forme de fichiers binaires spécifiques (.bin).

Les outils de post-traitement de la plateforme permettent d'extraire de ces données brutes des données synthétiques et spatialisées dans la table attributaire d'une couche cartographique au format ESRI shapefile :

- Les probabilités d'extinction et de recolonisation par patch et par pas de temps.
- Les tailles de populations moyennes (\pm intervalle de confiance 95 %).
- Les flux d'individus en provenance d'autres patches par pas de temps.

Résultats de déplacement

Lors des déplacements des individus simulés, chaque « pas » de l'individu est enregistré, ce qui permet de produire une carte de « fréquentation » des espaces. C'est-à-dire que le nombre de visites de chaque cellule de la carte est dénombré sur l'ensemble de la simulation. Ces résultats sont restitués au format ASCII pour assurer la compatibilité de lecture avec les outils SIG et CAO.

Résultats de génétique

À chaque pas de temps et pour chaque patch, une série d'estimateurs génétiques est évaluée et stockée dans un fichier binaire spécifique. Les estimateurs produits sont des estimateurs classiques de génétique du paysage (Fst, Fis, Fit, He, Ho).

En fin de simulation, il est aussi optionnellement possible de sortir des fichiers texte préformatés utilisés dans le logiciel STRUCTURE. Cela permet d'analyser la structure génétique des populations (isolement relatif des patches, clustering génétique ...) (Pritchard et al., 2000).

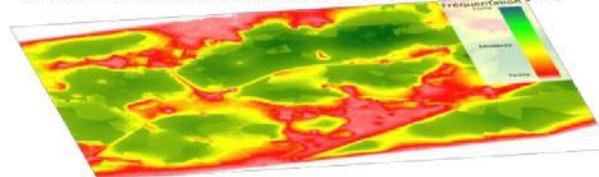
2.1 Le simulateur SimOïko®

Méthode d'analyse et de comparaison des scénarios

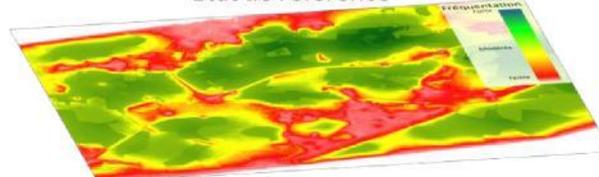
Dans les deux cas de figure, la méthodologie de comparaison et d'évaluation des scénarios est la même et se déroule en 4 étapes :

1. Simulation de l'état initial (sans aménagement) : état de référence pour les tailles de populations, probabilités d'extinction, déplacements
2. Simulation des scénarios : états attendus suivant les différents scénarios.
3. Comparaison entre résultats des scénarios et état initial (différence entre le résultat d'un scénario et l'état de référence).
4. Comparaison entre les résultats.

Etat attendu suite à la mise en œuvre du projet



Etat de référence



Variation du fonctionnement de la métapopulation

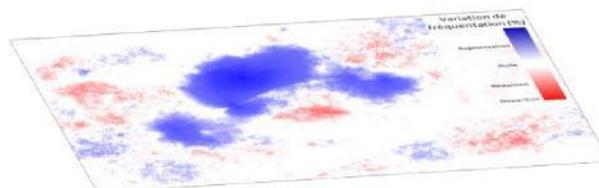


Figure 8 : Schéma de construction des cartes de comparaison entre résultats de simulation ; exemple de la variation de fréquentation

2.2. Simulations sur l'A63

Rappel du contexte écologique

Le site étudié pour l'A63 est composé essentiellement de boisements, encadrés par la présence de deux zones humides au nord et au sud.

Sur la zone, plusieurs espèces d'enjeux faunistiques faibles à fort ont été inventoriées, dont trois espèces de chiroptères présentant des enjeux de faible à majeur.

Le projet d'élargissement à 2x3 voies de l'A63 prévoit des aménagements sur les ouvrages hydrauliques existants, mais pas l'implantation d'un ouvrage spécifique de type chiroptéroduct.

Présentation des scénarios

La première simulation est basée sur l'état actuel du site, pour déterminer le fonctionnement du réseau écologique pour les chiroptères. Celle-ci a été complétée par deux autres simulations :

- Une première portant sur la création d'un chiroptéroduct au nord.
- Une seconde avec l'implantation du même ouvrage plus au sud (voir figure 10).

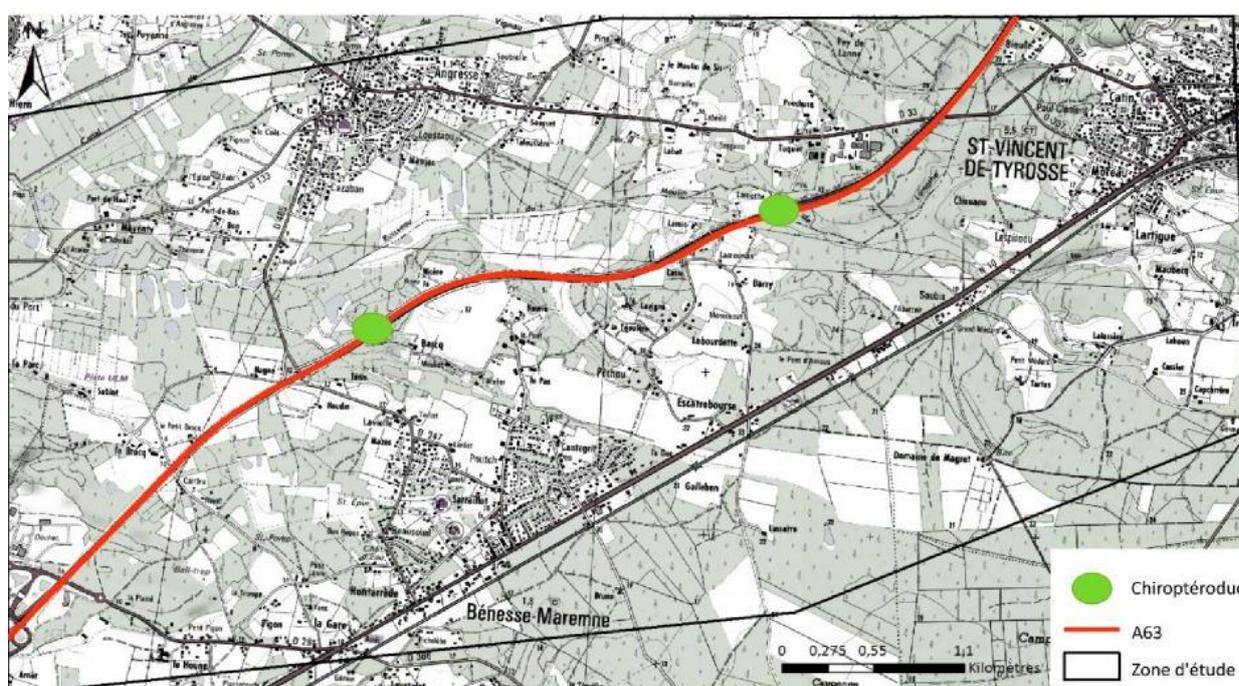


Figure 9 : Localisation des chiroptéroducts sur la zone d'étude

Choix d'espèces cibles pour les simulations

Ces simulations ont été réalisées pour deux espèces de chiroptères :

- Le *minioptère de Schreiber*, espèce à enjeux majeurs recensée sur la zone d'étude.
- Les *rhinolophes*, espèces non recensées sur le site. Elles sont choisies pour les simulations à cause de leurs tendances au vol bas, potentiellement source de collision avec les usagers de l'autoroute.

2.3. Simulations sur l'A64

Rappel du contexte écologique

Le milieu naturel autour de l'écopont est constitué de boisements, landes, tourbières, zones humides, prairies et cultures. L'A64 fragmente ce milieu et affecte ainsi ses fonctions de corridor écologique (identifié par le SRCE). L'implantation d'un écopont au niveau d'un point de rupture de ce corridor a donc été décidée par Vinci dans le cadre du paquet vert autoroutier. Il doit permettre le franchissement de la faune, essentiellement des mammifères, de petite à grande taille.

Rappelons que l'objectif de ce cas d'étude est d'analyser l'apport potentiel des outils numériques pour rechercher et tester des adaptations fines du projet d'écopont prévu par Vinci sur l'A64.

Présentation des scénarios

Tout d'abord, une première simulation a été réalisée à partir de l'état initial du site, sans l'écopont et avec le tracé actuel des clôtures. Les autres simulations ont porté sur trois scénarios d'aménagements différents de l'écopont :

- Positionnement des clôtures.
- Positionnement de l'ouvrage.
- Modification de la topographie aux abords de l'ouvrage.

Ces scénarios vont du scénario le mieux adapté aux besoins de la faune, au scénario le moins adapté.

