



**HAL**  
open science

# Modélisation de réseaux écologiques pour l'aide à la décision dans le cadre d'un projet de renouvellement urbain

Fanny Samper

► **To cite this version:**

Fanny Samper. Modélisation de réseaux écologiques pour l'aide à la décision dans le cadre d'un projet de renouvellement urbain. Géographie. 2022. dumas-04086698

**HAL Id: dumas-04086698**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04086698>**

Submitted on 2 May 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



Modélisation de réseaux écologiques pour  
l'aide à la décision dans le cadre d'un projet  
de renouvellement urbain

Mémoire de fin d'étude



---

## REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier l'ensemble des enseignants-chercheurs du cursus de géographie, qui m'ont accompagnées au cours de la licence et du master et qui m'ont prodiguées de précieux conseils ; et notamment Jean-Christophe Foltête, qui a été mon tuteur pour ce stage, pour son aide dans la réalisation de ce mémoire de fin d'étude, et pour ses conseils méthodologiques et techniques.

Je remercie également Hélène Houot, directrice du master, et Xavier Girardet, qui m'a donné la plupart des clés de compréhension de l'écologie du paysage et donné envie de poursuivre dans le domaine de l'environnement.

Je remercie également Gilles Vuidel pour son aide précieuse en codage java, et en décryptage des lignes de commande sur Graphab !

Merci à mes camarades de master, pour leur soutien, l'entraide et la bienveillance qui ont régné pendant ces deux années d'études. Merci à Alice qui m'a motivée à aller jusqu'au bout des cinq années de CMI, avec sa bonne humeur et son optimisme infaillible !

Je tiens aussi à remercier l'ensemble de l'équipe d'ECR Environnement, qui m'a accueilli avec gentillesse et bienveillance et m'a aidé à développer une large palette de compétences. Je remercie notamment mes collègues du service Environnement pour leur aide et leurs conseils avisés. Je remercie également Aurélien, responsable d'agence, et Mathieu, responsable du service.

Merci à Luce pour sa patience et sa pédagogie sur le terrain, ainsi que ses conseils orthoptérologiques.

Je remercie également Sébastien pour son soutien et ses conseils d'écriture !

Enfin, je remercie ma tutrice Maud, qui m'a accompagné pendant l'ensemble de ce stage, et qui a su trouver les réponses à mes questions, toujours avec gentillesse et bienveillance.

## TABLES DES MATIERES

GLOSSAIRE .....	3
INDEX DES TABLEAUX ET DES FIGURES .....	4
Introduction .....	5
I. Contexte.....	8
1.1 Le projet de renouvellement urbain .....	8
1.2 Objet de l'étude .....	9
1.3 Notions d'écologie du paysage .....	9
II. Méthodologie .....	12
2.1 Construction d'un modèle d'occupation du sol .....	12
2.2 Création de la base de données .....	16
2.3 Modélisation des réseaux écologiques.....	17
III. Résultats .....	18
3.1 Réseaux écologiques à l'échelle globale.....	18
3.2 Réseaux écologiques à l'échelle locale .....	26
3.3 Fonctionnement écologique de la zone d'étude.....	36
IV. Discussion et conclusion.....	38
4.1 Limites de la modélisation .....	38
4.2 Apports de l'analyse dans le cadre de l'aide à la décision .....	38
4.3 Pour aller plus loin... ..	40
BIBLIOGRAPHIE .....	41
SITOGRAPHIE .....	42
ANNEXES .....	43

## GLOSSAIRE

**BC** : Betweenness Centrality

**LPO** : Ligue de Protection des Oiseaux

**PRU** : Projet de Renouvellement Urbain

**SRCE** : Schéma Régional de Cohérence Ecologique

**TVB** : Trame Verte et Bleue

**ZNIEFF** : Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique

## INDEX DES TABLEAUX ET DES FIGURES

Figure 1 : Continuités écologiques .....	5
Figure 2 : Vue aérienne des sites d'étude - Etude Préalable Grette - Brulard - Polygone.....	8
Figure 3 : Représentation d'un graphe .....	10
Figure 4 : Modélisation de graphes paysagers .....	10
Figure 5 : Métrique de connectivité (BC).....	10
Figure 6 : Représentation de la distance euclidienne et distance-coût sur la matrice paysagère.....	11
Figure 7 : Carte d'occupation du sol à l'échelle de la ville de Besançon .....	14
Figure 8 : Carte d'occupation du sol autour des quartiers de Grette/Brulard/Polygone .....	15
Figure 9 : Cartes du réseau écologique des oiseaux forestiers à l'échelle globale .....	19
Figure 10 : Vue sur la colline de Rosemont depuis le quartier de Brulard.....	20
Figure 11 : Forêt de feuillus située au sud du quartier de la Grette, adjacente à la colline de Rosemont.	20
Figure 12 : Torcol fourmilier. ....	21
Figure 13 : Cartes du réseau écologique des oiseaux des milieux semi-ouverts, à l'échelle de globale ....	22
Figure 14 : Vergers situés à l'ouest de la colline de Rosemont.. ....	23
Figure 15 : Cartes du réseau écologique des rapaces à l'échelle globale .....	24
Figure 16 : Milan noir en vol. ....	25
Figure 17 : Carte du réseau écologique des forestiers généralistes à l'échelle locale .....	26
Figure 18 : Linéaire boisé longeant les casernes militaires à Brulard.. ....	27
Figure 19 : Carte des corridors potentiels des forestiers généralistes à l'échelle locale .....	28
Figure 20 : Carte du réseau écologique des oiseaux des milieux semi-ouverts à l'échelle locale .....	29
Figure 21 : Terrain vague situé le long des casernes, au sud de Brulard.. ....	30
Figure 22 : Carte du réseau écologique du cortège du Torcol fourmilier .....	31
Figure 23 : Clairière au nord de la forêt de Polygone.....	31
Figure 24 : Carte des corridors potentiels du cortège du Torcol fourmilier.....	32
Figure 25 : Carte du réseau écologique du Pic mar .....	33
Figure 26 : Carte du réseau écologique du Pic cendré .....	33
Figure 27 : Carte des corridors potentiels du cortège du Pic cendré .....	34
Figure 28 : Vue de la colline de Chaudanne depuis les berges du Doubs .....	34
Figure 29 : Forêt de Polygone.....	35
Figure 30 : Habitats présents sur la zone d'étude .....	36
Figure 31: Carte présentant le fonctionnement écologique du site d'étude.....	37
Figure 32: Corridor naturel reliant le sud et le nord de Besançon.....	40
Tableau 1 : Caractéristiques des sources de données.....	12
Tableau 2 : Nomenclature utilisée pour l'occupation du sol.....	13
Tableau 3 : Caractéristiques des espèces d'oiseaux pouvant circuler sur site.....	16
Tableau 4 : Liste des modélisations réalisées à l'échelle globale et locale .....	17
Tableau 5 : Barème de pondération des habitats .....	17

## Introduction

En France, selon le Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, entre 20 000 et 30 000 hectares de surface sont artificialisés chaque année. L'une des causes de cette artificialisation est l'extension urbaine croissante en périphérie des villes. Cette artificialisation des sols augmente très rapidement, et entraîne des conséquences sur l'environnement, à plusieurs échelles<sup>1</sup>. Tout d'abord, cette artificialisation se fait au détriment d'autres formes d'occupation du sol, telles que les cultures et la production agricole, mais aussi les espaces à caractère plus naturels comme les forêts. Cette diminution des espaces naturels entraîne une perte de biodiversité, car ils constituent des habitats pour de nombreuses espèces animales et végétales.

Allant de pair avec l'artificialisation des sols et l'urbanisation, la perte d'espaces naturels se traduit aussi par une fragmentation des habitats, c'est-à-dire par un morcellement et un espacement des surfaces d'habitat disponibles pour les espèces<sup>2</sup>. L'effet conjugué de la diminution et fragmentation des espaces naturels a un impact négatif sur les dynamiques démographiques des espèces animales.

Dans ce cadre, plusieurs mesures et réglementations ont été mises en place pour freiner la diminution de la biodiversité. En aménagement du territoire, les documents et les schémas d'aménagement et de planification ont pour vocation de fixer des objectifs permettant une meilleure gestion des ressources environnementales. A l'échelle nationale, un outil de cette préservation est la mise en place de la Trame verte et bleue, un réseau d'espaces naturels permettant de restaurer la biodiversité végétale et animale, et assurer la continuité écologique des écosystèmes<sup>3</sup>. Cette continuité correspond à l'ensemble des zones d'habitats (réservoirs de biodiversité), et des espaces qui permettent aux espèces de circuler et d'accéder à ces zones (corridors écologiques). On parle alors de réseau écologique<sup>4</sup>. A l'échelle régionale, les Schémas Régionaux de Cohérence Ecologique (SRCE) prévoient la préservation des continuités écologiques des territoires<sup>5</sup>.

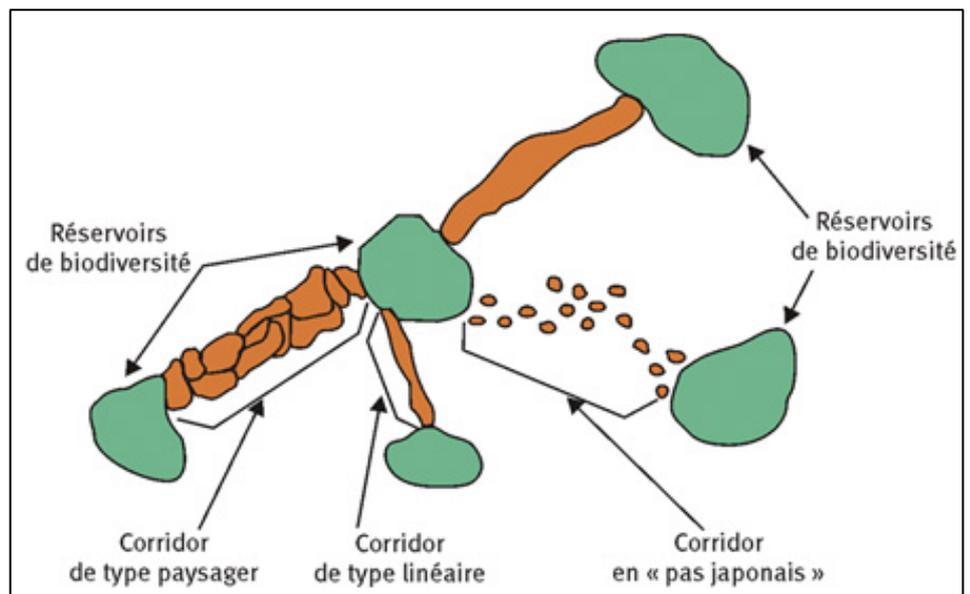


Figure 1 : Continuités écologiques  
Source : TVB et documents  
d'urbanisme  
Guide méthodologique TVB  
[www.developpement-durable.gouv.fr](http://www.developpement-durable.gouv.fr)

<sup>1</sup> Ministères Écologie Énergie Territoires. <https://www.ecologie.gouv.fr/artificialisation-des-sols>

<sup>2</sup> INEE. <https://www.inee.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/la-fragmentation-des-paysages-reduit-elle-le-choix-dhabitat>

<sup>3</sup> DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur. <https://www.paca.developpement-durable.gouv.fr>

<sup>4</sup> Bernier A., Théau J. Modélisation de réseaux écologiques et impacts des choix méthodologiques sur leur configuration spatiale[...].

<sup>5</sup> Trame verte et bleue. <https://trameverteetbleue.fr>

De plus, les objectifs des documents d'aménagement du territoire visent aussi à réinstaurer des espaces de nature en ville<sup>6</sup>. En effet, au-delà de la réduction des espaces naturels et de la perte de biodiversité, l'extension urbaine a d'autres effets sur les habitants des villes. La restauration de la nature en ville permet également de faire diminuer les températures, et de réduire les effets néfastes de l'imperméabilisation des sols. La création de corridors de biodiversité circulant au sein des villes peut permettre de réduire ces effets négatifs.

Dans ce cadre, les aménageurs ont besoin de cibler et hiérarchiser les espaces propices à la création des continuités écologiques. Une approche adaptée à cet objectif est la modélisation des réseaux écologiques. Elle permet de quantifier le degré de connectivité d'un ensemble d'habitats écologiques<sup>7</sup>.

### Présentation de l'entreprise

ECR Environnement<sup>8</sup> est un bureau d'études spécialisé en ingénierie du sol et de l'aménagement. Créée en 1999, la société compte aujourd'hui 27 agences qui s'articulent autour de 4 métiers : les études géotechniques et études de sol ; la topographie ; les études environnementales ; et l'ingénierie et aménagements urbains.

Parmi les différents services de l'entreprise, le service Environnement s'occupe d'accompagner les acteurs publics et privés dans leurs projets d'aménagement, avec la volonté de protéger l'environnement. Les projets d'aménagement concernent notamment l'implantation de centrales solaires photovoltaïques sur le territoire. Le bureau d'étude réalise des diagnostics d'impacts environnementaux, pour différents projets, que ce soit des aménagements urbains, routiers, agricoles, ou d'énergies renouvelables. Ces travaux sont portés par des acteurs variés, notamment par des sociétés de fournisseurs d'énergies. Ces diagnostics comprennent entre autres des évaluations de la biodiversité présente sur les sites.

Dans le domaine des Sites et Sols pollués, ECR Environnement réalise aussi des diagnostics de pollution des sols et eaux souterraines, des études documentaires (historiques et environnementales), ou encore des dimensionnements de souillures. Ces études de sol sont menées dans le cadre d'acquisition de sites, d'évaluation de la qualité des sols au droit d'ouvrages spécifiques, et des opérations d'aménagement urbain ou immobilier.

Des études hydrauliques et hydrologiques sont réalisées dans le cadre de projets de constructions et d'aménagements urbains, pour déterminer notamment le fonctionnement de cours d'eau. Au niveau de la gestion des eaux souterraines, des études hydrogéologiques sont réalisées.

Dans le domaine de l'expertise écologique, le bureau d'étude réalise des expertises écologiques pour les habitats, la faune et la flore des milieux, dans le cadre de projets variés. Entre autres, la réalisation de dossiers environnementaux réglementaires, d'évaluation environnementale de PLU, de recherche et évaluation de zones humides, et de plan de gestion sont effectués. Des inventaires floristiques, faunistiques et des habitats naturels sont réalisés. Ces projets sont portés par des collectivités territoriales ou des syndicats, qui font appel au bureau d'étude pour son expertise écologique.

A Besançon, les projets réalisés couvrent essentiellement des études d'impacts pour l'implantation de parcs photovoltaïques sur la région Bourgogne Franche-Comté et ses environs proches.

<sup>6</sup> Géoconfluences. <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/doc/transv/paysage/PaysageViv.htm>

<sup>7</sup> Connectivité Écologique. <https://connectiviteecologique.com/connectivite>

<sup>8</sup> Site internet de la société : <https://ecr-environnement.com/>

---

## Objectif du stage

Ce stage a été réalisé à l'agence de Besançon, au service Environnement, dans la branche d'expertise écologique Faune/Flore/Habitat.

Le travail réalisé s'inscrit dans un projet de renouvellement urbain, ayant pour objectif la reconversion de trois sites contigus, situés entre le centre ancien et les zones d'extension périphériques de Besançon. L'aménagement de ces trois quartiers a pour vocation d'offrir une plus grande cohérence urbaine à cette partie de la ville, en conciliant développement urbain et mise en valeur des espaces naturels<sup>9</sup>. Un diagnostic est actuellement réalisé par ECR Environnement, permettant de faire état des caractéristiques écologiques et sanitaires du secteur, afin de cibler les espaces ayant un intérêt écologique important.

Au-delà de l'expertise écologique, ce projet mobilise plusieurs secteurs du bureau d'étude : des études géotechniques sont également réalisées, ainsi que des diagnostics de Sites et Sols pollués, d'hydrologie et d'hydrogéologie.

L'objectif du stage est de mettre en place une méthodologie permettant d'intégrer la modélisation des réseaux écologiques dans l'analyse du fonctionnement écologique d'un site d'étude. Cela va permettre de déterminer les zones ayant une connectivité écologique forte et présentant un intérêt de préservation ou de restauration. Cette méthodologie s'inscrit dans le cadre du projet de renouvellement urbain cité précédemment, avec l'objectif à long terme de pouvoir réaliser cette analyse pour chaque diagnostic d'impact effectué par le bureau d'étude. L'intégration de la modélisation des continuités écologiques potentielles dans le diagnostic permettra une prise de décision objective par le commanditaire du projet.

Ainsi pour ce mémoire, l'objectif est de voir en quoi l'utilisation de la modélisation de réseaux écologiques permet de déterminer le fonctionnement écologique d'une zone, dans le cadre d'un projet de renouvellement urbain.

La première partie de ce rapport présente des éléments de contexte. Dans un second temps, la méthodologie mise en place lors du stage est présentée, puis les résultats de l'analyse effectuée. Enfin, une dernière partie de discussion permet une prise de recul sur le projet.

---

<sup>9</sup> Direction Urbanisme Projets et Planification – Ville de Besançon. « Etude Préalable Grette – Brulard – Polygone »

## I. Contexte

Ce rapport présente la synthèse des travaux effectués lors du stage. Avant de présenter l'analyse mise en place et les résultats découlant de celle-ci, il convient de présenter quelques éléments de contexte et d'état de l'art relatifs à l'étude.

### 1.1 Le projet de renouvellement urbain

Ce projet porté par la ville de Besançon se concentre sur trois sites composés des quartiers de Polygone, Grette et Brulard, situés au sein de la trame urbaine, au sud-ouest de Besançon.



Figure 2 : Vue aérienne des sites d'études - Etude Préalable Grette - Brulard - Polygone.  
Source : Direction Urbanisme Projets et Planification, Ville de Besançon (2021).

Les quartiers du projet appartiennent à plusieurs acteurs : le Ministère de la Défense (pour les terrains militaires de Polygone du génie), la Ville de Besançon, L'Etablissement Public Foncier du Doubs, ou encore des particuliers<sup>10</sup>.

Au total, la zone occupe une superficie de 32,4 Ha. La plupart des terrains sont abandonnés et en friche. Plusieurs projets sont à l'étude pour revitaliser cette zone, située à l'interface entre le centre-ville, les pôles d'activités bisontins et les collines qui bordent la ville. Néanmoins, le développement urbain ne doit pas se faire au détriment de la biodiversité qui a investi les lieux. Pour cela, une étude doit déterminer les espèces présentes sur le site, ainsi que leurs zones vitales et les espaces de déplacements entre celles-ci.

<sup>10</sup> Direction Urbanisme Projets et Planification – Ville de Besançon. « Etude Préalable Grette – Brulard – Polygone »

## 1.2 Objet de l'étude

Dans une étude du fonctionnement écologique d'un site d'étude, la première étape est de réaliser un inventaire des espèces présentes sur la zone. Pour cela, des prospections fondées sur une méthode d'inventaire sont réalisées par le bureau d'étude. Ces prospections ont lieu 4 fois dans l'année, lors de chaque saison, afin de s'assurer de l'exhaustivité de l'inventaire. Une fois ce dernier réalisé, un travail bibliographique est réalisé pour déterminer les statuts de chaque espèce animale inventoriée, au niveau européen, national, régional et départemental. Des enjeux de protection sont ainsi déterminés pour chaque espèce. Celles-ci sont rattachées à des habitats, inventoriés également. A partir de ce diagnostic, les zones les plus sensibles de la zone d'étude sont ciblées.

Le fonctionnement écologique de la zone se base sur cet inventaire et détermine les habitats présents sur le site qui sont les plus déterminants, soit par la rareté de la faune qui les occupe, soit par sa fragilité.

Toutes les espèces de faune sont recensées lors de ces inventaires : mammifères, chiroptères, insectes, amphibiens... Néanmoins, ce travail se concentre uniquement sur l'avifaune, c'est-à-dire les espèces d'oiseaux, et leur comportements sur la zone d'étude. Il s'agit du taxon le plus varié, présentant le plus grand nombre d'espèces différentes sur les terrains du projet.

La modélisation des réseaux écologiques peut se faire à différentes échelles : les résultats ne seront pas les mêmes et dépendent du rayon d'action des espèces étudiées. Lors de ce travail, deux échelles différentes ont été étudiées, afin d'obtenir une lecture plus complète des dynamiques aviaires sur le territoire. Tout d'abord, une étude à l'échelle de la commune de Besançon a été menée. Ce périmètre est administratif, et ne tient pas compte des réalités paysagères du terrain. Il s'agit d'examiner la façon dont les réseaux écologiques s'agencent dans la ville.

Puis, un zoom a été effectué sur les quartiers du projet, considérés dans une zone comprenant un voisinage de 2 kilomètres autour des terrains. Ce périmètre permet d'observer les dynamiques à un niveau beaucoup plus local, et de prendre en compte la présence de deux zones d'intérêt écologique, qui vont avoir une importance pour cette étude. Il s'agit des collines de Rosemont et de Chaudanne, situées au sud des terrains du projet, et qui sont inventoriées au niveau national en tant que Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique (ZNIEFF). Ces deux zones sont considérées comme des réservoirs de biodiversité, et leur proximité avec le site d'étude laisse supposer que les espèces présentes dans les collines peuvent potentiellement venir nicher, se nourrir et se déplacer sur les terrains du projet.

## 1.3 Notions d'écologie du paysage

L'écologie du paysage est une branche de l'écologie qui se concentre sur l'étude des dynamiques écologiques à l'échelle des paysages. Cette discipline a développé les théories et les méthodes à l'origine du concept de réseau écologique. Afin de quantifier la connectivité des habitats, l'écologie du paysage utilise plusieurs outils, tels que les indicateurs de fragmentation du paysage par exemple.

Parmi toutes les méthodes disponibles, le graphe paysager<sup>11</sup> est un bon compromis entre la capacité à représenter les processus écologiques au sein du paysage et la facilité de mise en œuvre. Les graphes sont une représentation mathématique d'un ensemble d'éléments reliés par des connexions<sup>12</sup>. Ils sont composés d'objets localisés (« sommets » ou « nœuds » du graphe), et des relations entre ces objets (« arcs » ou « liens » du graphe).

<sup>11</sup> INRAE. <https://www.trameverteetbleue.fr/documentation/references-bibliographiques/graphes-paysagers-sequence-erc>

<sup>12</sup> E. Sigward. <https://www.imo.universite-paris-saclay.fr/~ruette/mathdiscrettes/polygraph-Sigward.pdf>

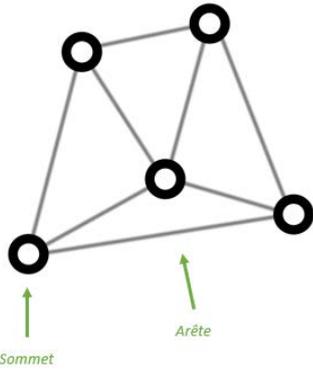
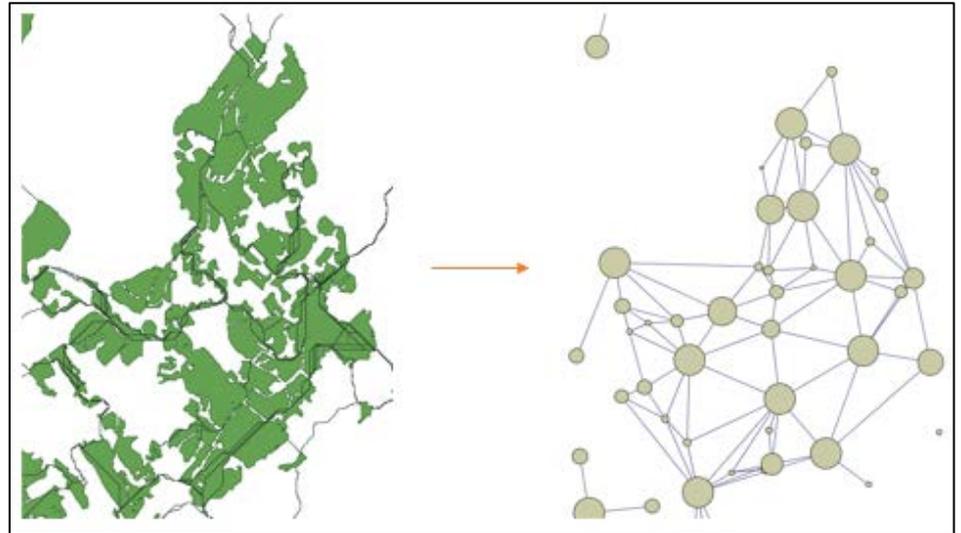


Figure 3 : Représentation d'un graphe

Cette approche peut donc s'appliquer en écologie du paysage : les sommets symbolisent les taches d'habitats des espèces étudiées et les arêtes, les chemins de déplacements potentiels qui les relient. Le graphe paysager est une modélisation d'un réseau écologique.

Figure 4 : Modélisation de graphes paysagers (Réaliste à gauche : habitats et chemins, Topologique à droite : nœuds et liens)



L'utilisation d'un graphe permet de calculer plusieurs indicateurs, qu'on appelle des métriques de connectivité. Ces dernières servent à quantifier la connectivité d'un graphe<sup>13</sup>, de façon globale pour l'ensemble d'un réseau, ou de façon locale pour chaque élément du graphe (nœud et liens). Pour cette étude, ce sont les métriques locales qui nous intéressent car l'objectif est de cibler les habitats les plus importants au sein d'un réseau écologique, c'est-à-dire ceux qui ont une valeur de connectivité plus forte. La métrique utilisée dans cette étude est la BC (Betweenness Centrality), l'indice de centralité intermédiaire en français. Cette métrique quantifie la « centralité des nœuds et des liens dans le graphe, c'est-à-dire, la manière dont ils sont systématiquement utilisés comme chemins de dispersion »<sup>14</sup>.

Autrement dit, c'est un indicateur du flux potentiel de déplacement qui traverse les éléments du graphe : une tache traversée par un grand nombre de chemins aura une valeur forte. Les taches ayant les valeurs les plus fortes sont les plus « centrales », celles qui ont une fréquence d'utilisation importante. Dans l'interprétation de la valeur de centralité intermédiaire, les capacités des taches (c'est-à-dire leur superficie, qui influence leur capacité d'accueil) sont importantes : par exemple, des taches ayant des valeurs de BC fortes mais des capacités faibles sont considérées comme des taches relais (elles sont un passage obligé pour circuler dans le graphe, mais sont trop petites pour « retenir » les flux de déplacement). En revanche, les taches avec des capacités fortes et une connectivité importante ont un potentiel de réservoir important, elles vont recevoir et également émettre des flux de déplacement.

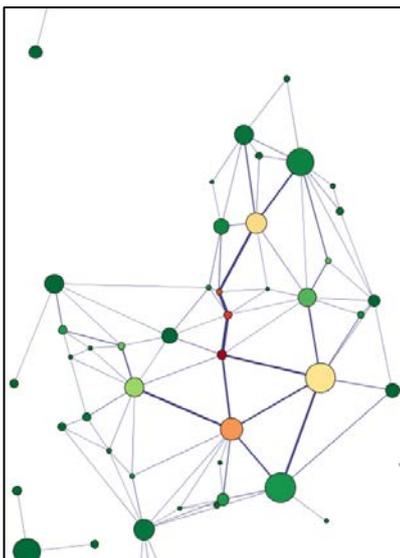


Figure 5 : Métrique de connectivité (BC)

<sup>13</sup> Clauzel C., Gaber C., Godet C. *Fiches méthodologiques pour la prise en main de Graphab*, 2020.

<sup>14</sup> Gaber C. *Etude de la connectivité fonctionnelle : application à l'étude des réseaux de mares franciliens*.

Le logiciel de modélisation utilisée pour cette étude est le logiciel Graphab, développé par le laboratoire ThéMA de l'Université de Franche-Comté<sup>15</sup>. Ce logiciel permet de modéliser les réseaux écologiques sous la forme de graphes paysagers<sup>16</sup>. Les couches produites par Graphab peuvent être traitées et modifiées sous SIG.

### Encadré méthodologique n°1 : Modèle de coût-déplacement

La modélisation d'un réseau écologique pour une espèce donnée se base sur plusieurs paramètres qui doivent être implémentés dans le logiciel. Parmi eux, on retrouve la distance de dispersion, ou la distance de déplacement de l'espèce : il s'agit de la distance maximale (ou moyenne) effectuée par une espèce lors d'un déplacement considéré. Cette distance est utilisée pour créer les liens entre les nœuds du graphe : les nœuds trop éloignés les uns des autres ne sont pas connectés. Dans un graphe basique, ce paramètre est considéré en distance euclidienne : les taches sont reliées « à vol d'oiseaux ».

En écologie du paysage, il existe un modèle de coût-déplacement : il est basé sur le chemin de moindre coût, qui relie deux taches entre elles par le biais du chemin dont le coût est minimal pour l'espèce. Ces coûts correspondent à l'énergie requise par l'animal pour se déplacer et atteindre sa destination, depuis sa tache source<sup>17</sup>. L'espèce ne peut atteindre que les taches qui sont situées dans la zone potentiellement atteignable par les individus se déplaçant dans le paysage.

Ces individus se déplacent sur ce qu'on appelle la matrice paysagère, qui est constituée des pixels d'occupation du sol. Chaque pixel possède une valeur de coût qui est définie pour chaque classe de la matrice. Ainsi, la « résistance » de cette dernière va impacter les déplacements des individus dans le paysage, en fonction des coûts nécessaires à ces déplacements.

La résolution spatiale est importante, car elle va déterminer le nombre d'éléments modélisables du paysage (plus un pixel est grand, plus il va comporter des classes d'occupation du sol différentes)<sup>18</sup>. Elle joue un rôle sur la résistance de la matrice.

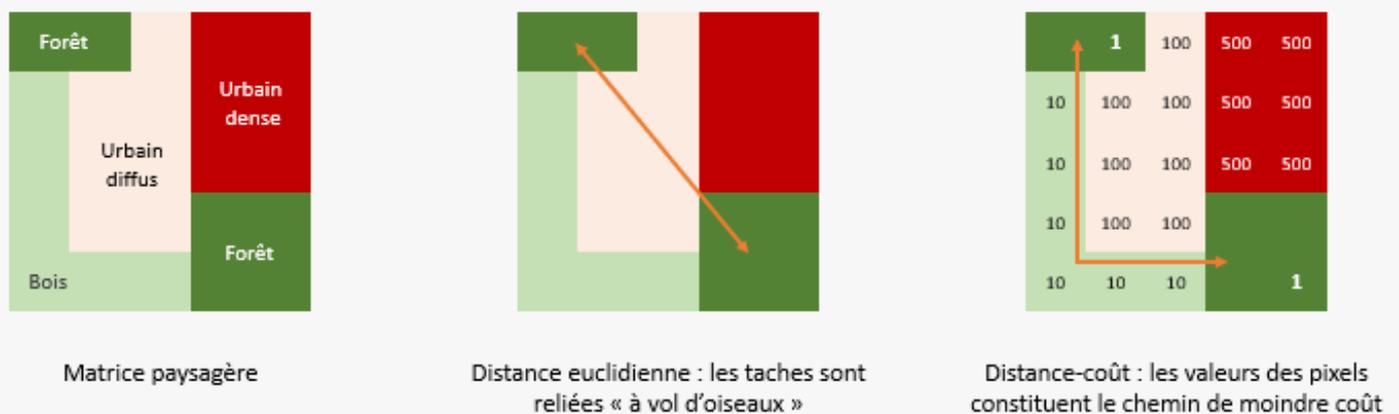


Figure 6 : Représentation de la distance euclidienne et distance-coût sur la matrice paysagère

<sup>15</sup> Site Internet du Logiciel : <https://sourcesup.renater.fr/www/graphab/fr/home.html>

<sup>16</sup> Clauzel, C., Foltête, J.-C., Girardet, X., & Vuidel, G. *Graphab 2.6 Manuel d'utilisation*.