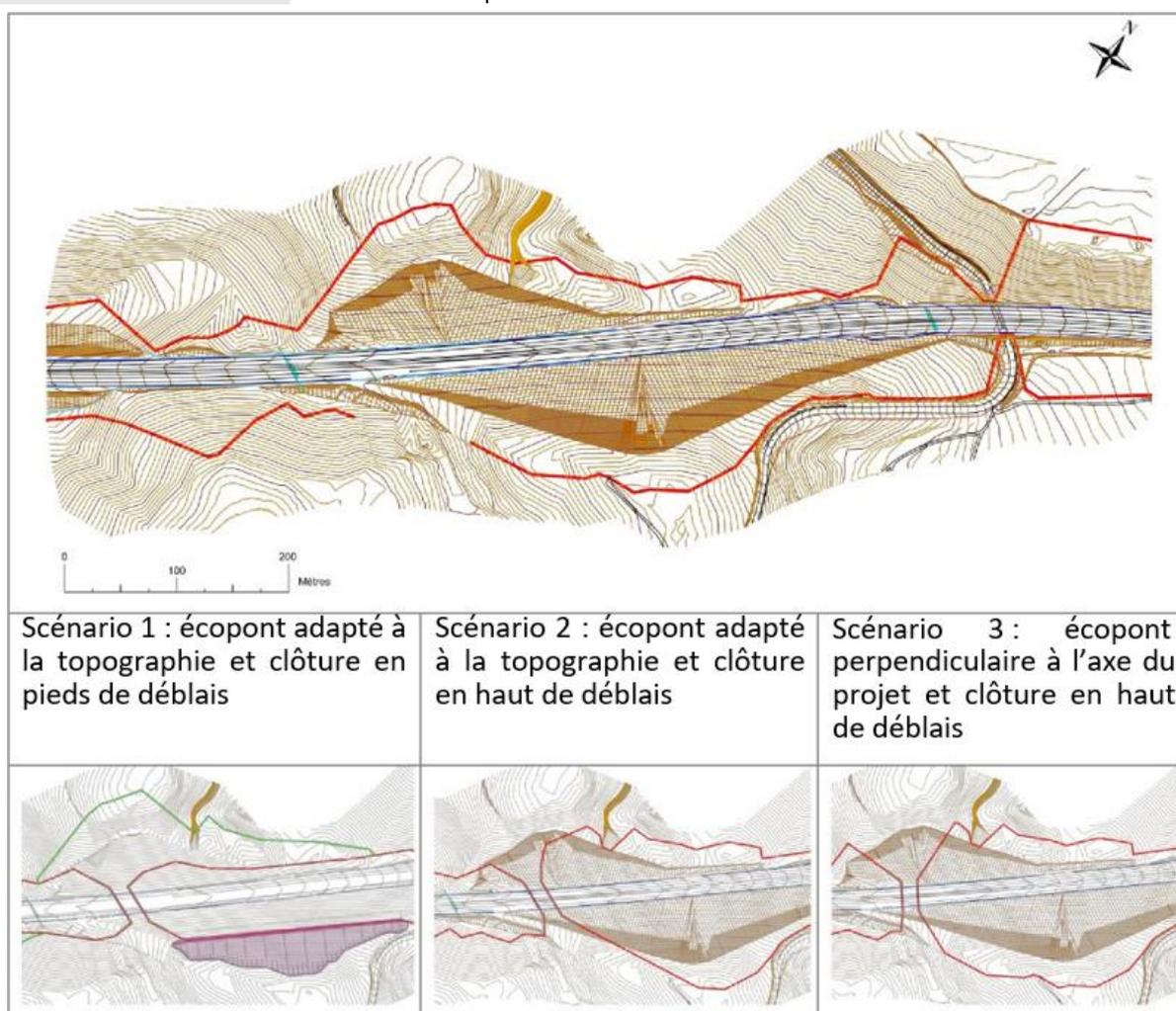


Figure 10 : Trois scénarios d'écopont testés dans les simulations

2.3 Simulations sur l'A64 | Présentation des scénarios

Scénario 1, a priori le mieux adapté aux besoins de la faune

Les clôtures ont été positionnées au plus proche de l'infrastructure, ce qui permet de conserver davantage d'espace naturel sans usage humain pour les déplacements de la faune. Une risberme, pour la zone d'entretien, a aussi été créée en milieu de talus le long de la clôture (car en situation réelle un entretien serait à prévoir). Le talus concerné a donc été aplani. Nous avons ajouté une clôture herbagère pour la sécurité des usagers, qui permet de délimiter le DPAC. Par rapport au scénario 2, les angles des panneaux en bois de l'écopont ont été ouverts afin de favoriser son emprunt.

Pour protéger les espèces, les clôtures doivent être infranchissables (hauteur élevée, renforcement petite faune).

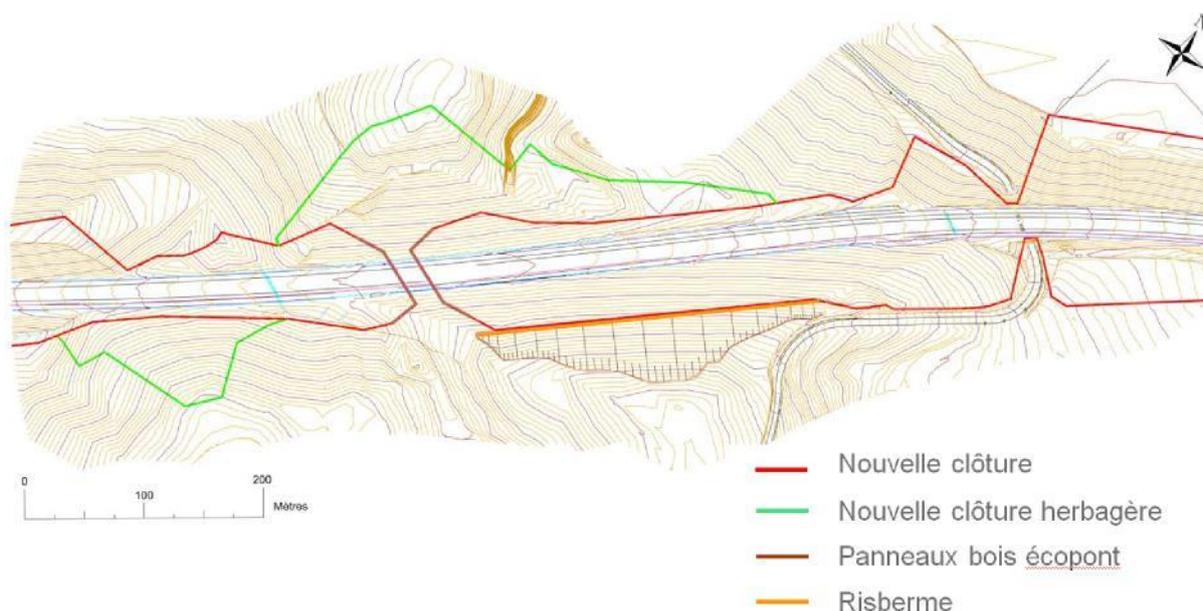


Figure 11 : 1^{er} scénario : le mieux adapté a priori à la faune

Scénario 2

Ce scénario correspond à ce qui est mis en place de manière classique. Le tracé de la clôture existante suit la limite du DPAC. Cette variante du tracé restreint l'espace de déplacement disponible pour la faune.

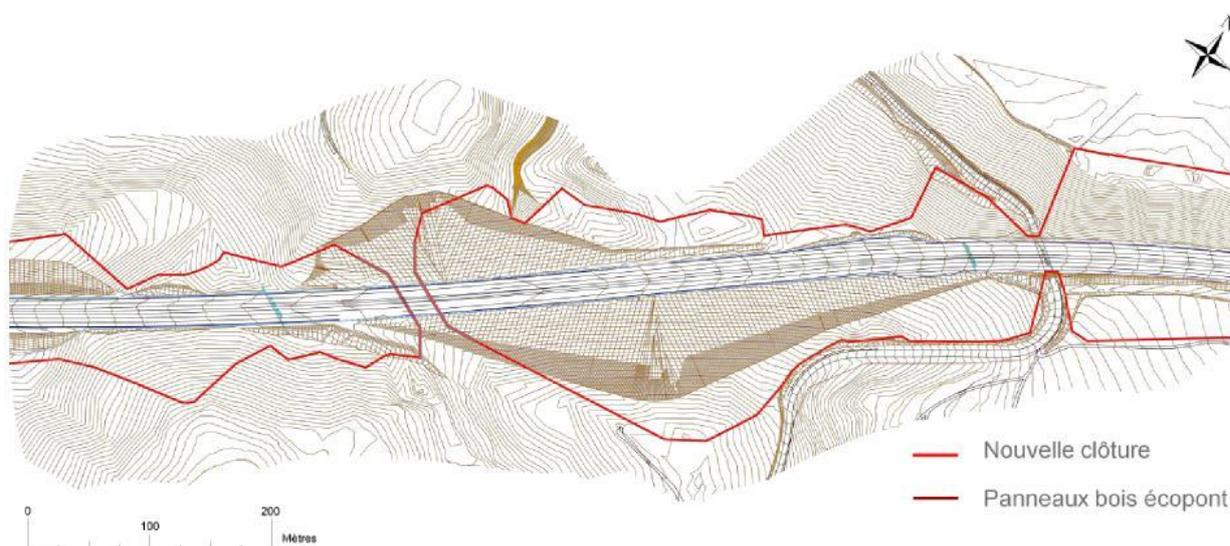


Figure 12 : 2^e scénario

2.3 Simulations sur l'A64 | Présentation des scénarios

**Scénario 3, optimisé
selon des critères
financiers**

Les panneaux en bois de l'écopont ont été placés en fonction de la topographie. Le tracé des clôtures, depuis le passage à faune, rejoint les clôtures existantes selon une distance minimale qui permet de réduire les coûts liés à l'implantation de nouvelles clôtures. L'ouvrage a été positionné perpendiculairement à l'autoroute, pour favoriser la réduction des coûts.

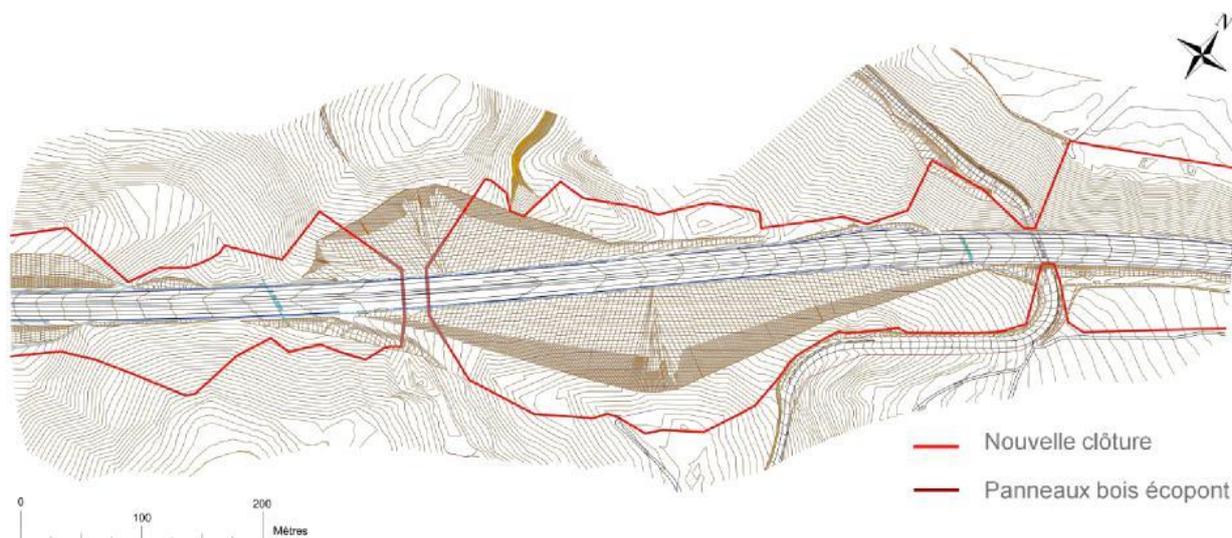


Figure 13 : 3e scénario

**Choix d'espèces cibles
pour les simulations**

Les simulations ont été réalisées pour trois espèces cibles de l'ouvrage présentant des caractéristiques écologiques contrastées :

- Le chevreuil : *Capreolus capreolus*.
- La martre : *Martes martes*.
- Le tircis : *Pararge aegeria*.

Le chevreuil

Le chevreuil est une espèce assez généraliste, longévive et aux capacités de dispersion très importantes. Cette espèce n'a donc pas peur d'approcher les secteurs anthropisés. Elle présente une bonne agilité dans ses déplacements bien qu'elle évite les pentes trop importantes.

La martre

La martre est une espèce inféodée aux milieux forestiers, discrète, à l'espérance de vie modérée et aux capacités de dispersion importante. Cette espèce reste dans la mesure du possible des secteurs fortement anthropisés. Elle est aussi très agile dans ses déplacements et est bonne grimpeuse.

Le tircis

Le tircis est une espèce de papillon forestier présentant un cycle annuel et aux capacités de dispersion modérées. Comme la plupart des papillons, ses déplacements sont influencés par la structuration verticale des milieux qu'il rencontre dans ses déplacements (Pe'er et al., 2005, Stevens et al., 2010, Turlure et al., 2011).

2.4. Données utilisées pour les simulations

Données produites

En fonction des éléments que nous souhaitons étudier, nous avons produit des données pour nos deux cas d'étude :

- Les **MNT** des projets de l'A63 et des trois scénarios de l'A64.
- La **carte d'occupation des sols** détaillée pour les deux sites d'études, établie en fonction des exigences imposées par le logiciel (voir ci-après).
- Le **tracé des clôtures** pour les scénarios de l'A64 (vu ci-dessus), tracés ensuite intégrés aux cartes d'occupation du sol de l'A64.
- Les **gîtes et habitats naturels des espèces** (issus de la base de données environnementale de Setec).

Pour pouvoir être exploitables dans le logiciel, les données doivent respecter une certaine standardisation. Nous allons donc détailler dans les paragraphes qui suivent, comment et dans quels formats les données ont été produites.

MNT

Pour obtenir un résultat satisfaisant, les données, dont les MNT, doivent couvrir une superficie suffisamment vaste. Les MNT fournis par Vinci, dans le cadre du projet MINnD, ont donc dû être couplés à des MNT couvrant une zone plus large. Pour cela, nous avons eu recours à la BD Alti à 5m de l'IGN.



Figure 14 : Emprise des 2 MNT : Vinci (petit) IGN (englobant)

2.4 Données utilisées pour les simulations | MNT

Pour les scénarios A64

Pour les scénarios A64, nous avons modifié les MNT ainsi créés en ajoutant les modélisations de l'écopont.

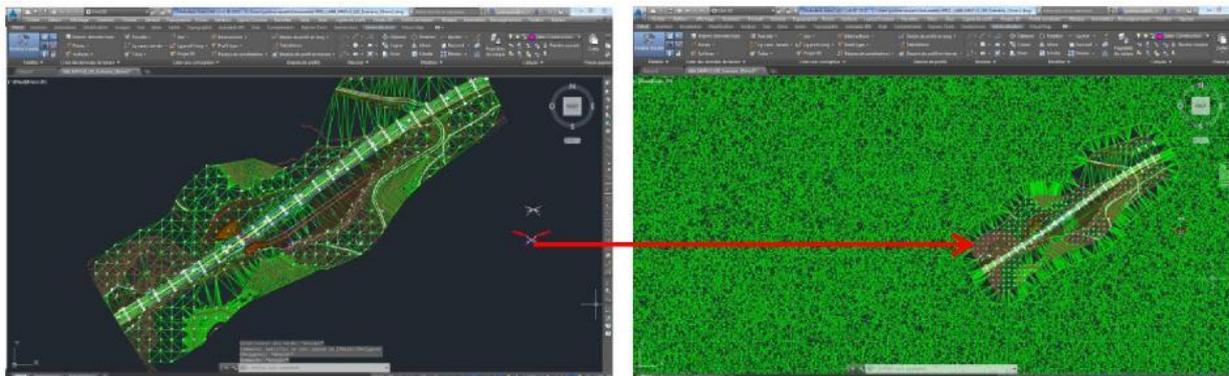


Figure 15 : MNT créée sous Civil 3D, depuis le fichier de levé topographique, puis fusionnée avec le MNT de l'IGN

Problèmes constatés

Les MNT ont été livrés par Vinci au format *.asc (raster). Il a fallu être particulièrement vigilant lors de l'export. Nous avons pu constater en effet, que les surfaces de MNT exportées depuis Civil 3D vers le format raster, présentent très souvent des erreurs. Outre ces erreurs de transformation, on note qu'un problème intervient fréquemment lorsque les partenaires travaillent :

- Sous des systèmes d'exploitation différents (Windows, Linux), configurés différemment (configuration : française, anglaise, *custom*).
- Avec des outils détectant plus ou moins bien les configurations système pour adapter automatiquement les formats de fichiers d'I/O.

En effet, dans ce cas le remplacement de points ou d'espaces par des virgules est fréquent et peut poser d'importants problèmes d'interopérabilité.

Un niveau de précision qui doit être cohérent

Par ailleurs, le niveau de précision du MNT doit être cohérent avec la précision choisie pour exécuter les calculs dans le logiciel. Nos simulations ont reposé sur un MNT dont les cellules mesurent 2m par 2m. Les calculs sont exécutés également selon cette précision de 2x2m.

2.4 Données utilisées pour les simulations

Carte d'occupation des sols

Des cartes qui ne doivent comporter aucune erreur de topologie

Les cartes d'occupation des sols ont été réalisées en couches *shapefile* pour les sites de l'A63 et de l'A64 à partir de :

- La fusion de couches des données issues de la BD topo de l'IGN.
- La digitalisation manuelle de polygones à partir d'orthophotographies.

Pour pouvoir être exploitables dans le logiciel, les cartes ne doivent comporter aucune erreur de topologie (trous, géométries invalides ou chevauchements de polygones).

Or lors de l'assemblage des couches dans le logiciel de SIG (Qgis ou Arcgis), de nombreuses erreurs se créent et il faut ensuite les corriger. Certaines de ces erreurs peuvent être détectées par des outils proposés par les logiciels de SIG (exemple du vérificateur topologique de Qgis).

Les corrections peuvent se faire manuellement, polygone par polygone ou au moyen d'outils (exemple des modules 'v.clean' de Grass). Ces outils améliorent la situation mais ne détectent pas tous les problèmes.

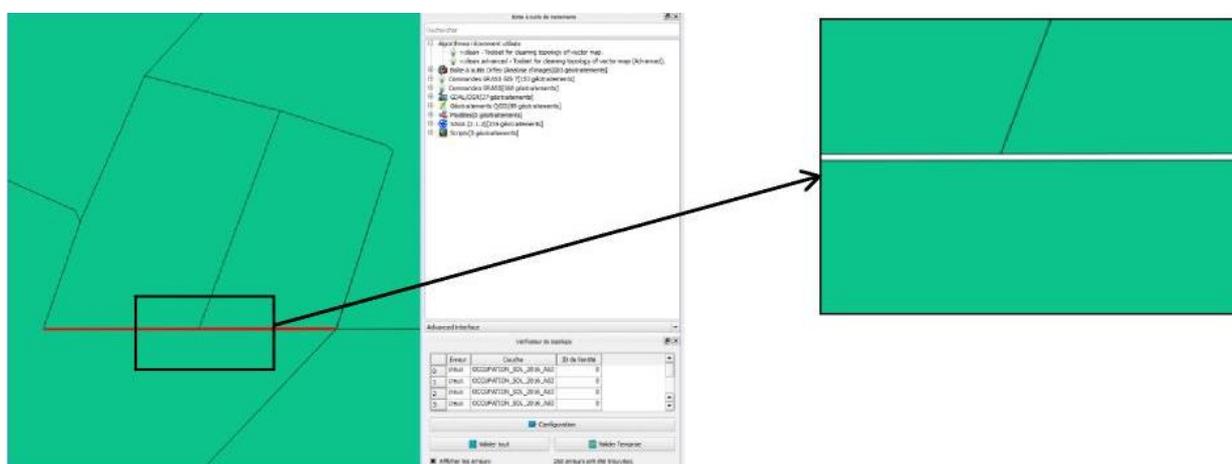


Figure 16 : Exemple d'erreur, « trou » dans la couche shapefile, détectée par le vérificateur topologique de Qgis

Un processus spécifique dans le cas où plusieurs simulations écologiques sont réalisées

Dans le cas où plusieurs simulations écologiques sont réalisées pour un projet, un processus spécifique doit être défini. Celui-ci doit notamment prévoir la formation du personnel et inclure la méthodologie de création des données nécessaires aux simulations, selon les résultats attendus. Le développement d'algorithmes et de programmes peut également être prévu, pour résoudre les problèmes de détection et de correction des erreurs géométriques.