<sup>17</sup> Tarabon S., 2020. *La prise en compte des fonctionnalités écologiques dans l'aménagement du territoire et l'application de la séquence Eviter-Réduire-Compenser. De l'échelle projet à la planification*.

<sup>18</sup> Girardet X., 2013. *Paysage et infrastructures de transport : modélisation des impacts des infrastructures sur les réseaux écologiques*.

## II. Méthodologie

Afin de pouvoir modéliser les réseaux écologiques des espèces présentes sur la zone d'étude, une méthodologie a été mise en place. Cette dernière a pour vocation d'être appliquée pour chaque projet nécessitant un diagnostic de fonctionnement écologique. Chaque étape de la méthodologie doit pouvoir être adaptée aux différents projets du service Environnement au sein du bureau d'étude.

### 2.1 Construction d'un modèle d'occupation du sol

La première étape de cette méthodologie est la création d'un modèle d'occupation du sol, qui servira de support à la modélisation. Cette carte va constituer la matrice paysagère sur laquelle le graphe paysager va être modélisé. Les différentes classes d'occupation vont être utilisées différemment par les espèces étudiées. On distingue ainsi les zones d'habitats (et de reproduction), les espaces de chasse, les espaces de transit, ainsi que les barrières potentielles aux déplacements des individus.

Afin de réaliser une carte d'occupation du sol la plus précise possible, il faut d'abord recenser les sources de données disponibles sur notre zone d'étude.

#### Sources de données et nomenclature

Donnée	Date	Emprise spatiale	Sources	Caractéristiques
RPG 2.0	2020	Régionale	IGN	<i>Spécifique aux cultures et prairies</i>
BD Topo	2021	Départementale		
BD Carto	2021	Régionale		
OCS GE (OCSOL)	2017	Départementale		
BD Forêt v2	2016	Départementale		<i>Trop ancienne, incomplète</i>
BD Haie	2021	Départementale		<i>Définitions de la haie trop floue</i>
OSO	2017	Nationale	Cesbio	
Espaces verts	2021	Communale	GBM	<i>Utilisé pour les parcs et jardins</i>
Corine Land Cover	2017	Nationale	Programme Copernicus	<i>Echelle spatiale trop grande</i>
Urban Atlas	2018	AU Fonctionnelle		<i>Non-homogénéité de la ressource</i>
OSM	2022	Régionale	OSM	<i>Données peu fiables</i>
Milieux humides	2021	Régionale	CEN / Sigogne	<i>Utilisé pour les ripisylves</i>

Tableau 1 : Caractéristiques des sources de données

Pour obtenir une matrice cohérente sur le territoire, il faut privilégier les sources de données compatibles (par exemple, les données issues de l'IGN ont une concordance géographique). Certaines données sont disponibles à l'échelle nationale, mais d'autres ne sont disponibles que localement (par exemple les données de la Ville de Besançon). De plus, les sources de données plus récentes ont été privilégiées afin d'avoir une information la plus fiable possible. Une fois les sources de données sélectionnées (en vert dans le tableau ci-dessus), on peut créer la nomenclature de la carte.

Types de milieu	Catégories	Sous-catégories	Sources
1 – Milieux urbains	11 - Réseaux de transports	111 - Routes bruyantes	BD Topo
		112 – Autres routes	
		113 - Voie ferrée	
		114 – Voie de tram	
	12 - Bâtiments	121 - Bâtiments < à 11 m de hauteur	BD Topo
		122 - Bâtiments entre 11 et 28 m	
		123 - Bâtiments > à 28 m	
	13 - Zones anthropisées	131 - Urbain diffus	OSO
		132 - Urbain continu	
133 - Zones industrielles			
2 - Milieux humides	21 - Eau		BD Topo
3 - Milieux semi-ouverts	31 – Semi-ouvert		BD Topo, BD Carto, Sigogne
4 - Milieux forestiers	40 - Forêts	41 - Forêts de conifères	BD Topo
		42 – Forêts de feuillus	
		43 - Forêts mixtes	
	44 - Formations ouvertes		BD Topo, GBM
5 – Milieux ouverts	51 – Pelouses urbaines		OCS GE
	52 – Milieu non-urbain	521 - Prairies	RPG
		522 - Pelouses sèches	OSO
6 – Milieux agricoles	61 - Cultures		RPG

Tableau 2 : Nomenclature utilisée pour l'occupation du sol

La nomenclature ci-dessus est composée de 19 classes d'occupation du sol, comprises dans 6 principaux types de milieux. Les espaces semi-ouverts regroupent les zones de végétation peu dense, telles que les landes, broussailles et ripisylves. La catégorie « formations ouvertes » du milieu forestier comprend les forêts ouvertes, les boisements et les alignements d'arbres, ainsi que les parcs et espaces verts recensés par Grand Besançon Métropole. Les pelouses urbaines correspondent aux jardins des maisons et des immeubles et aux espaces verts des abords des bâtiments.

A l'échelle globale (de la commune de Besançon), certaines catégories n'ont pas été détaillées pour permettre une lecture plus claire du paysage à une échelle plus large. Ainsi, les éléments forestiers sont regroupés, tout comme les milieux ouverts non-urbains (prairies et pelouses). A l'échelle locale, ces éléments sont différenciés, car la vue plus restreinte permet une lecture plus fine de ces espaces. La distinction de certains éléments tels que les routes bruyantes, et les bâtiments de hauteur différentes est liée à l'attribution des pondérations des classes, qui seront expliquées dans la partie 2.3 du rapport.

## Echelle globale

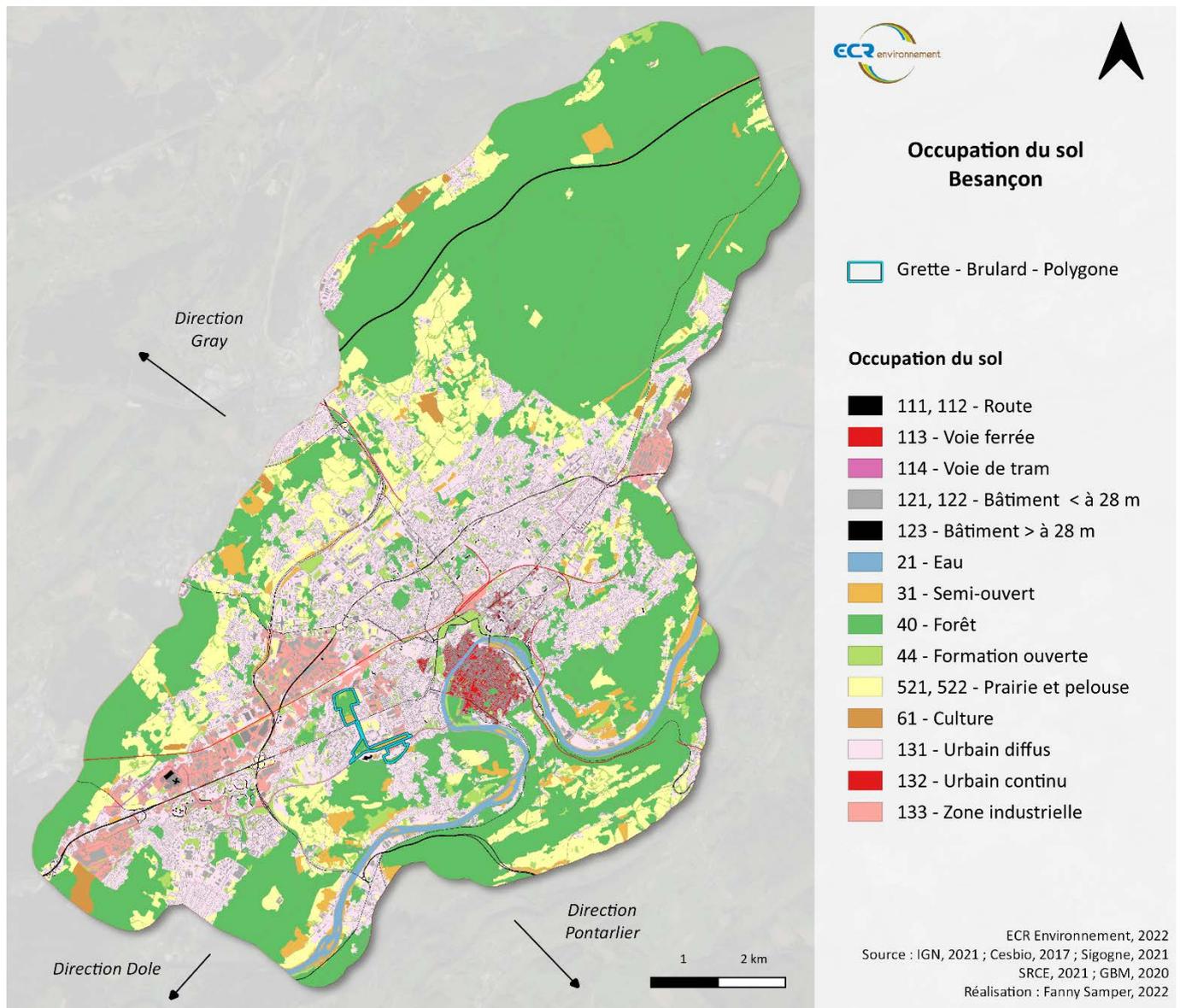


Figure 7 : Carte d'occupation du sol à l'échelle de la ville de Besançon

A l'échelle globale, les terrains du projet apparaissent comme implantés dans la trame urbaine bisontine. Les éléments paysagers les plus marquants sont les espaces forestiers des collines environnantes, au sud de Besançon (Chaudanne, Bregille, Rosemont notamment), et la forêt de Chailluz au nord de la ville. On voit que cette dernière est entourée par une ceinture végétale assez importante, qui constitue un réseau d'espaces forestiers.

La rivière du Doubs, qui borde la ville au sud, est également un élément structurant du paysage. A proximité, on retrouve des espaces caractéristiques tels que des ripisylves et des zones de broussailles, qui constituent des milieux intéressants pour l'écologie de certaines espèces d'oiseaux. On note également la présence d'espaces plus ouverts, agricoles, au nord de la ville, à proximité de la forêt de Chailluz. Ces espaces se situent en bordure d'agglomération, dans une zone d'habitat moins dense. Ils constituent, avec les haies qui bordent les prairies, un espace bocager notable. On retrouve le même type d'espace ouvert à proximité de la zone d'étude, au sud-ouest.

Echelle locale

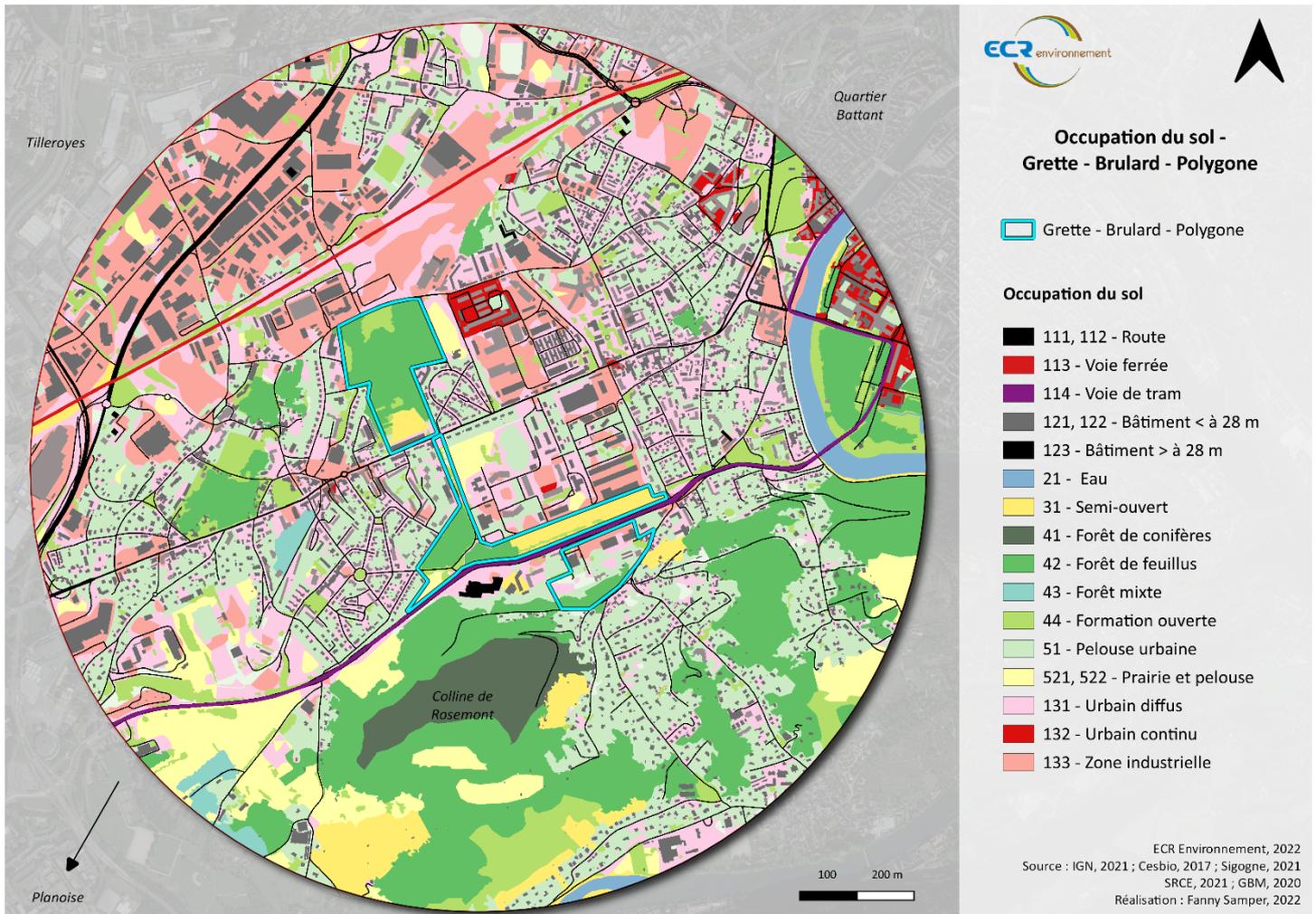


Figure 8 : Carte d'occupation du sol autour des quartiers de Grette/Brulard/Polygone

A l'échelle locale, la structure du territoire est plus complexe. Tout d'abord, on remarque au niveau des réseaux de transport, que le maillage est dense et structuré autour de plusieurs axes principaux tels que la rue de Dole, qui traverse la zone, entre les quartiers de Polygone et de Brulard.

Au sud, la voie du tramway est également à noter comme élément structurant. En effet, on remarque un effet de coupure entre les deux espaces de chaque côté de la voie : au sud, le territoire est composé d'espaces plus naturels, notamment les collines de Rosemont et de Chaudanne. Le tissu urbain est moins dense, et les espaces ouverts et semi-ouverts sont plus nombreux. En revanche au nord de la ligne de tramway, le maillage urbain se densifie, on note également la présence de la zone industrielle au nord-ouest. Les espaces naturels ont une superficie moins importante, il s'agit surtout de parcs et jardins.