Par exemple, en fonction de la procédure suivie pour créer la carte d'occupation du sol (ordre et type de requêtes exécutées) plus ou moins d'erreurs sont créées. Par conséquent, la rapidité et la validité de la carte d'occupation des sols créée dépendent à la fois des données de départ et de la méthode employée.

3. RESULTATS DE SIMULATION

3.1. Positionnement optimal d'un chiroptéroduct sur l'A63

Réponse à la question biologique posée

De manière globale, les résultats de simulations montrent que, quel que soit le choix de positionnement du chiroptéroduct, l'état de conservation global des deux espèces simulées n'est pas modifié par rapport à la situation actuelle. En effet, on ne constate pas de variation :

- Ni des tailles de populations par patch.
- Ni **des probabilités d'extinction.**

Toutefois, en termes de déplacements d'individus, **les résultats montrent que le positionnement ouest devrait être plus efficace que le positionnement est, et ce pour les deux espèces simulées.**

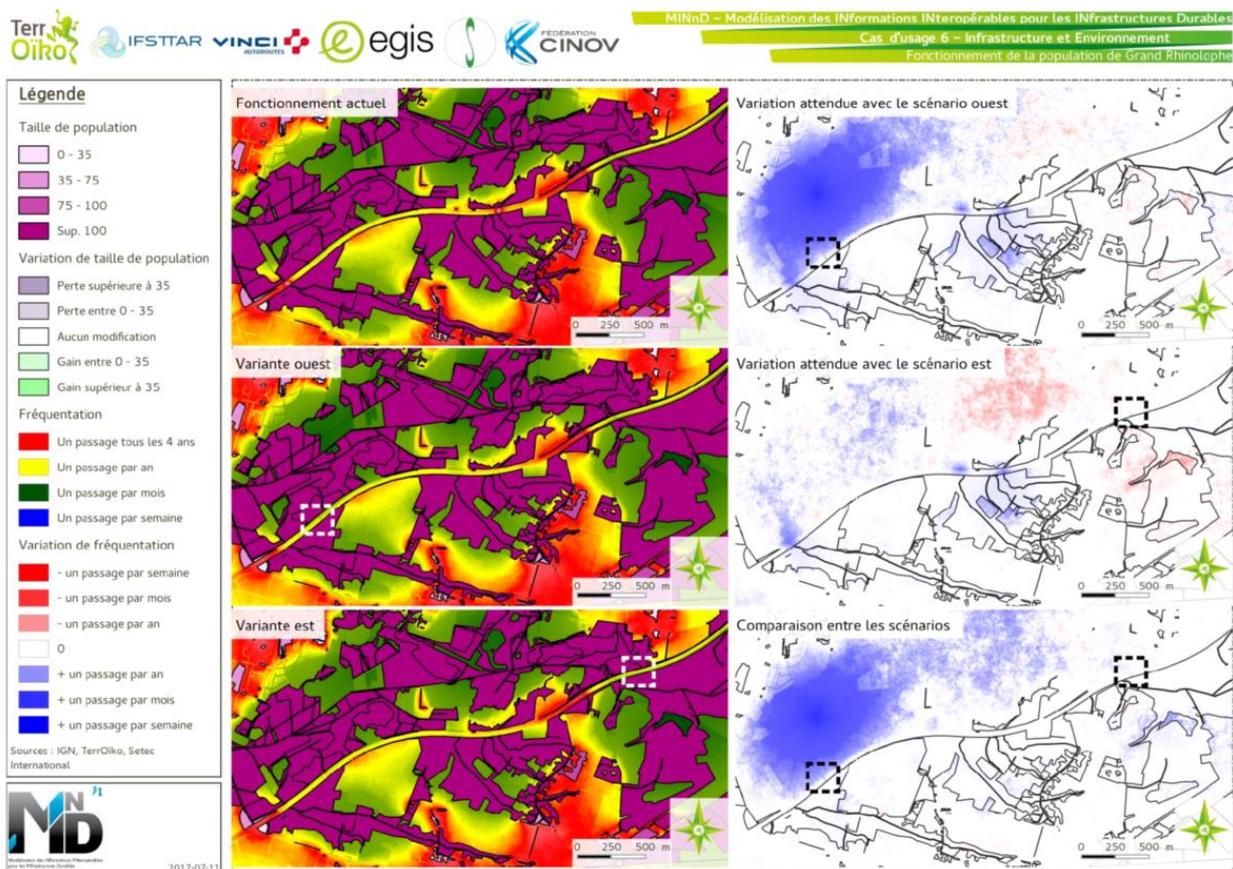


Figure 17 : Évaluation du fonctionnement de la population de rhinolopes en fonction des variantes d'implantation et comparaisons entre les scénarios

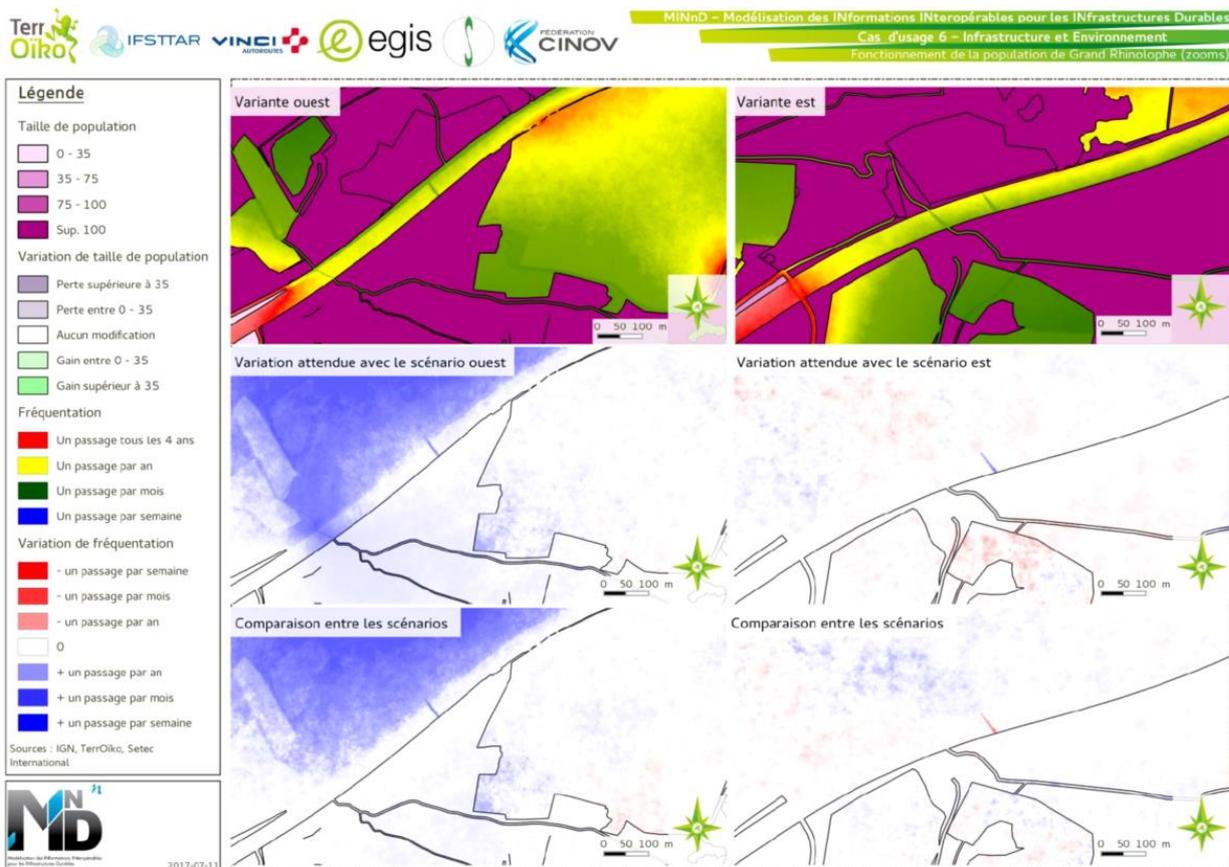


Figure 18 : Zooms sur le fonctionnement de la population de rhinolophes au niveau des emplacements potentiels du chiroptéroduct

3.1 Positionnement optimal d'un chiroptéroduct sur l'A63

Définition d'objectifs quantifiés pour le suivi d'efficacité de l'aménagement

Outre la réponse à la question primaire de connaître le meilleur emplacement du chiroptéroduct, les résultats fournissent directement les informations concernant l'effet attendu (relatif et absolu) de ce positionnement en termes de :

- Dynamique de populations.
- Fréquentation de l'espace par les chiroptères.

Ces estimations sont produites avec leur intervalle de confiance à 95 % (incertitude de l'estimation) et à un horizon de 50 ans. Elles sont donc utilisables directement pour fixer les objectifs quantifiés d'efficacité de l'ouvrage, la fourchette de tolérance autour de ces objectifs et l'ordre de grandeur des variations interannuelles. Les informations ainsi produites peuvent être historisées dans des « branches » différentes du projet (branche principale mise en œuvre et dérivations pour les scénarios non retenus).