Les espaces de la zone d'étude sont constitués d'une forêt de feuillus assez dense, dans le quartier de Polygone, avec des clairières plus clairsemées par endroit. On retrouve le même type de forêt plus au sud. Des espaces semi-ouverts sont également présents, au sud de la forêt de Polygone, et le long de la voie de tramway, à Brulard. La zone de la Grette est plus urbanisée.

Dans cette configuration, ce secteur apparaît comme une zone de transition entre les milieux naturels au sud et la ville au nord. Les terrains sont insérés dans la trame urbaine mais restent accessibles depuis les espaces boisés des collines environnantes. Il semble donc que ce secteur ait des potentialités pour la biodiversité localisée dans les réservoirs proches, notamment la colline de Rosemont.

## 2.2 Création de la base de données

Une fois que les supports d'occupation du sol ont été créés pour les deux échelles de modélisation, il faut constituer la base de données sur laquelle les analyses vont se baser. Pour cette étude, il s'agit de la liste des espèces potentiellement présentes sur la zone, ainsi que leurs caractéristiques (voir Tableau ci-dessous). Plusieurs sources de données ont été utilisées pour constituer cette base : tout d'abord, la liste des espèces présentes dans les deux ZNIEFF du périmètre d'étude. Ensuite, d'après l'inventaire des nicheurs potentiels sur le site, réalisé par la LPO de Franche-Comté. Et enfin, en complétant avec les oiseaux observés lors des inventaires effectués par le bureau d'étude sur le terrain. Au total, on recense une centaine d'espèces d'oiseaux pouvant circuler sur la zone de Grette/Brulard/Polygone.

Types d'oiseaux	Cortèges de reproduction	Cortèges de chasse	Distance max. de déplacements quotidiens	Taille min. de l'habitat
Oiseaux forestiers	Forestier général	Forestier général	800 m	0,001 ha <sup>19</sup>
		Ouvert urbain		
		Semi-ouvert		
	Feuillus	Feuillus		
		Semi-ouvert		
		Ouvert général		
	Formation ouverte	Formation ouverte	250 m	
		Ouvert général		
		Semi-ouvert		
Oiseaux des milieux semi-ouverts	Semi-ouvert	Semi-ouvert	600 m	> 0,5 ha
		Ouvert général		
Oiseaux des milieux ouverts	Ouvert non-urbain	Ouvert non-urbain	400 m	> 0,5 ha
Oiseaux urbains	Bâti diffus	Ouvert urbain	500 m	0,001 ha
Rapaces	Formation ouverte	Ouvert, Semi-ouvert	2 500 m	> 10 ha

Tableau 3 : Caractéristiques des espèces d'oiseaux pouvant circuler sur site

Les informations sont issues d'un travail de bibliographie conséquent<sup>20</sup>, permettant d'obtenir le profil de chaque espèce d'oiseaux. Les caractéristiques des individus ont été synthétisées en cortèges (de reproduction et de chasse), afin de simplifier les profils écologiques des espèces. Ensuite, des regroupements de profils identiques ont été effectués pour définir des modèles écologiques. Cela permet une analyse la plus précise possible des comportements potentiels.

A l'échelle locale, 9 profils peuvent être distingués, conduisant à 9 modélisations différentes. A l'échelle globale, 5 modélisations seront réalisables. Elles sont présentées dans la partie suivante.

<sup>19</sup> Taille minimale possiblement paramétrable dans Graphab

<sup>20</sup> La bibliographie de la création de la base de données est disponible en Annexe 3 de ce rapport

## 2.3 Modélisation des réseaux écologiques

Modèles à l'échelle globale	Modèles à l'échelle locale
Forestiers généralistes	Forestiers généralistes
	Spécialistes des feuillus strictes (Pic Mar)
	Spécialistes des feuillus, chassant en milieu semi-ouvert
	Spécialistes des feuillus, chassant en milieu ouvert (Pic Cendré)
	Spécialistes des formations ouvertes chassant en milieu semi-ouvert (Torcol Fourmilier)
	Spécialistes des formations ouvertes chassant en milieu ouvert
Rapaces	X
Oiseaux des milieux semi-ouverts	
Oiseaux des milieux ouverts	
Oiseaux urbains	

Tableau 4 : Liste des modélisations réalisées à l'échelle globale et locale

Une espèce dite « déterminante ZNIEFF », est une espèce considérée comme importante pour l'écosystème, rare ou menacée, présentant un enjeu pour sa zone d'habitat<sup>21</sup>. Ces espèces (en rouge dans le tableau ci-dessus) sont les plus importantes, car la préservation de leur environnement est une priorité. Ce sont donc ces profils qui sont analysés en priorité dans la troisième partie du rapport.

Les caractéristiques présentées précédemment dans le Tableau 3, vont être utilisées afin de paramétrer le logiciel Graphab (notamment les déplacements quotidiens). Les habitats ne seront pas les mêmes en fonction du modèle : de ce fait, la matrice de pondération va varier.

Une autre caractéristique aviaire a été incluse à la base de données, il s'agit des barrières de déplacements de chaque espèce. En effet, le travail bibliographique a permis de montrer que certains oiseaux sont plus à l'aise dans certains endroits que d'autres, et que leurs comportements aériens ne sont pas les mêmes. Par exemple, les oiseaux forestiers ont plus de réticences à survoler des espaces ouverts, à cause de la prédation dont ils sont victimes. Ainsi, un barème de coût a été déterminé afin de pouvoir pondérer chaque classe d'occupation du sol (voir tableau ci-contre).

Les Annexes 1 et 2 de ce rapport présentent les matrices de pondération de chaque modélisation.

Fonction de la classe	Valeur de coût attribuée
Habitat	1
Chasse	1
Favorable	10
Neutre	50
Barrière faible	100
Barrière moyenne	500
Barrière forte	1 000

Tableau 5 : Barème de pondération des habitats

<sup>21</sup> Guide méthodologique pour l'inventaire continu des Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique (ZNIEFF) en milieu continental. [https://inpn.mnhn.fr/docs/ZNIEFF/SPN-2014-28-MethodoZC\\_11\\_2014-2.pdf](https://inpn.mnhn.fr/docs/ZNIEFF/SPN-2014-28-MethodoZC_11_2014-2.pdf)

Pour les deux échelles d'analyse, plusieurs indicateurs ont donc été calculés, permettant de quantifier la connectivité des réseaux écologiques.

Tout d'abord, les graphes paysagers de chaque modèle écologique ont été réalisés. Dans ce rapport, ils sont présentés en vue réaliste (voir Figure 4 de la partie 1.3 du rapport). L'indice de centralité intermédiaire a été calculé pour les nœuds et les liens de chaque graphe. Il représente la connectivité potentielle des habitats et des chemins qui les relient.

Les corridors potentiels de déplacement ont également été modélisés. Ils représentent « l'ensemble des zones potentiellement atteignable par des individus se déplaçant de manière aléatoire dans le paysage »<sup>22</sup>. Autrement dit, il s'agit de l'ensemble des chemins empruntable par un individu se déplaçant entre deux taches, dans la limite de sa distance maximale de déplacement.

### III. Résultats

Dans cette troisième partie, les résultats obtenus après la modélisation sur Graphab de chaque modèle déterminé auparavant par la méthodologie seront présentés, à l'échelle globale, puis locale, pour enfin se concentrer sur la zone d'étude.

#### Encadré méthodologique n°2 : Comparaison des modélisations

Plusieurs modélisations vont être réalisées, pour les deux échelles d'analyses. La métrique calculée, l'indice de centralité intermédiaire, donne une valeur maximale correspondant à la surface totale de l'habitat au carré<sup>23</sup>. De ce fait, cette valeur va varier en fonction des modèles, car les habitats seront différents. Prise seule, cette valeur n'a pas beaucoup de sens. Pour pouvoir l'interpréter, il faut comparer les valeurs de plusieurs taches entre elles. Pour pouvoir comparer les différentes modélisations, une normalisation des valeurs de BC des nœuds et des liens a été réalisée : les valeurs sont ramenées entre 0 et 1, 0 étant le minimum et 1 le maximum. Ainsi, la comparaison des graphes est possible.

$$x_{norm} = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}$$

*Formule de la normalisation des valeurs*

Pour les corridors potentiels de déplacement, la valeur maximale est le nombre de chemins passant sur un pixel donné. Chaque pixel a donc une valeur, qui correspond au nombre de chemins passant par celui-ci. Pour les corridors, une normalisation a été effectuée en prenant en compte le maximum et le minimum de toutes les modélisations (le maximum considéré n'est pas celui de chaque graphe, mais celui du graphe qui a le nombre de chemins le plus élevé).

#### 3.1 Réseaux écologiques à l'échelle globale

Dans cette partie, trois modèles seront présentés : les oiseaux forestiers, les oiseaux des milieux semi-ouverts, et le cortège des rapaces, qui n'est présenté qu'à l'échelle globale.

<sup>22</sup> Tarabon S., 2020. *La prise en compte des fonctionnalités écologiques dans l'aménagement du territoire et l'application de la séquence Éviter-Réduire-Compenser. De l'échelle projet à la planification.*

<sup>23</sup> Clauzel, C., Foltête, J.-C., Girardet, X., & Vuidel, G. *Graphab 2.6 Manuel d'utilisation.*

Cortège des oiseaux forestiers

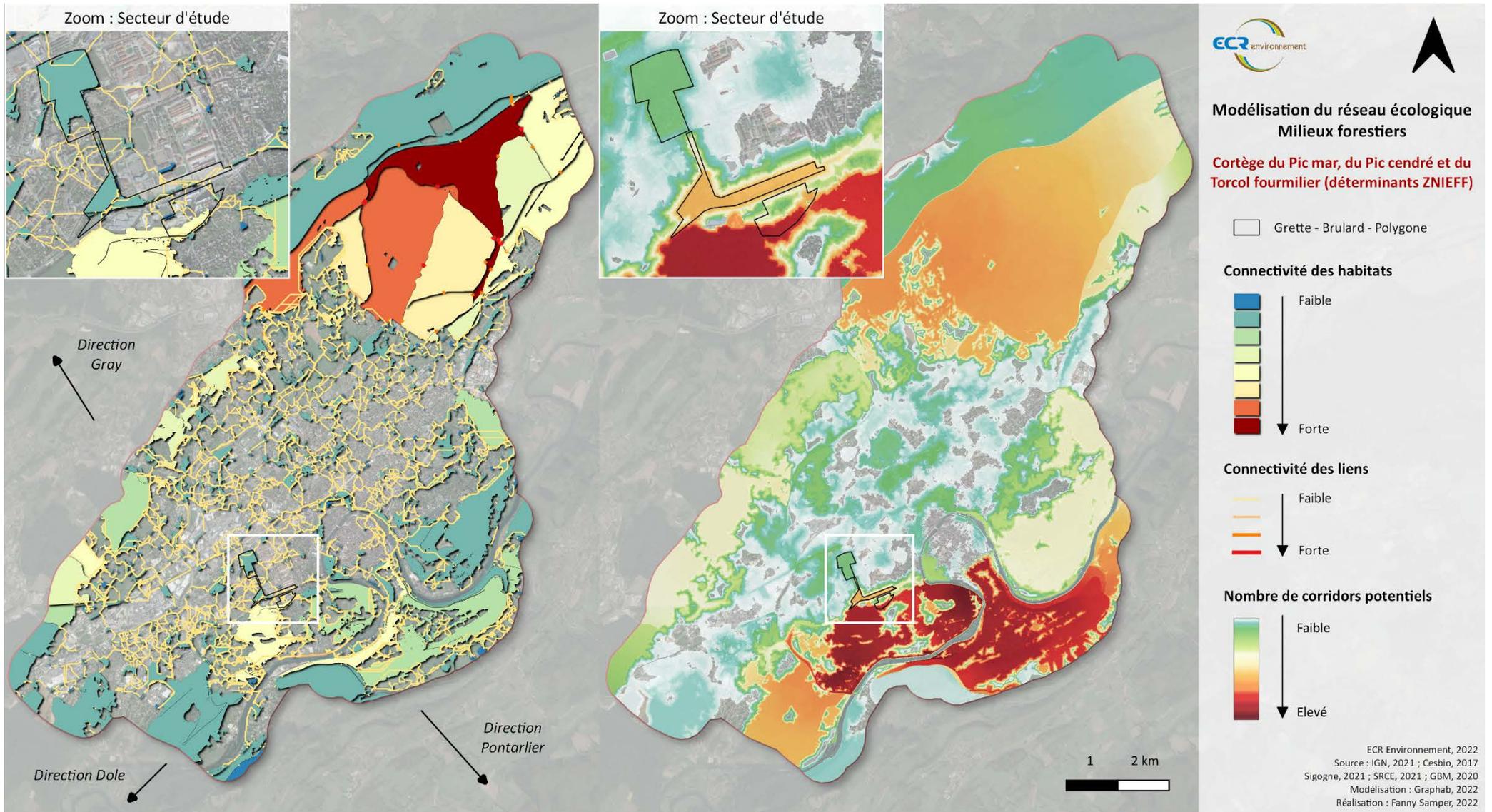


Figure 9 : Cartes du réseau écologique des oiseaux forestiers à l'échelle globale

Le premier modèle étudié est le cortège des oiseaux forestiers, qui regroupe le plus grand nombre d'espèce pour cette étude. En effet, la plupart des oiseaux dépendent des forêts pour leur reproduction, leur nichage et leur alimentation. Ce cortège représente l'ensemble des milieux forestiers, à l'échelle de la ville de Besançon.

Sans surprise, la zone qui concentre les plus grosses valeurs de connectivité est la forêt de Chailluz, au nord de Besançon : elle constitue un espace avec de nombreuses taches d'habitats, de grande superficie, très proches les unes des autres. Au niveau de l'agencement des taches, on constate clairement la ceinture verte des collines boisées qui entourent la ville, notamment les 7 collines principales qui sont Planoise, Rosemont, la Roche d'or et Chaudanne (situées au sud de la ville), la colline de la Citadelle, ainsi que Bregille et la colline du Fort Benoît (situées à l'est de la boucle du Doubs). Les valeurs de connectivité sont assez bonnes pour ces taches, notamment pour la colline de Rosemont, qui est bien connectée à la fois avec les collines en périphérie et également avec les espaces boisés situés dans la trame urbaine.

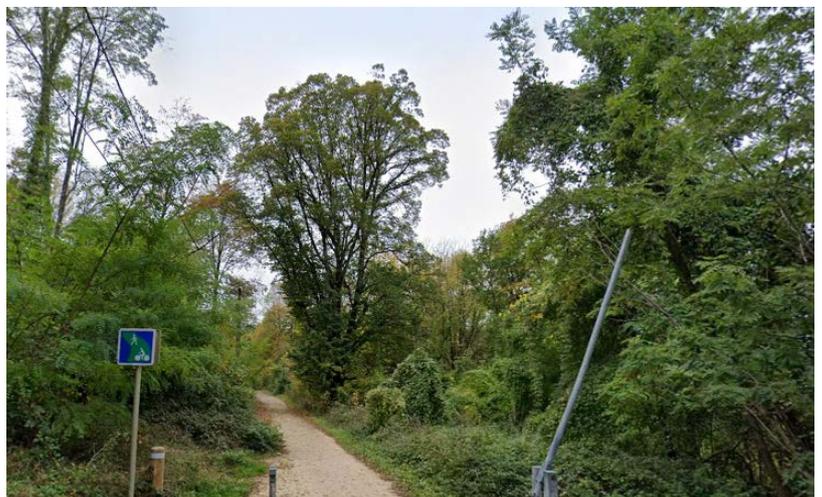


Figure 10 : Vue sur la colline de Rosemont depuis le quartier de Brulard. Sources : Google Street View, 2020

Au centre du tissu urbain, on constate un très grand nombre de taches de forêts de petites superficies, très connectées les unes aux autres, mais avec des valeurs relativement faibles, qui s'expliquent par la densité de ces taches au centre du graphe. Les forêts de Polygone et de Brulard apparaissent dans ce maillage avec des valeurs plutôt faibles.

La forêt au sud de la Grette, connectée avec la forêt de Rosemont, a une valeur plus élevée.

Figure 11 : Forêt de feuillus située au sud du quartier de la Grette, adjacente à la colline de Rosemont. Source : Google Street View, 2020



Au niveau des valeurs des liens, comme pour les nœuds, la forêt de Chailluz concentre les valeurs hautes de l'indice.

Au niveau des corridors de déplacements potentiels (carte de droite de la Figure 9), on voit que notre zone d'étude ressort dans les valeurs élevées : la zone de Polygone apparaît comme une « pénétrante verte » dans le tissu urbain bisontin. Le nombre de chemins est très élevé au niveau des zones naturelles, c'est-à-dire au sud de la ville : les forêts sont assez nombreuses et bien connectées ; la résistance de la matrice est moins forte à cet endroit. En partant de la colline de Rosemont, on observe un gradient décroissant au fur et à mesure que l'on s'éloigne des grands espaces naturels : la connectivité est élevée pour la Grette, moyenne à Brulard et plutôt faible à proximité de la forêt de Polygone. Les valeurs les plus faibles sont concentrées dans la trame urbaine. Les pixels sans valeurs sont les zones qui ne sont traversées par aucun corridor.

Ce cortège des forestiers généralistes est celui qui regroupe les trois espèces déterminantes ZNIEFF de la zone d'étude. En effet, le Pic mar, Pic cendré et le Torcol fourmilier sont tous les trois des oiseaux qu'on retrouve dans les collines boisées à proximité de Besançon. Le Pic cendré notamment, classé comme espèce « Vulnérable » en Bourgogne Franche-Comté, trouve son habitat dans les forêts de feuillus situées à proximité des cours d'eau. Le Torcol fourmilier apprécie également les forêts humides, et les habitats regroupant des milieux comme les ripisylves. La colline de Rosemont, située à proximité de la boucle du Doubs, est un espace favorable pour ces espèces menacées dans la région.



Figure 12 : Torcol fourmilier. Sources : Encyclopédie Encarta, 2009 @Mike Danzenbaker

A cette échelle, on voit que des zones telles que les quartiers de Polygone/Grette/Brulard sont importantes pour faire entrer la nature en ville. Le gradient de connectivité décroît au fur et à mesure qu'on entre dans le tissu urbain et que la résistance de la matrice est plus forte. Ainsi, la connectivité des taches d'habitats des quartiers de Grette/Brulard/Polygone apparaît comme plutôt faible, car ils ne sont pas considérés comme des lieux centraux dans le graphe. En revanche, les chemins potentiels passant par ces espaces sont plutôt nombreux, augmentant la probabilité que des oiseaux circulent sur cette zone.

Cortège des oiseaux des milieux semi-ouverts

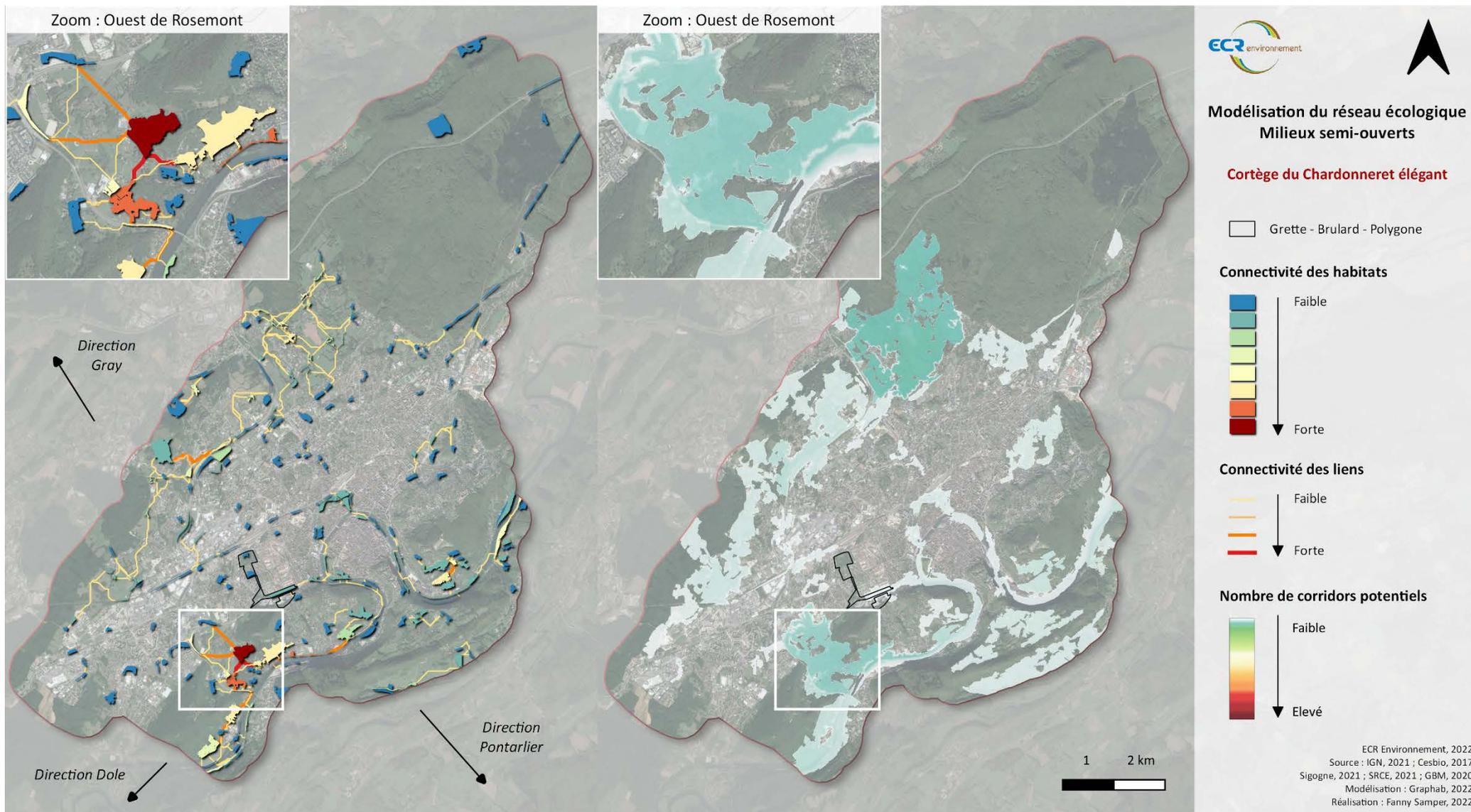


Figure 13 : Cartes du réseau écologique des oiseaux des milieux semi-ouverts, à l'échelle de globale

Les milieux semi-ouverts sont assez variés et constitués d'une végétation clairsemée. Ils constituent des zones de reproduction et de niche pour un certain nombre d'oiseaux. De plus, ils sont importants pour beaucoup d'espèces, au niveau de la chasse et le transit entre deux zones boisées notamment. De ce fait, ils sont importants pour l'écologie globale de la zone, car ils sont le support de différents usages pour les espèces d'oiseaux.

Les milieux semi-ouverts ne sont pas très nombreux en milieu urbain : il s'agit majoritairement des terrains vagues et des friches à l'abandon. En revanche ils sont assez présents sur les marges naturelles, notamment à l'ouest la colline de Rosemont (zone de vergers assez importante), le long du Doubs (présence de ripisylves) et au nord de la ville, vers des espaces plus agricoles (réseau bocager).

Au niveau du graphe, les valeurs de connectivité pour les taches situées au centre de la ville sont faibles, voire nulles, car la plupart des taches ne sont pas connectées au réseau. La connectivité est plus importante sur les marges urbaines, au nord (dans la zone agricole vers la forêt de Chailluz) et au sud (le long du Doubs). Mais on peut constater qu'il y a une rupture entre les deux zones, et que la ville est une barrière pour le réseau écologique des milieux semi-ouverts.

Les corridors potentiels sont généralement plus nombreux dans les zones qui concentrent un grand nombre de taches proches les unes des autres. Pour ce cortège, il s'agit surtout de la zone agricole située en bordure de la forêt de Chailluz. Non seulement c'est un espace qui concentre un nombre important d'habitat, mais c'est également une zone avec beaucoup d'espaces ouverts, qui sont des zones de chasses pour les oiseaux des milieux semi-ouverts. Ainsi, les déplacements autour et entre les taches sont favorisés par la présence d'espaces propices. Néanmoins, malgré un nombre de corridors assez important, la connectivité entre les taches reste assez faible à cet endroit, ce qui est sûrement dû au fait qu'elles se situent en périphérie du graphe, et que leur superficie est relativement faible.

Les valeurs les plus importantes de connectivité se retrouvent dans la zone de vergers située au sud-ouest de la colline de Rosemont. A cet endroit, les taches et les chemins ont des valeurs de BC très élevées (voir zoom de la Figure 13).



Figure 14 : Vergers situés à l'ouest de la colline de Rosemont.  
Sources : Google Street View, 2019.

Les quartiers de Grette et Brulard sont plutôt bien connectés avec les espaces qui sont proches, notamment le réseau de ripisylves situé le long du Doubs. Toutefois, cela ne permet pas de faire le lien avec le reste des habitats qui sont trop éloignés et séparés par la trame urbaine.

Cortège des rapaces

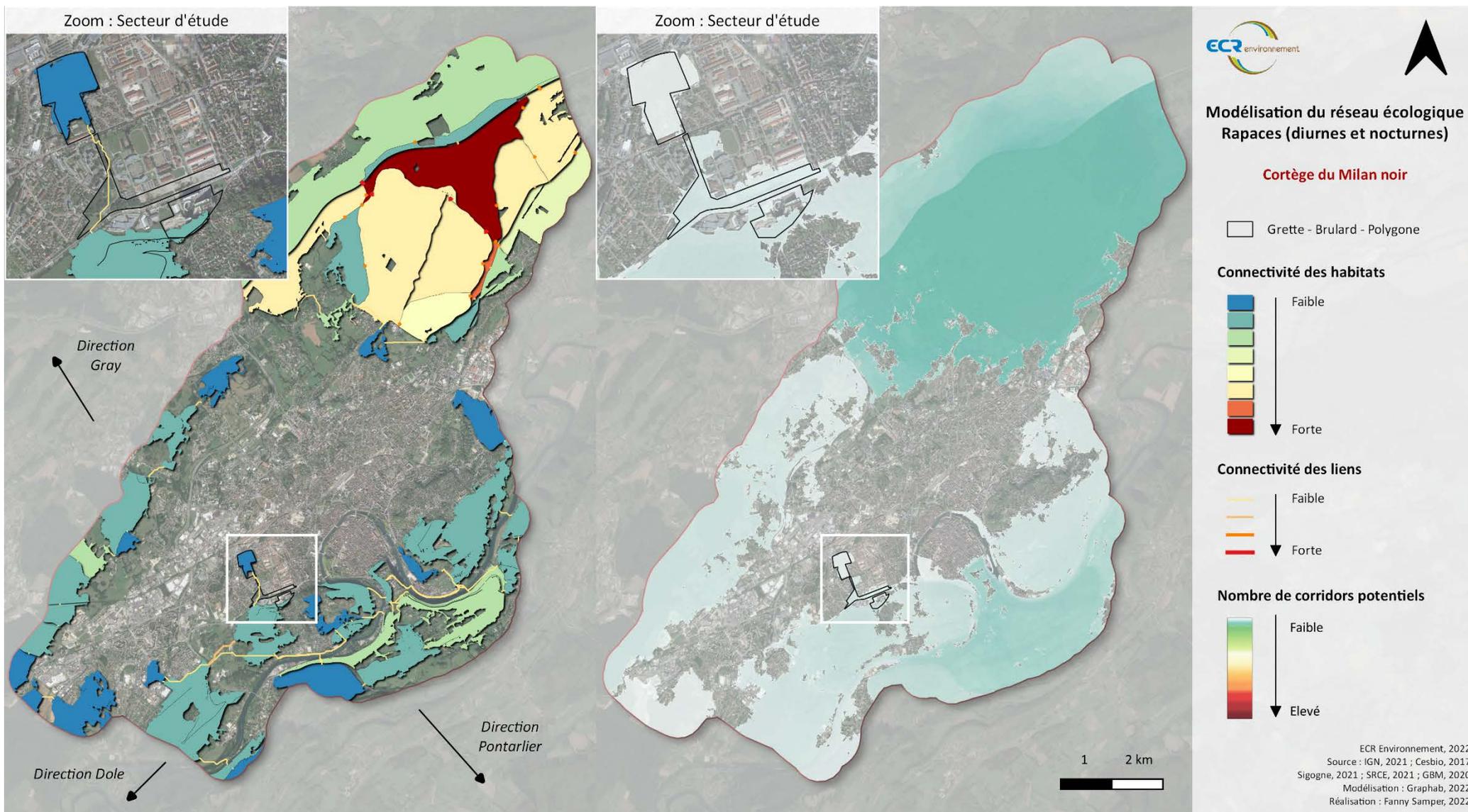


Figure 15 : Cartes du réseau écologique des rapaces à l'échelle globale

En milieu urbain, la présence des rapaces est plus difficile à observer. Certains rapaces se sont très bien accommodés des milieux bâtis, comme par exemple l'épervier d'Europe, qui chasse les petits oiseaux à la faveur des parcs urbains, ou la chouette chevêche qui niche dans les bâtiments abandonnés. Néanmoins, la majorité des rapaces inventoriés sur la zone d'étude nichent en milieu forestier. De plus, en tant qu'espèces territoriales, ils nécessitent un domaine vital important<sup>24</sup>.

La modélisation du réseau écologique des rapaces est très similaire à celle des oiseaux forestiers, car il s'agit des mêmes habitats. Néanmoins pour les rapaces, seulement les forêts d'une superficie plus grande que 10 hectares sont considérées comme potentiellement habitables. De ce fait, tous les espaces boisés du cœur de ville disparaissent, néanmoins la forêt de Polygone est prise en compte.

Comme pour la modélisation des milieux forestiers, on distingue les valeurs de connectivité les plus fortes au niveau de la forêt de Chailluz. La ceinture verte autour de la ville apparaît avec des valeurs plus faibles, qui peuvent s'expliquer par le faible nombre de connexions entre les taches.

Trois composantes apparaissent au sein du réseau : la forêt de Chailluz, les collines au sud de la ville et la zone forestière à l'ouest (direction Gray). Ces trois entités ne sont pas connectées en raison d'une rupture de connectivité écologique présente sur la zone. Bien que les rapaces se déplacent à très grande distance (minimum 2,5 kilomètres), cela n'apparaît pas comme suffisant pour connecter les grands ensembles forestiers de la commune.

La forêt de Polygone est connectée à la colline de Rosemont mais pas au reste des taches du réseau. Néanmoins, même si la modélisation ne la fait pas ressortir comme une zone très connectée à l'ensemble du graphe, plusieurs espèces de rapaces ont été observées sur site lors des inventaires ; ce qui atteste de leur présence à cet endroit. C'est par exemple le cas du Milan noir, un rapace diurne qu'on retrouve souvent en périphérie des zones urbaines, qui niche dans les forêts de grands arbres, à proximité des cours d'eau.