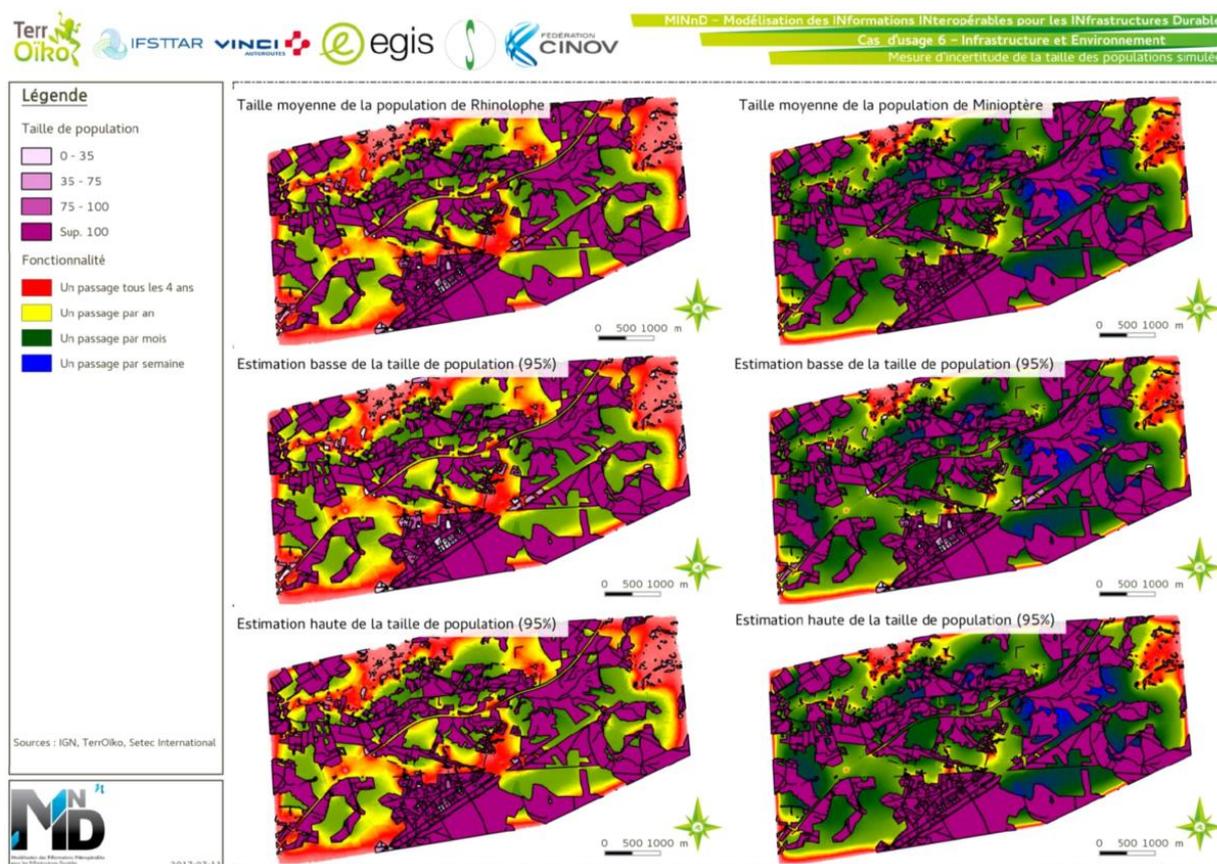


Figure 19 : Évaluation de l'incertitude sur la taille de populations de rhinolophes (intervalle de confiance à 95 %)

3.2. Interopérabilité et propagation de l'erreur

Des erreurs persistantes dans l'occupation du sol de l'état actuel

Des « trous » dans la carte de fréquentation des rhinolophes

Des problèmes venant de mauvaises jointures entre polygones

Une erreur générée se propage dans la suite de l'analyse

Une erreur détectée par SimOïko

Malgré les traitements multiples (automatisés et manuels) réalisés pour assainir les couches d'occupation du sol, des erreurs ont persisté dans l'occupation du sol de l'état actuel. Ces erreurs dans la donnée d'entrée entraînent des erreurs d'estimations de la fréquentation des chiroptères dans les secteurs concernés.

Ainsi, la carte de fréquentation obtenue pour les rhinolophes dans l'état actuel présente des « trous » dans les secteurs entourés en blancs. Ces « trous » induisent une réduction locale de la fréquentation liée aux problèmes topologiques de la couche cartographique d'entrée. Les erreurs de topologie identifiées dans l'état actuel (figure 19 haut) pour les rhinolophes ne sont par contre plus présentes dans le scénario plaçant le chiroptéroduct à l'ouest. C'est pourquoi la carte de variation de fréquentation (figure 19 bas) présente des variations associées à ces erreurs topologiques et non pas à des modifications du fonctionnement du réseau écologique imputables à la présence de l'ouvrage.

Dans le cas présent, les problèmes viennent de mauvaises jointures entre polygones qui n'ont pas été détectées par l'opérateur. Toutefois, ce type d'erreur arrive aussi sur des couches où les polygones sont parfaitement jointifs. En effet, dans certaines conditions (qui restent à déterminer finement), certains algorithmes de *rastériser* génèrent des « trous » dans les cartes.

Une fois l'erreur générée dans le résultat de simulation sur l'état actuel, elle se propage dans la suite de l'analyse qui consiste à faire des différences entre l'état attendu suite à la mise en œuvre d'un scénario et l'état actuel.

Ce type d'erreur est détecté et signalé automatiquement par SimOïko, mais ce n'est pas le cas de tous les logiciels. Dans la perspective de la mise en œuvre de ce type d'outil dans le BIM, il semble donc important de mettre en place des systèmes de contrôle de l'intégrité de la donnée transformée **robuste** à la fois en fin de conversion d'un format vers un autre et en entrée d'utilisation.

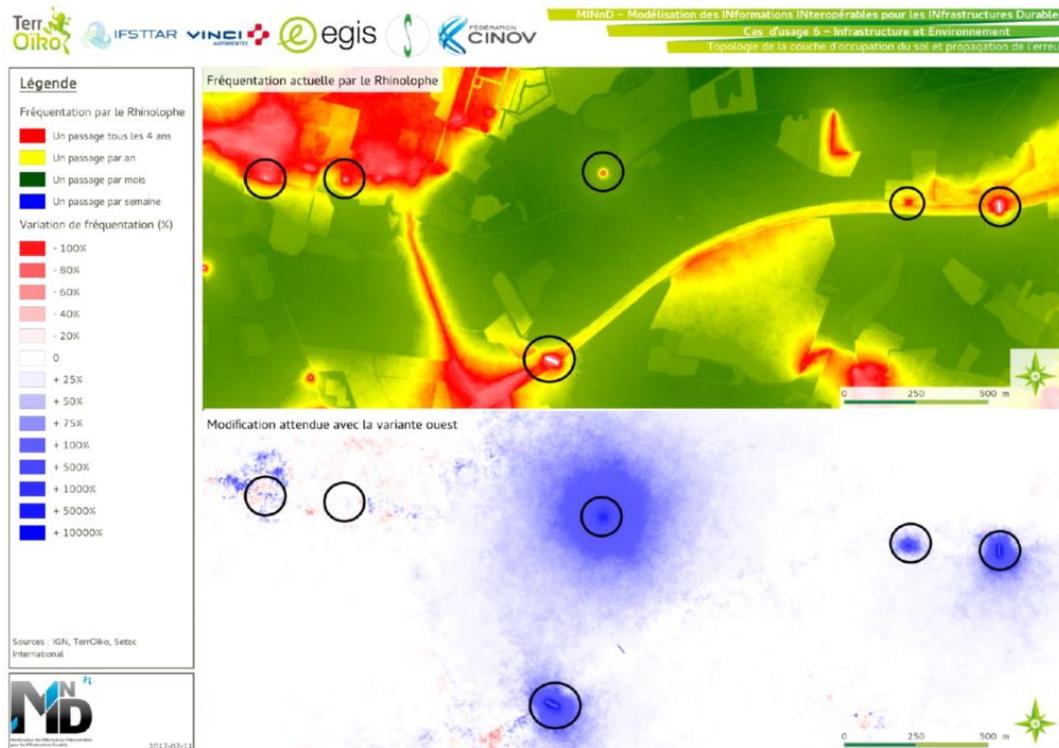


Figure 20 : Problème de topologie de l'occupation du sol et propagation de l'erreur

3.3. Design optimal de l'écopont de l'A64

Réponse à la question biologique posée

Globalement deux réponses sont possibles. D'un point de vue écologique *stricto sensu*, le scénario 1 est le plus favorable à la biodiversité forestière ciblée par le cas d'étude. Cependant, au regard de l'état de conservation général des espèces concernées, les scénarios 1 et 2 sont équivalents. En effet, ces 2 scénarios sont équivalents en termes de tailles de populations finales et de probabilités d'extinction des espèces concernées. La seule différence entre eux réside dans une plus grande facilité à utiliser l'écopont dans le scénario 1.

Ces résultats sont similaires pour le chevreuil et la martre. Le tircis quant à lui ne présente pas de variation de tailles de populations ou de probabilités d'extinction, quel que soit le scénario retenu (y compris l'état actuel). Cela s'explique par les densités importantes de papillons qui peuvent être abritées par les grands massifs forestiers de part et d'autre de l'autoroute. Ainsi, pour le tircis, seul le flux de part et d'autre de l'autoroute est modifié par la présence de l'écopont quel que soit le scénario d'aménagement prévu. Pour cette espèce, les 3 scénarios sont équivalents.