Figure 16 : Milan noir en vol.  
Source : [www.oiseaux.net](http://www.oiseaux.net) @Jules Fouarge

Les annexes 4 et 5 de ce rapport présentent les deux autres modélisations réalisées à l'échelle globale, c'est-à-dire pour le cortège des oiseaux urbains et des oiseaux des milieux ouverts. Ces milieux ne sont pas présents sur notre zone d'étude ; leur analyse n'est pas utile pour ce dossier.

<sup>24</sup> Ministère National d'Histoire Naturelle. *Fiches INPN Cahiers d'Habitat « Oiseaux »* - MEEDDAT - MNHN

## Conclusion

A l'échelle globale de la commune de Besançon, il apparaît que la ville provoque des ruptures de continuité écologique entre les zones propices à l'avifaune (forêts, prairies, landes et broussailles) situées de part et d'autre du tissu urbain, pour bon nombre d'espèces. C'est le cas notamment pour les oiseaux des milieux semi-ouverts, qui trouvent très peu d'habitats au sein de la ville, et les rapaces, qui ont un critère strict de sélection d'habitat.

Au niveau des milieux forestiers, l'influence très forte de Chailluz est flagrante sur la modélisation. La forêt de Polygone apparaît comme une zone propice à faire entrer la biodiversité dans la ville, grâce à sa proximité avec les espaces forestiers des collines alentours et son ancrage à la périphérie des espaces naturels et artificiels. Cette zone pourrait servir de base à un corridor écologique qui permettrait de relier les deux réservoirs de biodiversité situés en bordure de Besançon, au nord et au sud.

## 3.2 Réseaux écologiques à l'échelle locale

A l'échelle locale, les cortèges des oiseaux forestiers généralistes et des oiseaux des milieux semi-ouverts sont présentés, ainsi que les trois cortèges représentant les espèces déterminantes ZNIEFF.

### Cortège des oiseaux forestiers généralistes

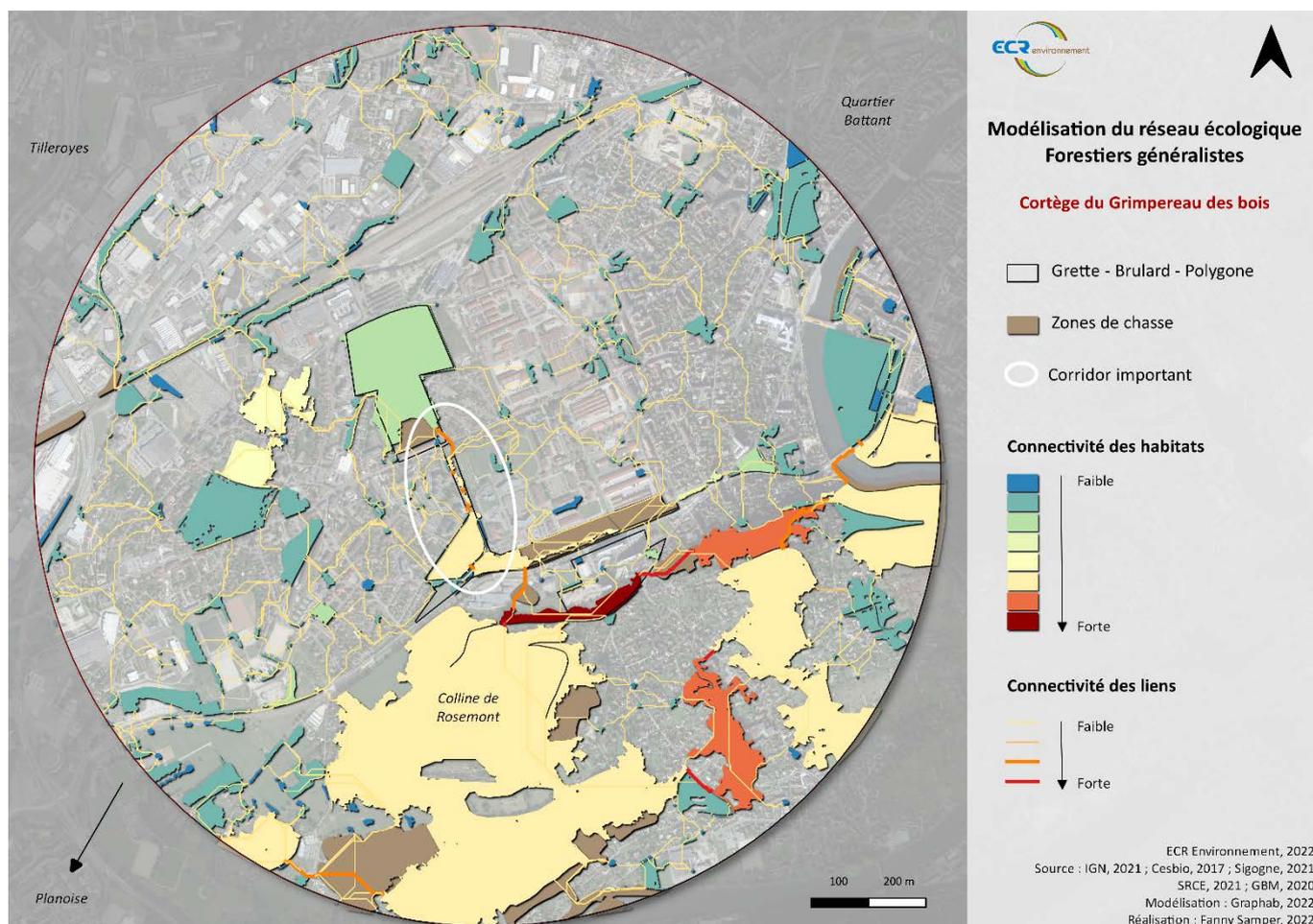


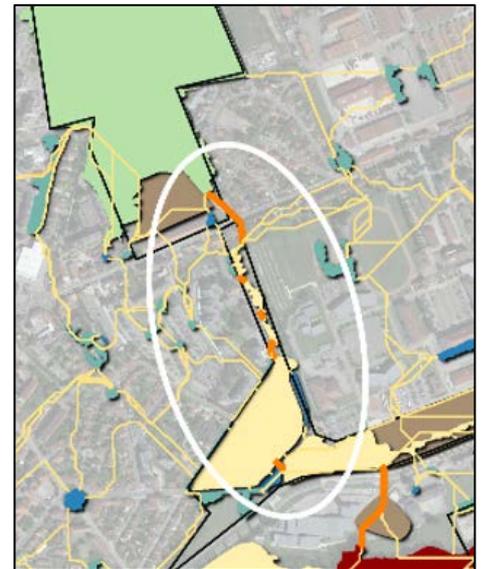
Figure 17 : Carte du réseau écologique des forestiers généralistes à l'échelle locale

Cette modélisation est importante pour notre analyse, car la majorité des habitats présents sur la zone de Polygone/Grette/Brulard sont des habitats forestiers. Les espaces de chasse sont représentés car ils constituent des zones de transit entre les taches d'habitats.

Pour cette modélisation, la connectivité potentielle est assez forte sur la majorité de l'aire d'étude, notamment au niveau des zones forestières du sud de Besançon, qui sont composées des trois collines évoquées précédemment. Cette connectivité est également forte pour le quartier de Grette, avec sa frange boisée adjacente à la colline de Rosemont, et pour la forêt de Brulard dans une moindre mesure. On observe clairement un gradient décroissant du sud au nord : plus on rentre dans le tissu urbain, et plus la connectivité des taches diminue.

L'élément le plus marquant de ce graphe est la zone constituée de petits boisements à Brulard, le long de la caserne militaire (entourée en blanc sur la carte), avec des liens qui ont des valeurs de BC très fortes. On voit ainsi se dessiner un corridor structurant pour le réseau, qui relie Rosemont à Polygone.

*Zoom sur le corridor de Brulard*



Ce corridor est composé de taches de petites tailles, mais assez rapprochées les unes des autres, et qui forment un corridor en pas japonais (voir Figure 1 en introduction) entre deux réservoirs de biodiversité (Rosemont et Polygone). Cet espace est structurant pour le graphe : sans les taches-relais de Brulard, la connectivité globale serait amoindrie.



Figure 18 : Linéaire boisé longeant les casernes militaires à Brulard. Source : Google Street View, 2020.

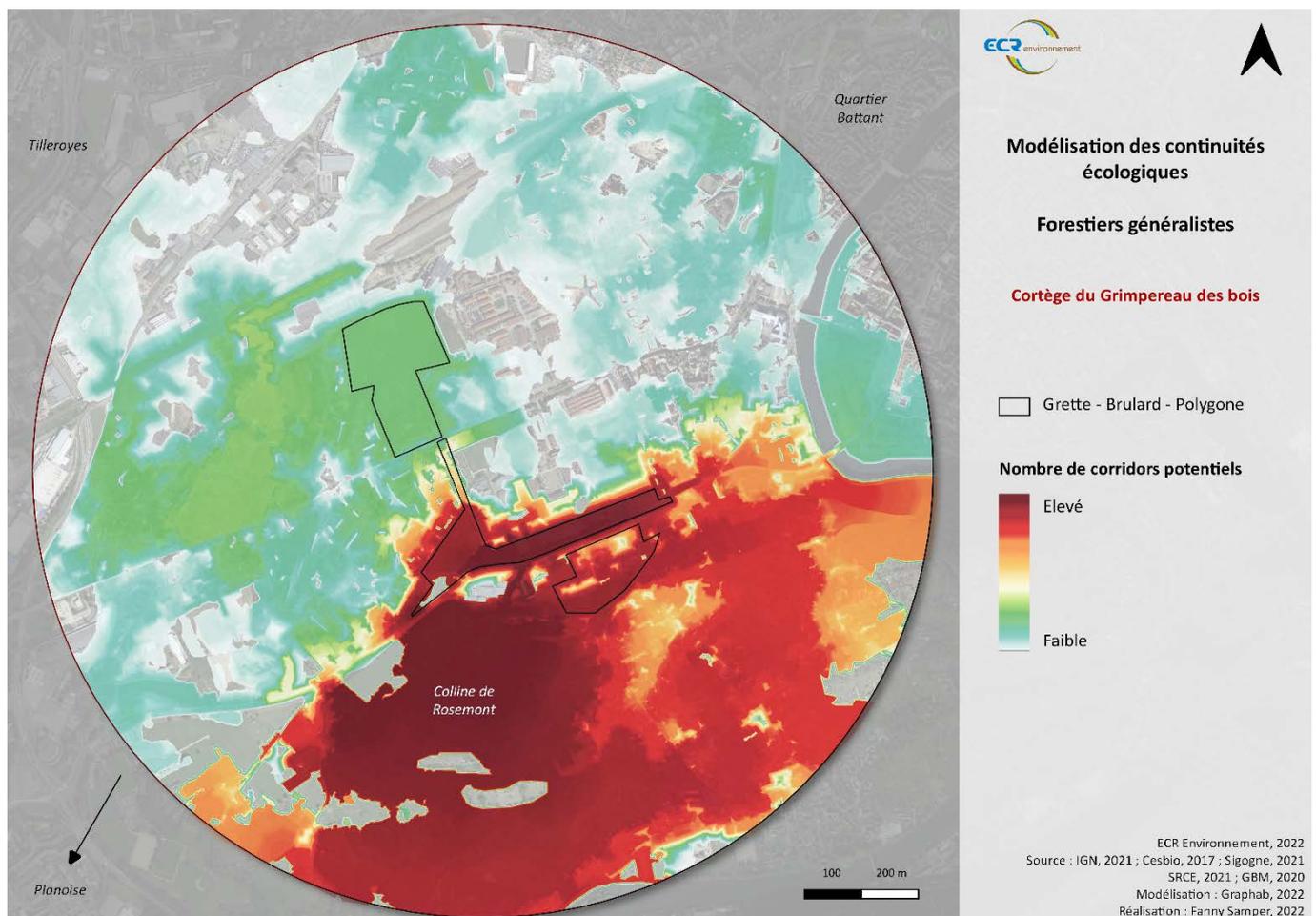


Figure 19 : Carte des corridors potentiels des forestiers généralistes à l'échelle locale

Au niveau du nombre de corridors potentiels de la zone d'étude (voir Figure 19 ci-dessus), on observe à cette échelle, comme à l'échelle globale, un nombre très élevé de chemins potentiels au niveau des zones naturelles des collines au sud. Le gradient entre les espaces naturels et les espaces artificiels est encore très visible.

Cette modélisation souligne l'importance et l'intérêt de préserver les taches-relais au sein du tissu urbain, qui permettent aux oiseaux de se déplacer d'un réservoir à un autre. C'est la structure du réseau qui permet à la biodiversité d'intégrer les zones naturelles enclavées dans la ville, grâce au maillage des petits espaces naturels qui forment des corridors.

## Cortège des oiseaux des milieux semi-ouverts

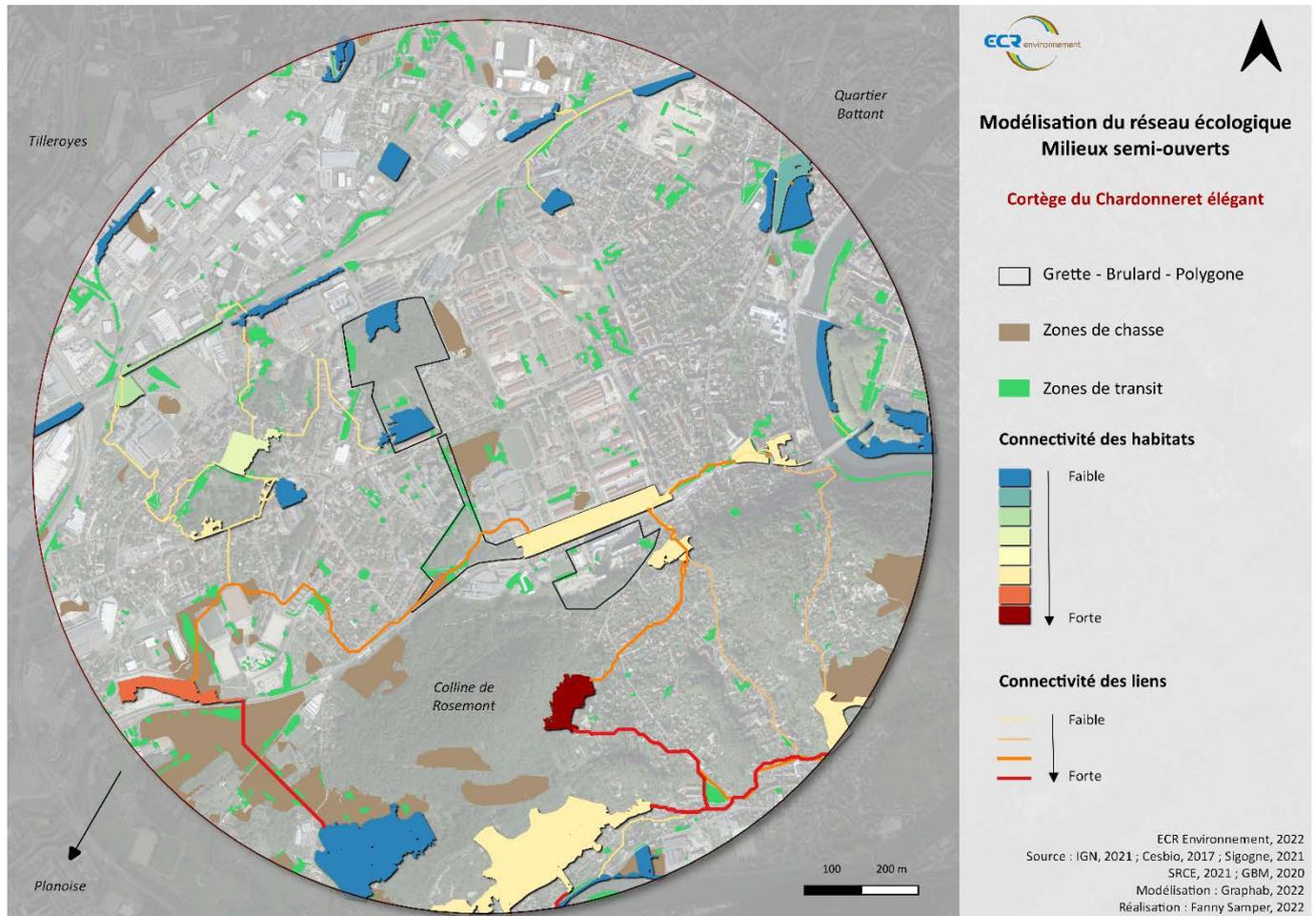


Figure 20 : Carte du réseau écologique des oiseaux des milieux semi-ouverts à l'échelle locale

Les milieux semi-ouverts ne sont pas très nombreux sur la zone, mais il y a plusieurs espaces importants sur les sites d'étude : les deux clairières de la forêt de Polygone, la zone de végétation rase au sud du quartier de Polygone, et le terrain vague de Brulard.