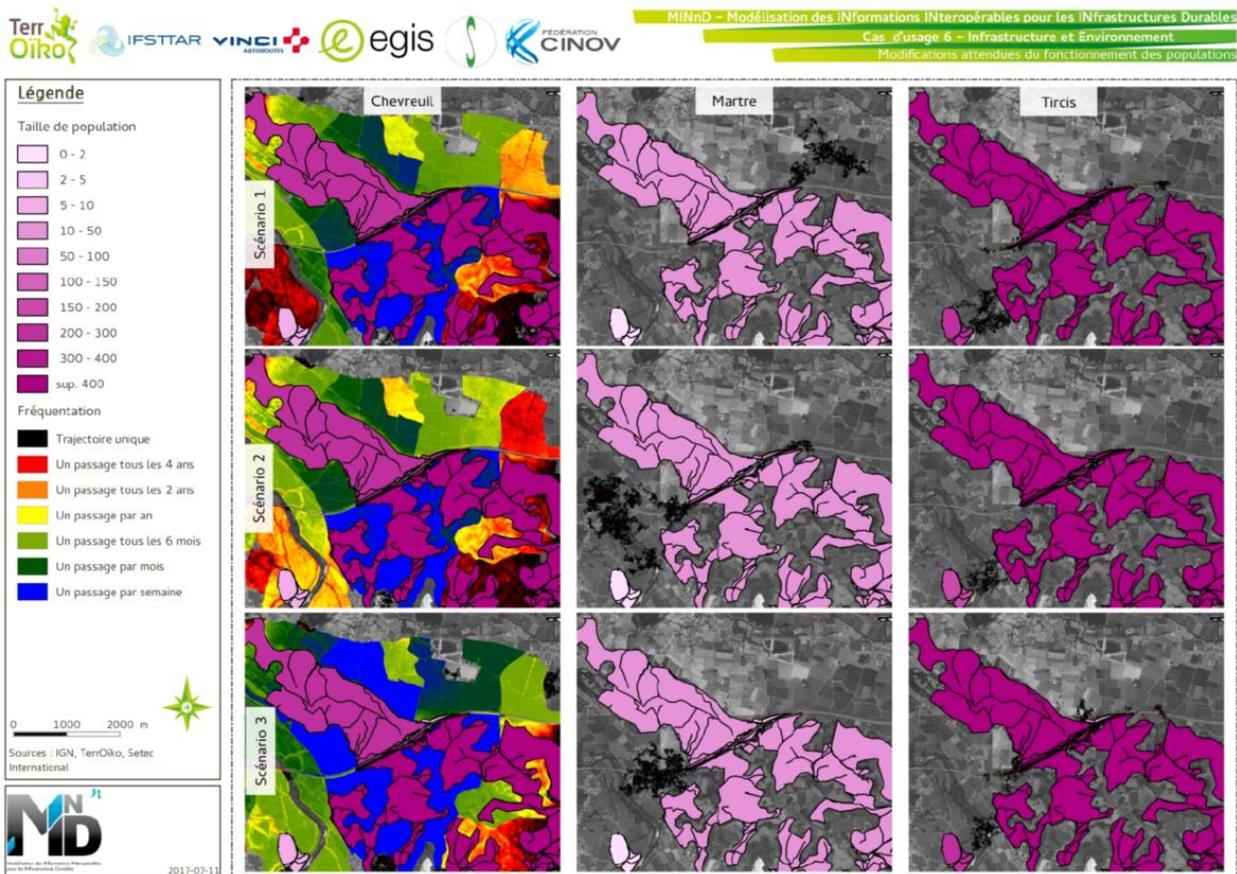


Figure 21 : Fonctionnement attendu des populations locales de chevreuils (*Capreolus capreolus*) martres (*Martes martes*) et tircis (*Pararge aegeria*) en fonction des scénarios

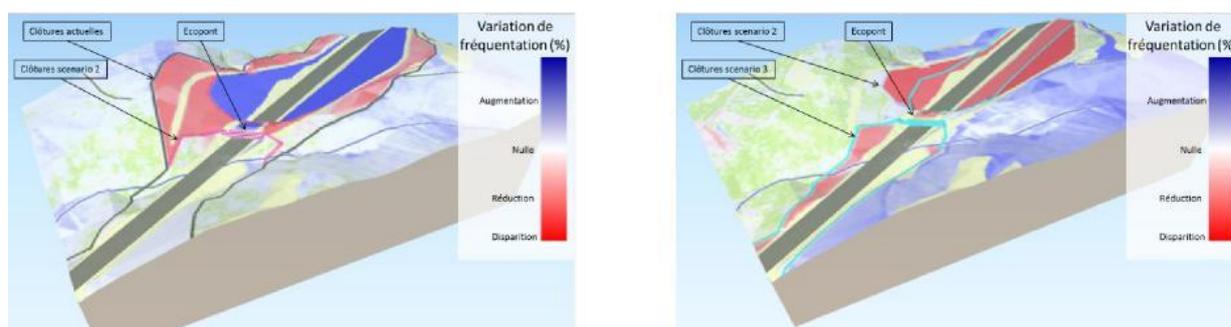


Figure 22 : Pour la martre (*Martes martes*), le scénario 2 permet la traversée de l'autoroute (figure de gauche, comparaison entre l'état actuel et l'état attendu suite à la mise en œuvre du scénario 2). Le scénario 1 permet une fluidification du passage des martres sur l'écopont (figure de droite comparant les états attendus suite à la mise en œuvre du scénario 1 comparé à l'état attendu suite à la mise en œuvre du scénario 2) mais n'améliore pas l'état général de conservation de la population locale de martres

Interopérabilité, génération d'erreurs et difficultés d'interprétation des résultats

Génération d'erreurs et d'anomalies dans les simulations

Dans ce cas d'étude, nous avons opéré la collecte de données à travers plusieurs sources d'informations.

Dans cette séquence de collecte de données, nous avons créé un MNT à partir de la BD alti 5m et du modèle de conception de l'ouvrage. Toutefois, il est évident qu'il existe une anomalie de topographie (figure 23) qui entraîne une sous-estimation de la fréquentation à proximité de l'écopont au sud de l'autoroute.

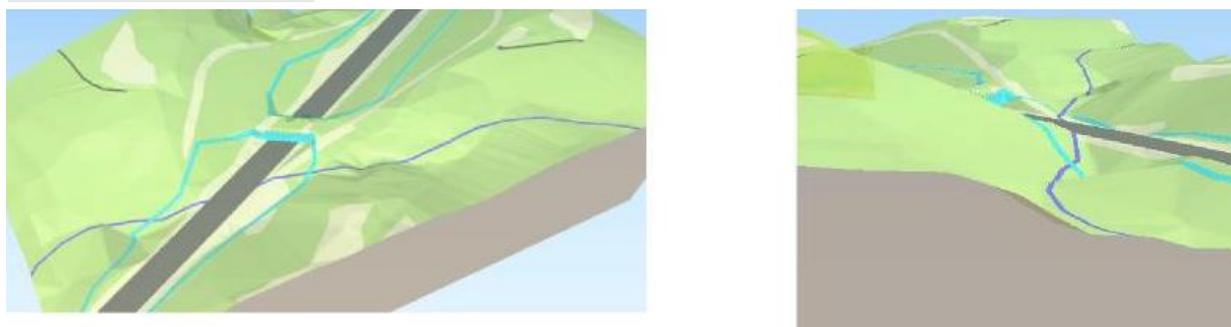


Figure 23 : Le cours d'eau qui traverse l'autoroute (bleu foncé) ne suis pas la ligne de fond de vallée et son altitude n'est pas cohérente (présence de multiples creux et bosses)

SimOïko est en mesure de simuler des espèces aquatiques ou le déplacement de graines à la surface de l'eau. De telles anomalies dans le MNT faussent totalement les résultats qui auraient pu être obtenus en travaillant sur le cours d'eau.

Avec l'utilisation du BIM, une telle anomalie ne serait pas passée inaperçue et le MNT aurait probablement été affiné. Il est d'ailleurs très probable que les données de conception (tracés, études hydraulique...) de l'autoroute permettent de corriger cette anomalie dans le cadre de l'étude de conception de l'écopont. Cet exemple permet de mettre en avant plusieurs avantages du BIM :

- L'étude de conception de l'écopont n'est plus une étude à côté de celle de l'autoroute mais devient partie intégrante de son BIM.
- La visualisation 3D permet de détecter très rapidement des anomalies et de visualiser aisément les modifications engendrées par l'écopont.
- Le BIM est une importante source de données consolidées pouvant entrer dans l'étude de conception de l'écopont.
- Beaucoup de données de différents types sont accessibles directement dans le BIM permettant une économie importante sur les phases de collecte, compilation, homogénéisation, formatage des données des phases initiales d'études.

3.3 Design optimal de l'écopont de l'A64 | Interopérabilité, génération d'erreurs et difficultés d'interprétation des résultats

Contiguïté des polygones et difficultés d'interprétation des simulations

Au cours de l'élaboration des occupations du sol des scénarios, le déplacement des clôtures d'un scénario à l'autre génère des problèmes de contiguïté entre les segments de clôture. C'est-à-dire que certains « microtrous » dans les clôtures ont été générés pendant la digitalisation. Ces « microtrous » se sont élargis pendant la phase de rasterisation. Des individus en mouvement ont donc pu se trouver à tourner en rond entre les clôtures et l'autoroute. Cela amplifie artificiellement très fortement la fréquentation de cet espace dans certains scénarios.

Bien que ce type de problème soit facilement explicable et n'altère pas l'interprétation des résultats, leur présentation et leur explication en deviennent plus complexes pour un utilisateur non averti.

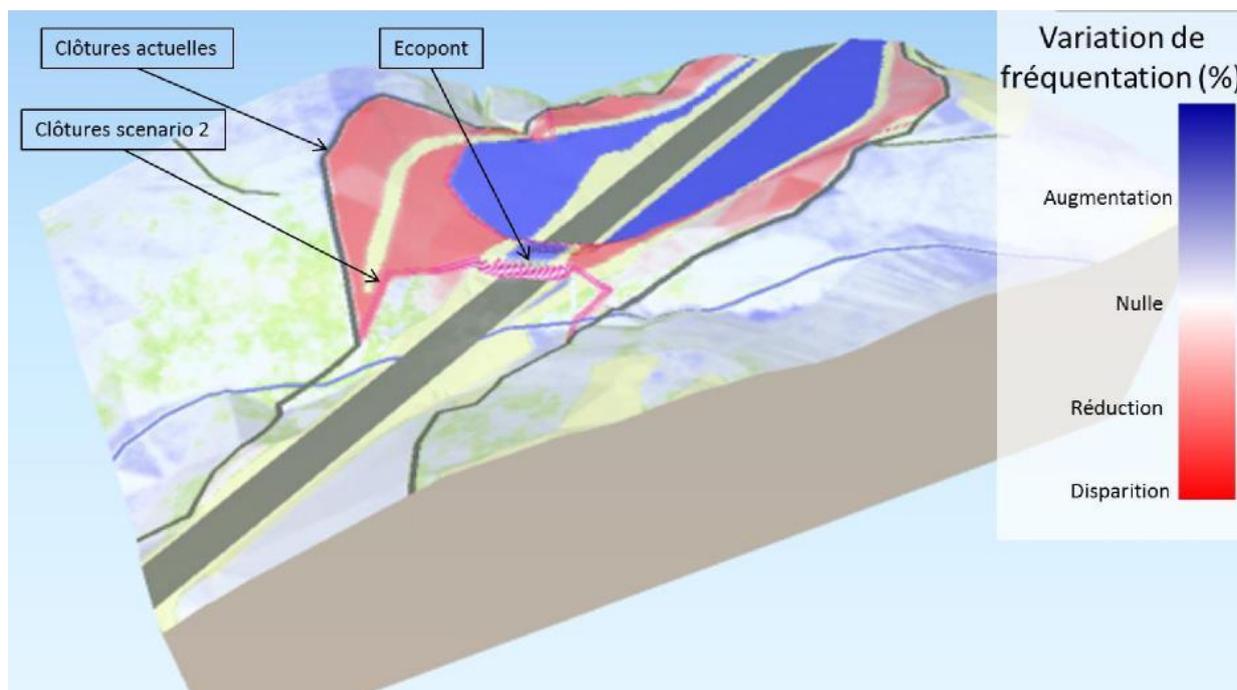


Figure 24 : L'augmentation observée de la fréquentation entre les clôtures et l'autoroute (bleu dense) correspond aux déplacements d'individus tournant en rond dans cet espace dans le scénario 2. Dans les secteurs rouge dense, la même observation peut être faite dans le scénario sans passage à faune. Le nombre d'individus simulés tournant en rond dans ces zones chute avec la modification du tracé des clôtures qui concentrent les individus tournant en rond dans le secteur entre clôture et autoroute

4. PERSPECTIVES BIM

4.1. Intégration des résultats dans la maquette numérique, établissement d'un workflow adapté

Schéma de synthèse

Le schéma de synthèse est présenté ci-après :

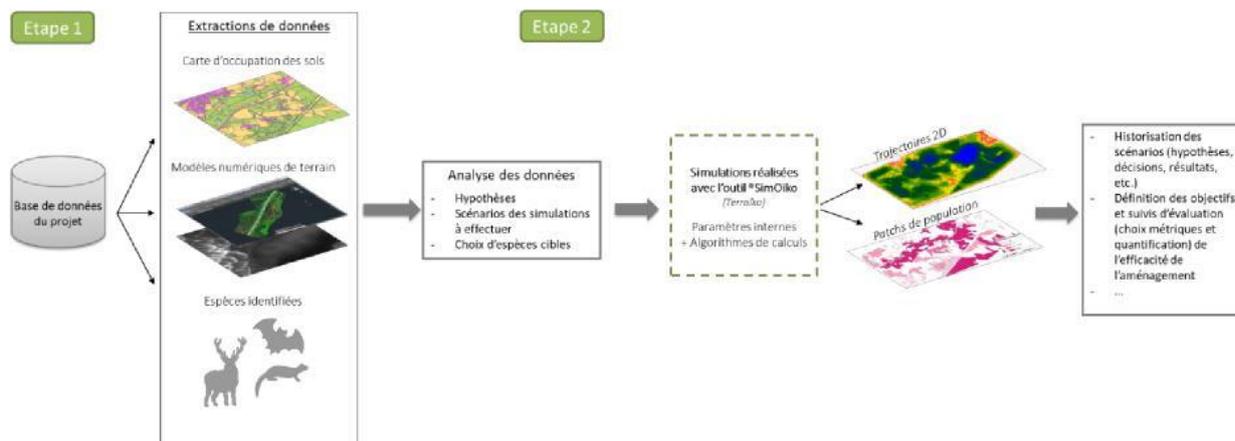


Figure 25 : Schéma de synthèse de l'intégration de l'outil SimOïko dans le BIM

4.2. Recommandations et perspectives

Les évolutions à mettre en place

Le tableau ci-dessous a été élaboré à partir des cas d'étude. Il indique les évolutions à mettre en place, depuis ce que nous avons exécuté, pour tendre vers une méthodologie BIM (les deux premières lignes reprennent les constats établis dans le premier livrable).

Observations sur le cas d'étude	Vers un objectif BIM
<p>Fichiers de levés topographiques</p> <p>Fichiers livrés au format dwg, définis dans des projections, des chartes graphiques et une méthode de renseignement des données 3D différents.</p>	<ol style="list-style-type: none"> Définition du cahier des charges pour les livrables des fichiers de levés topographiques (charte graphique, système de coordonnées, informations sur les données en 3D, format dwg). Préconisations sur les méthodes de levés topographiques qui serviront de base à la conception des projets 3D, informations sur les précisions attendues. Prévision de l'intégration de ces fichiers dans un standard d'échange (infraGML, Ifc...).
<p>SIG et dossiers d'études environnementales</p> <p>Dossiers et sous dossiers contenant shapefiles, orthophotos, dwg et cartes établies pour les dossiers de procédures et les pdf des dossiers de procédures.</p>	<ol style="list-style-type: none"> Révision de la charte SIG à partir du descriptif des données nécessaires à chaque étape des études environnementales : données entrantes, données sortantes, pour produire quels livrables ? dans quels formats ? Conservation des fichiers à chaque étape de décision, y compris les variantes non retenues ou documents modifiés (historisation). Sélection et préparation des fichiers à lier aux objets de la maquette numérique pour les décisions environnementales : <ul style="list-style-type: none"> Localisation des mesures d'évitement - Localisation, description et représentation des mesures de réduction Localisation, description, représentation et méthodes de calcul des mesures compensatoires. Localisation des ouvrages de compensation proposés, propriétés des ouvrages, méthodologie pour le choix de la localisation de ces ouvrages et décision finale concernant leur mise en œuvre ou non.
<p>Carte occupation du sol</p> <p>Carte réalisée à partir de données IGN : végétation, routes, hydrographie, voie ferrée et des orthophotos de la zone d'étude par digitalisation des polygones.</p>	<p>Définition d'une méthodologie de réalisation des cartes d'occupation du sol en fonction de l'utilisation souhaitée : utilisation par des logiciels spécifiques pour le calcul des trajectoires probables de la faune :</p> <ul style="list-style-type: none"> Ajustement du niveau de détail en fonction du cas d'usage. Homogénéité de la codification des objets.
<p>Écopont</p> <p>Choix de la localisation de l'ouvrage de passage grande faune selon les méthodes « classiques »</p> <p>Livraison par l'architecte du modèle en 3D au format 3DS Max et obj.</p>	<ol style="list-style-type: none"> Utilisation des modèles de calculs pour reconstituer les trajectoires 2D ou 3D de plus fortes probabilités de déplacement des espèces pour aider au choix de localisation des ouvrages. Planification du suivi des ouvrages en phase exploitation à partir du modèle 3D (nouvelles propriétés qui vont venir enrichir les informations sur les objets). Définition des livrables pour les ouvrages à partir d'une charte indiquant : le type de format et les compatibilités logiciels (rhinocéros, revit, AutoCAD) des modèles 3D, description de l'ouvrage, choix du niveau de détail des objets de l'ouvrage et de leurs propriétés, etc.
<p>Chiroptérodoc</p> <p>Ouvrage n'ayant pas été retenu lors du projet d'élargissement de l'A63, les possibilités de franchissements de l'infrastructure au moyen des passages inférieurs et supérieurs ont été estimés suffisants.</p>	<ol style="list-style-type: none"> Utilisation de modèles de calculs pour reconstituer les trajectoires 2D et/ou 3D de plus fortes probabilités de déplacement des espèces de chiroptères. Ajout de détails sur la végétation (hauteur des haies, des couverts végétaux, perméabilité du couvert végétal) dans la carte d'occupation des sols pour permettre la prise en compte dans les calculs de paramètres spécifiques qui entrent en jeu dans les comportements de déplacements des chiroptères et notamment pour le calcul des trajectoires 3D.