Pour cette modélisation, une taille minimale d'habitat a été paramétrée. En effet, les oiseaux des espaces semi-ouverts préfèrent les taches d'habitats plus compacte et d'une superficie plus importante, dans l'optique de réduire la taille des lisières environnantes. Ainsi, les taches de taille inférieure à 0,5 hectares ne sont pas considérées comme des habitats. Elles sont cartographiées en vert sur la carte ci-dessus, en tant que zones de transit potentielles. On y retrouve notamment le linéaire de boisements de Brulard, qui constitue un corridor important pour les milieux forestiers.

La zone de végétation au sud de Polygone a une connectivité faible, car elle n'est connectée qu'à une seule autre tache située à l'ouest du site. La clairière au nord de Polygone n'est pas du tout connectée avec les taches environnantes, ce qui peut s'expliquer par la réticence des oiseaux des milieux semi-ouverts à franchir les zones forestières ; mais également par la distance de dispersion qui est plus réduite pour ce cortège (600 mètres en distance euclidienne). La deuxième clairière à l'ouest, est trop petite pour être considérée comme une tache d'habitat.

En revanche, le terrain vague du quartier de Brulard est très intéressant pour la connectivité générale du graphe, car il fait le lien entre les zones à l'ouest (zones de vergers et de jardins privés) et les zones au sud et à l'est. Si cette tache disparaissait, le graphe serait déconnecté.



Figure 21 : Terrain vague situé le long des casernes, au sud de Brulard. Source : Google Street View, 2020.

On observe un réseau de haies longeant les voies du tramway et reliant le terrain vague et les espaces verts à proximité du Doubs. Ces zones de transit sont des éléments relais entre les habitats.

La carte des corridors potentiels pour le cortège des milieux semi-ouverts est présentée dans l'Annexe 6 de ce rapport. Elle illustre notamment que les espaces boisés représentent une barrière très forte pour les déplacements des oiseaux de ce milieu.

## Cortège du Torcol Fourmilier

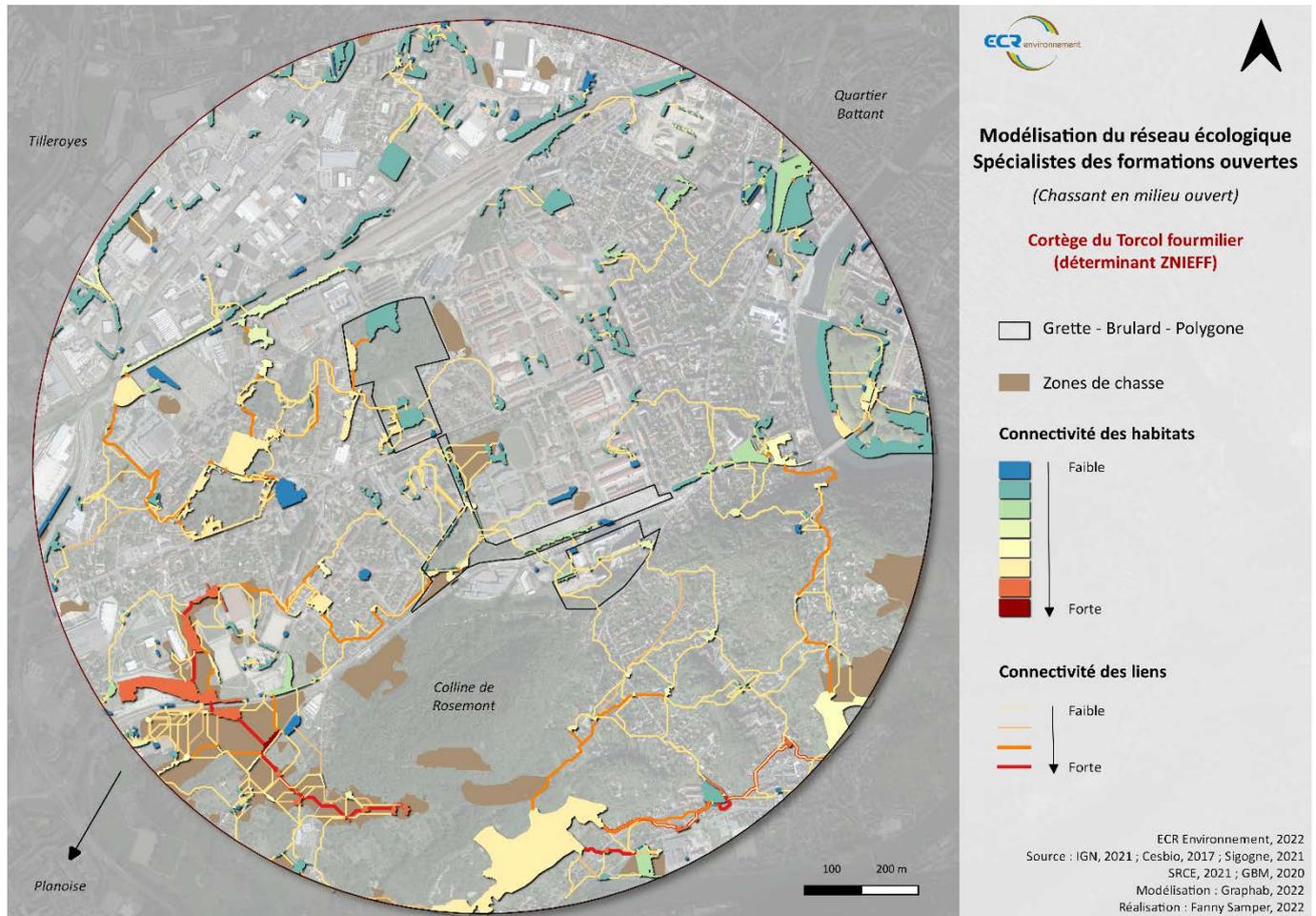


Figure 22 : Carte du réseau écologique du cortège du Torcol fourmilier

Pour cette modélisation des formations ouvertes, on retrouve certains habitats identiques à la modélisation des milieux semi-ouverts, notamment les clairières de la forêt de Polygone. On retrouve aussi le linéaire boisé situé à Brulard, qui est constitué de taches d'habitats, car il n'y a pas de taille minimale d'habitat pour ce modèle.

Les parcs urbains situés à l'ouest de Polygone sont bien connectés entre eux et avec le reste du réseau. En témoignent de fortes valeurs de BC, notamment pour les clairières de Polygone, qui ont des valeurs faibles à moyennes pour les nœuds, mais fortes pour les liens.



Figure 23 : Clairière au nord de la forêt de Polygone.  
Source : Google Street View, 2020.

Pour ce graphe, on note que la résistance de la matrice semble moins importante. Cela s'explique aussi par le fait que la distance de dispersion quotidienne est plus élevée (800 mètres en distance euclidienne).

Le maillage du graphe est plus complexe, avec beaucoup de taches de petites tailles, assez bien reliées les unes aux autres. Le réseau d'espaces naturels situés à l'ouest de Rosemont concentre des valeurs d'indices fortes, notamment grâce aux espaces ouverts qui facilitent le déplacement des individus sur la matrice paysagère.

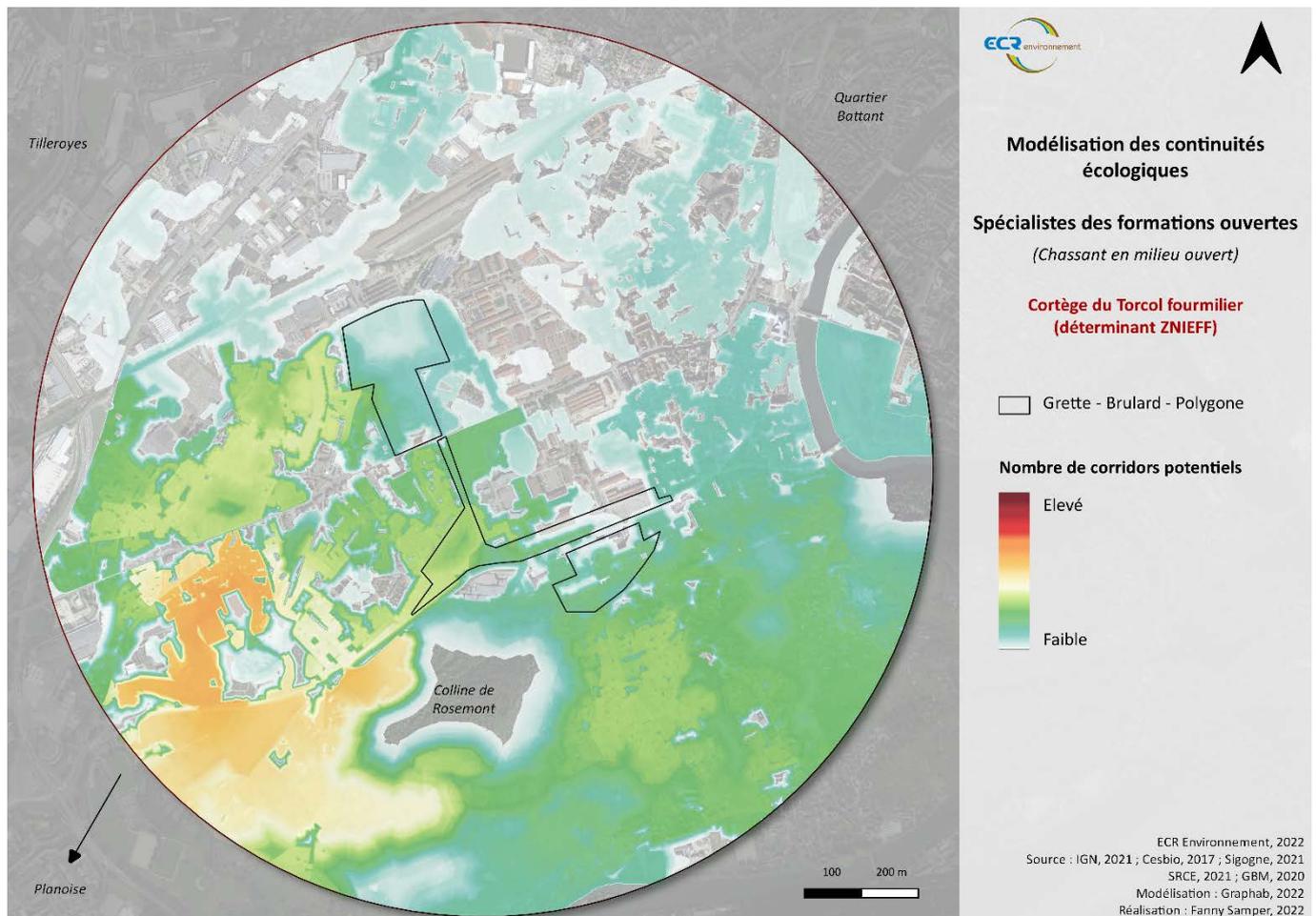


Figure 24 : Carte des corridors potentiels du cortège du Torcol fourmilier

Au niveau du nombre de chemins potentiels, la zone qui ressort avec les valeurs les plus élevées est celle qui concentre un grand nombre de prairies à l'ouest de Rosemont. Comme dit précédemment, la connectivité est favorisée à cet endroit par la présence d'espaces favorables au déplacement des individus entre les taches d'habitat. Les valeurs sont globalement bonnes pour l'ensemble des espaces naturels situés au sud.

En comparaison avec la carte des corridors des oiseaux forestiers analysée précédemment, on observe certaines zones qui possèdent des valeurs fortes pour les deux cortèges, notamment la colline de Chaudanne, et également les espaces verts situés à l'ouest de la forêt de Polygone dans le quartier de Saint-Ferjeux. Ces zones sont propices aux déplacements des oiseaux.

Comparaison entre les cortèges du Pic mar et du Pic cendré

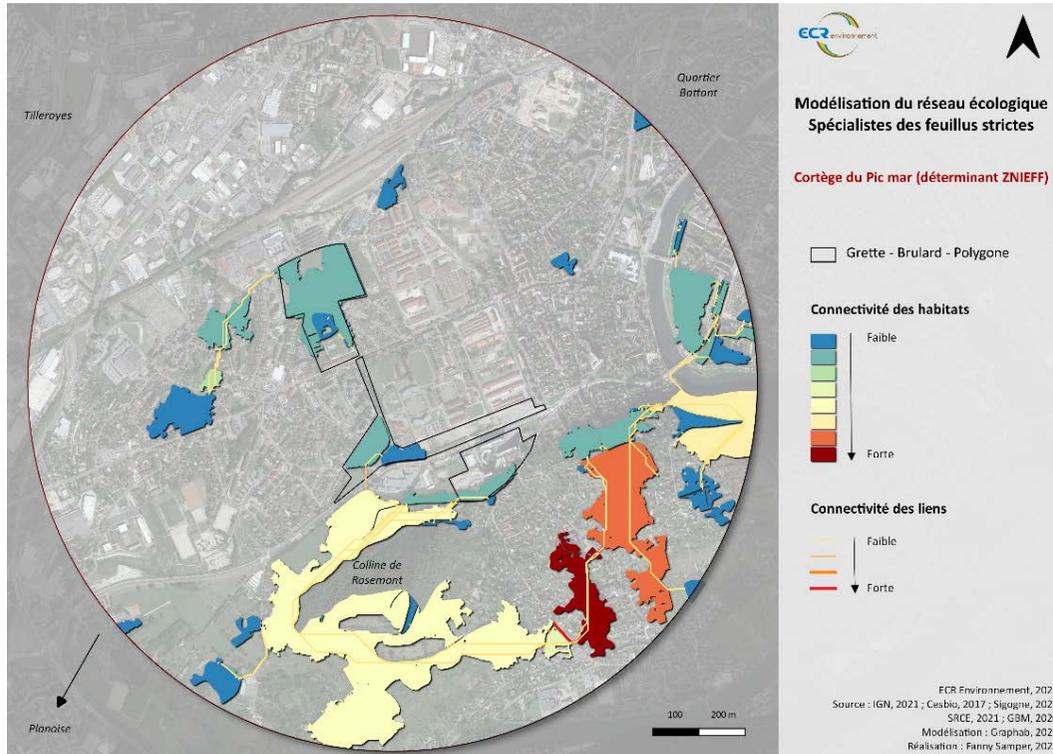


Figure 25 : Carte du réseau écologique du Pic mar

Ces deux espèces déterminantes vivent dans les forêts de feuillus, qui sont majoritaires sur la zone. On retrouve les forêts des sites d'étude, ainsi que les collines environnantes (Rosemont, Chaudanne et le petit Chaudanne). Sur le graphe du Pic mar, on voit que les espaces les plus connectés et qui peuvent concentrer les individus sont les forêts au sud. Dans la ville, on retrouve la forêt de Polygone et les espaces boisés situés à l'ouest ; cette zone est néanmoins séparée du reste du graphe. En effet, les spécialistes des milieux feuillus tels que le Pic mar ont une distance de dispersion plutôt faible.