BIBLIOGRAPHIE

Type	Documents
Documentation en ligne	OGC. City Geography Markup Language (CityGML), [en ligne]. Disponible sur : http://www.open-gis.net/spec/citygml/2.0 (consulté le 10/02/2016)
	SÉTRA. Clôtures routière et faune – Critères de choix et recommandations d’implantation, *en ligne]. Disponible sur : http://catalogue.setra.fr/documents/Cataloguesetra/0005/Dtrf-0005448/DT5448.pdf (consulté le 13/06/2016)
Sites web	AUTODESK : Civil-Made in France, [en ligne]. Disponible sur : http://civilfrance.typepad.com/blog/ (consulté le 14/03/2016)
	BUILDINGSMART. IFC4-Addendum 1, [en ligne]. Disponible sur : http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/Add1/html/ (consulté le 09/02/2016)
	GOUVERNEMENT FRANÇAIS. Plateforme ouverte des données publiques françaises, [en ligne]. Disponible sur : https://www.data.gouv.fr/fr/ (consulté le 15/02/2016)
	MINnD. Projet national MINnD, [en ligne]. Disponible sur : http://www.minnd.fr/le-projet-minnd/ (consulté le 08/02/2016)
Travaux universitaires	CLOBERT J., DANCHIN E., DHONT A.A., NICHOLS J.D., 2001. Dispersal, <i>Oxford University Press</i> .
	COULON A., ABEN J., PALMER S. C. F., STEVENS V., CALLENS T., STRUBBE D., LENS L., MATTHYSEN E., BAGUETTE M., TRAVIS J. M. J., 2015. A stochastic movement simulator improves estimates of landscape connectivity. <i>Ecology</i> . DOI: 10.1890/14-1690.1.
	EL-MEKAWY M., OSTMAN B A., HIJAZI C I. An evaluation of IFC-CityGML Unidirectional Conversion, [en ligne]. Disponible sur : http://thesai.org/Downloads/Volume3No5/Paper_25-An_Evaluation_of_IFC_CityGML_Unidirectional_Conversion.pdf . (consulté le 17/02/2016)
	FAHRIG L., 2003. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. <i>Annual Review of Ecology Evolution and Systematics</i> 34:487-515.
	GUNTON R. M., MARSH C. J., MOULHERAT S., MALCHOW A-K., BOCEDI G., KLENKE R. A., KUNIN W. E., 2016. Multi-criterion trade-offs and synergies for spatial conservation planning. <i>Journal of Applied Ecology</i> . DOI: 10.1111/1365-2664.12803.
	MOULHERAT, 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 [en ligne]. Disponible sur http://www.theses.fr/18883429X
	PALMER S. C. F., COULON A., TRAVIS J. M. J., 2011. Introducing a « stochastic movement simulator » for estimating habitat connectivity. <i>Methods in Ecology and Evolution</i> . DOI: 10.1111/j.2041-210X.2010.00073.x.
	PE’ER G., SALTZ D., FRANK K., 2005. Virtual corridors for conservation management. <i>Conservation Biology</i> . 19:1997-2003.
	PRITCHARD J. K., STEPHENS M., DONNELLY P., 2000. Inference of population structure using multilocus genotype data. <i>Genetics</i> 155:945-959.
	STEVENS V.M., TURLURE C., BAGUETTE M., 2010. A meta-analysis of dispersal in butterflies. <i>Biological reviews</i> . 85:625-642.
TURLURE C., BAGUETTE M., STEVENS V.M., MAES D., 2011. Species- and sex-specific adjustments of movement behavior to landscape heterogeneity in butterflies. <i>Behavioral Ecology</i> . 22:697-975.	

Table des matières

RÉSUMÉ.....	2
Des échanges successifs entre les domaines de conception.....	2
Une analyse des flux d'échanges.....	2
Une tranche 2 en 5 livrables.....	2
L'objectif du rapport.....	2
Deux cas présentés en annexe du rapport.....	2
GLOSSAIRE.....	3
Avant-propos	5
Le 4 ^e livrable de MINnD.....	5
Une présentation des flux et modèles de données.....	5
Un rapport en 3 axes.....	5
I. CAS D'USAGE ET OBJECTIFS DES SIMULATIONS	6
Définition	6
L'exploitation des données mises à notre disposition.....	6
Le cas d'étude concernant l'A63.....	6
Le cas d'étude concernant l'A66.....	6
Des simulations réalisées avec SimOïko.....	6
Les objectifs.....	6
Rappel sur le Cas d'usage de l'A63.....	7
Rappel sur le Cas d'usage de l'A64.....	7
2. MISE EN PLACE DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES ÉCOLOGIQUES SUR LES CAS D'ÉTUDES	8
2.1. Le simulateur SimOïko®	8
Concepts mis en jeu et fonctionnement du simulateur	8
Bases conceptuelles du fonctionnement de SimOïko.....	8
Simulation numérique de dynamique des populations individu centrée.....	8
Simulation spatialement explicite de dynamique de métapopulations.....	9
Fonctionnement du réseau écologique.....	10
Affinité au milieu et coefficients de perméabilité.....	10
Données d'entrées.....	11
Aire d'étude, occupation du sol et topographie.....	11
Écologie des espèces simulées.....	13
Forme des résultats de simulation	14
Résultats démographiques.....	14
Résultats de déplacement.....	14
Résultats de génétique.....	14
Méthode d'analyse et de comparaison des scénarios.....	15
2.2. Simulations sur l'A63	16
Rappel du contexte écologique.....	16
Présentation des scénarios.....	16
Choix d'espèces cibles pour les simulations.....	16
2.3. Simulations sur l'A64	17
Rappel du contexte écologique.....	17
Présentation des scénarios	17
Scénario 1, a priori le mieux adapté aux besoins de la faune.....	18
Scénario 2.....	18
Scénario 3, optimisé selon des critères financiers.....	19
Choix d'espèces cibles pour les simulations.....	19
Le chevreuil.....	19
La martre.....	19
Le tircis.....	19
2.4. Données utilisées pour les simulations	20
Données produites.....	20
MNT.....	20
Pour les scénarios A64.....	21
Problèmes constatés.....	21

Un niveau de précision qui doit être cohérent.....	21
Carte d'occupation des sols.....	22
Des cartes qui ne doivent comporter aucune erreur de topologie.....	22
Un processus spécifique dans le cas où plusieurs simulations écologiques sont réalisées	22
3. RÉSULTATS DE SIMULATION.....	23
3.1. Positionnement optimal d'un chiroptérodoc sur l'A63.....	23
Réponse à la question biologique posée	23
Définition d'objectifs quantifiés pour le suivi d'efficacité de l'aménagement.....	25
3.2. Interopérabilité et propagation de l'erreur	26
Des erreurs persistantes dans l'occupation du sol de l'état actuel.....	26
Des « trous » dans la carte de fréquentation des rhinolophes.....	26
Des problèmes venant de mauvaises jointures entre polygones.....	26
Une erreur générée se propage dans la suite de l'analyse.....	26
Une erreur détectée par SimOïko.....	26
3.3. Design optimal de l'écopont de l'A64.....	27
Réponse à la question biologique posée	27
Interopérabilité, génération d'erreurs et difficultés d'interprétation des résultats	28
Génération d'erreurs et d'anomalies dans les simulations	28
Contiguïté des polygones et difficultés d'interprétation des simulations.....	29
4. PERSPECTIVES BIM.....	30
4.1. Intégration des résultats dans la maquette numérique, établissement d'un workflow adapté	30
Schéma de synthèse	30
4.2. Recommandations et perspectives.....	31
Les évolutions à mettre en place.....	31
BIBLIOGRAPHIE.....	32

Sommaire des figures

Figure 1 : Cycle de vie du crapaud accoucheur tel que simulé dans SimOïko	9
Figure 2 : Illustration du fonctionnement des déplacements individuels simulés par SimOïko	9
Figure 3 : Représentation des coefficients de perméabilité en fonction de la réduction de la distance parcourable	10
Figure 4 : Photographies aériennes des sites d'étude	11
Figure 5 : Extrait de Cartes d'occupation des sols des 2 zones	12
Figure 6 : Occupation du sol plaqué sur le MNT – A63 à gauche, A64 à droite	13
Figure 7 : Représentation du cycle de vie pour le triton palmé.	13
Figure 8 : Schéma de construction des cartes de comparaison entre résultats de simulation ; exemple de la variation de fréquentation.....	15
Figure 9 : Localisation des chiroptéroducts sur la zone d'étude.....	16
Figure 10 : Trois scénarios d'écopont testés dans les simulations	17
Figure 11 : 1 ^{er} scénario : le mieux adapté a priori à la faune	18
Figure 12 : 2 ^e scénario	18
Figure 13 : 3 ^e scénario	19
Figure 14 : Emprise des 2 MNT : Vinci (petit) IGN (englobant).....	20
Figure 15 : MNT crée sous Civil 3D, depuis le fichier de levé topographique, puis fusionné avec le MNT de l'IGN	21
Figure 16 : Exemple d'erreur, « trou » dans la couche shapefile, détectée par le vérificateur topologique de Qgis.....	22
Figure 17 : Évaluation du fonctionnement de la population de rhinolophes en fonction des variantes d'implantation et comparaisons entre les scénarios.....	23
Figure 18 : Zooms sur le fonctionnement de la population de rhinolophes au niveau des emplacements potentiels du chiroptéroduct	24
Figure 19 : Évaluation de l'incertitude sur la taille de populations de rhinolophes (intervalle de confiance à 95 %).....	25
Figure 20 : Problème de topologie de l'occupation du sol et propagation de l'erreur.....	26
Figure 21 : Fonctionnement attendu des populations locales de chevreuils (<i>Capreolus capreolus</i>) martres (<i>Martes martes</i>) et tircis (<i>Pararge aegeria</i>) en fonction des scénarios	27
Figure 22 : Pour la martre (<i>Martes martes</i>), le scénario 2 permet la traversée de l'autoroute (figure de gauche, comparaison entre l'état actuel et l'état attendu suite à la mise en œuvre du scénario 2). Le scénario 1 permet une fluidification du passage des martres sur l'écopont (figure de droite comparant les états attendus suite à la mise en œuvre du scénario 1 comparé à l'état attendu suite à la mise en œuvre du scénario 2) mais n'améliore pas l'état général de conservation de la population locale de martres	28
Figure 23 : Le cours d'eau qui traverse l'autoroute (bleu foncé) ne suis pas la ligne de fond de vallée et son altitude n'est pas cohérente (présence de multiples creux et bosses)	28
Figure 24 : L'augmentation observée de la fréquentation entre les clôtures et l'autoroute (bleu dense) correspond aux déplacements d'individus tournant en rond dans cet espace dans le scénario 2. Dans les secteurs rouge dense, la même observation peut être faite dans le scénario sans passage à faune. Le nombre d'individus simulés tournant en rond dans ces zones chute avec la modification du tracé des clôtures qui concentrent les individus tournant en rond dans le secteur entre clôture et autoroute	29
Figure 25 : Schéma de synthèse de l'intégration de l'outil SimOïko dans le BIM.....	30

Les figures dont la source n'est pas spécifiée sont issues des travaux réalisés par les participants au groupe de l'UC6.

Sommaire des tableaux

Tableau I : Description des paramètres du cycle de vie	13
--	----