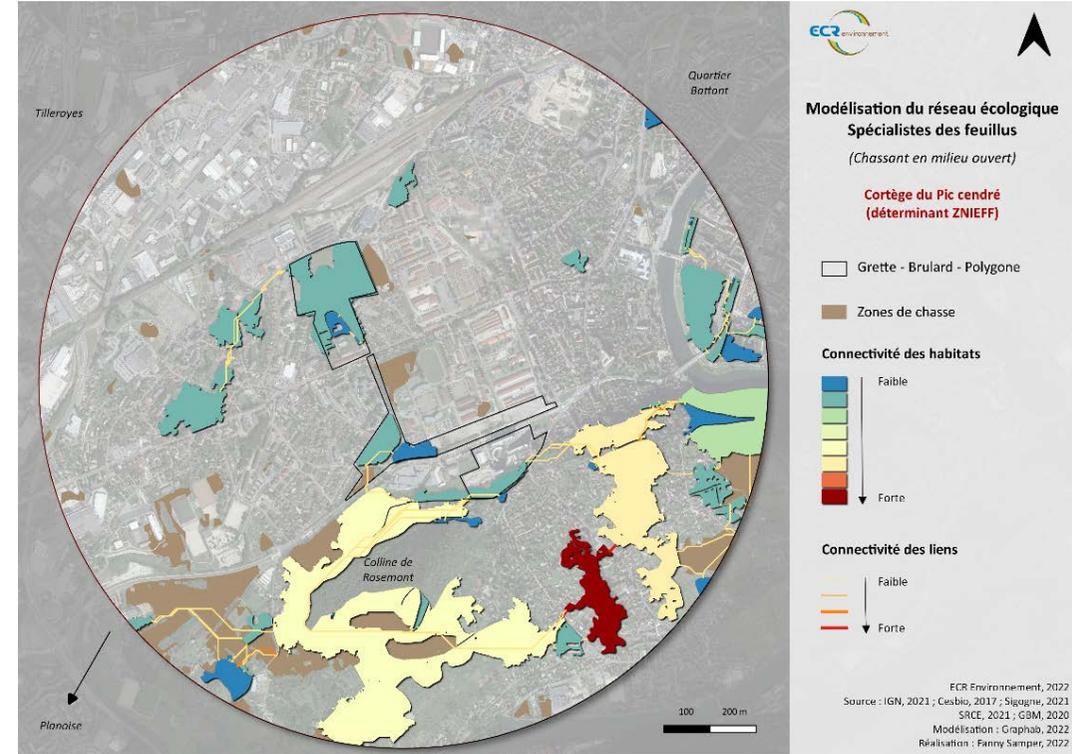


Figure 26 : Carte du réseau écologique du Pic cendré

Pour ce cortège, on constate de fortes ressemblances avec le modèle précédent, mais la connectivité des oiseaux chassant en milieux ouverts est meilleure que celle des oiseaux tributaires des forêts de feuillus. La résistance à la matrice est moins forte et par conséquent, les connexions se font plus facilement. On remarque notamment la zone prairiale à l'ouest de Rosemont qui possède une meilleure connectivité. La colline du petit Chaudanne a toujours une valeur très forte. Néanmoins pour les deux modèles, on constate que les valeurs de connectivité des quartiers de Polygone/Grette/Brulard restent assez faibles.

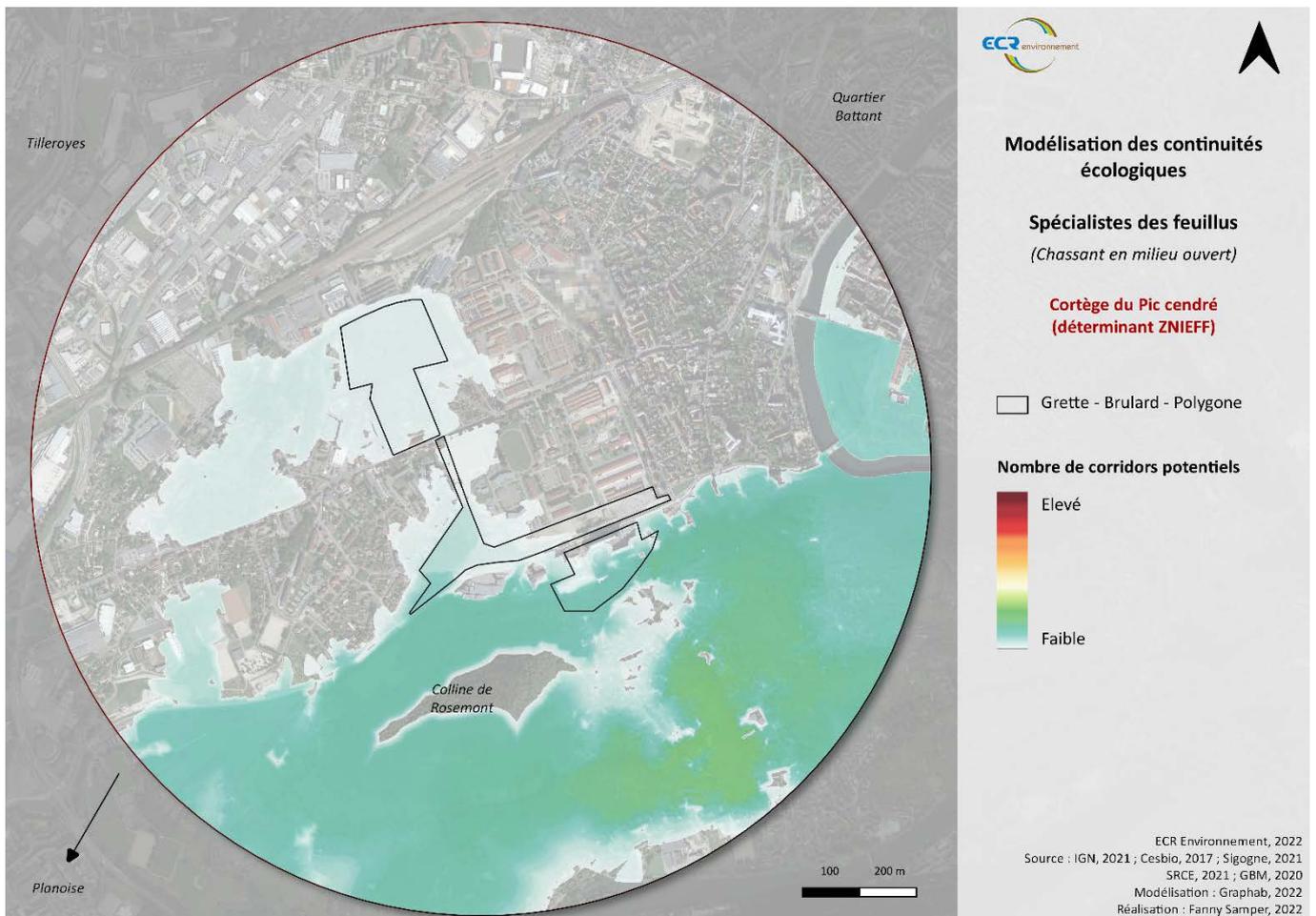


Figure 27 : Carte des corridors potentiels du cortège du Pic cendré

La carte des corridors potentiels du Pic mar est présentée dans l'Annexe 7 du rapport. Sur la carte ci-dessus, on voit que la zone de déplacement des individus sur la matrice se situe principalement au sud de la ville. Les collines de Rosemont, Chaudanne et petit Chaudanne sont des zones où il est aisé de se déplacer pour les oiseaux. C'est aussi un peu le cas de Grette et de Brulard, mais le nombre de corridors se réduit jusqu'à la forêt de Polygone. Il est difficile pour ce cortège de franchir les barrières imposées par la ville. Cela est aussi dû au fait qu'il y a très peu de forêt de feuillus à l'intérieur du tissu urbain.



Figure 28 : Vue de la colline de Chaudanne depuis les berges du Doubs.  
Source : Google Street View, 2021.

Les Annexes 8 à 11 du rapport présentent les quatre autres modèles écologiques réalisés :

- Les oiseaux spécialistes des feuillus, chassant en milieu semi-ouvert ;
- Les oiseaux spécialistes des formations ouvertes, chassant en milieu semi-ouvert ;
- Les oiseaux des milieux urbains ;
- Les oiseaux des milieux ouverts.

### Conclusion

A l'échelle locale, il ressort de l'analyse que la forêt de Polygone est structurante et apparaît comme centrale dans les réseaux écologiques. Le corridor boisé qui longe Brulard est une zone essentielle de transit entre le réservoir de Rosemont et les espaces forestiers situés à l'intérieur de la ville.



Figure 29 : Forêt de Polygone. Source : Google Street View, 2020.

Les milieux semi-ouverts sont importants pour l'écologie de la zone, notamment le terrain vague de Brulard, qui est un espace structurant du réseau, faisant le lien entre les autres taches de la zone. Les milieux semi-ouverts sont importants pour les différents cortèges des oiseaux forestiers, en tant que zone de chasse et également de transit entre les taches d'habitats.

Les haies et les boisements des interstices urbains (haies longeant les voies de tram, lisières forestières en bordure de route) sont des espaces qui permettent aux oiseaux de se déplacer entre les taches d'habitat. Cela souligne l'importance des couloirs de déplacements entre les réservoirs de biodiversité.

### 3.3 Fonctionnement écologique de la zone d'étude

Dans cette dernière partie de résultats, une synthèse des modélisations effectuées à l'échelle locale est présentée. Cette synthèse permet de globaliser les analyses de la partie précédente, par le biais d'une analyse cumulée de la connectivité de chaque modélisation.

Au sein d'ECR Environnement, pour chaque projet de diagnostic environnemental, des cartes d'habitats sont réalisées après les inventaires floristiques sur site, afin de connaître chaque habitat présent sur la zone et leurs enjeux. Cette carte permet de visualiser les différents biotopes à une résolution très précise (voir figure ci-dessous).

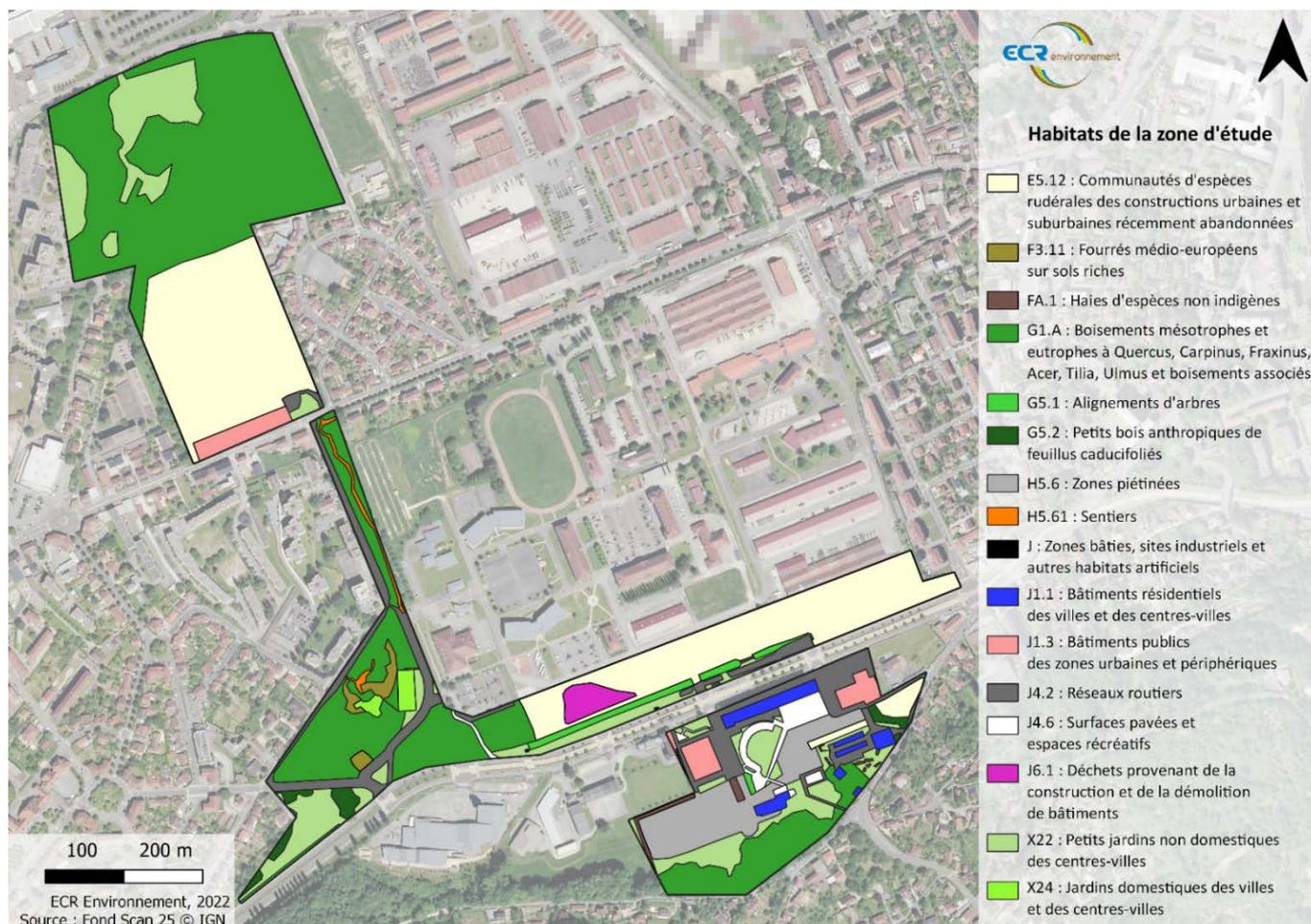


Figure 30 : Habitats présents sur la zone d'étude

Ainsi, pour les sites de Polygone/Grette/Brulard, 16 habitats ont été distingués, dont 9 sont à dominante végétale ou naturelle. Ces habitats sont ceux qui nous intéressent, car ils sont habités par les oiseaux. En intersectant la couche d'habitat avec les taches d'habitat de chaque cortège, on obtient la valeur cumulée de centralité intermédiaire de chaque biotope. Cette méthode permet de visualiser les zones qui ont une valeur de connectivité cumulée plus élevée, et donc potentiellement, les zones à préserver car elles ont un intérêt écologique fort. Cette méthode suppose toutefois qu'on accorde la même importance à chaque profil d'espèce.

Le tableau présenté dans l'Annexe 12 du rapport contient, pour chaque habitat, la valeur maximale normalisée de BC de chaque cortège. Ce tableau permet de hiérarchiser les habitats en fonction de leur valeur de connectivité.

Ainsi, il apparaît que l’habitat qui possède les plus fortes valeurs de connectivité est les « petits jardins non domestiques des centres villes » ; cette catégorie correspond notamment aux clairières situées au nord de la forêt de Polygone. De plus, les espaces semi-ouverts (classe correspondant aux « communautés d’espèces rudérales des constructions urbaines et suburbaines récemment abandonnées ») sont également importants pour la connectivité de la zone ; de même que les boisements (classe E5.12), et les haies (classe G5.1), qui sont des espaces-relais entre les habitats.

A partir de ce tableau, une carte de connectivité cumulée a été réalisée. Sur cette carte, les liens les plus importants de certains graphes (présentés dans la partie 3.2 du rapport) sont également représentés. Ils montrent les corridors de déplacements importants.

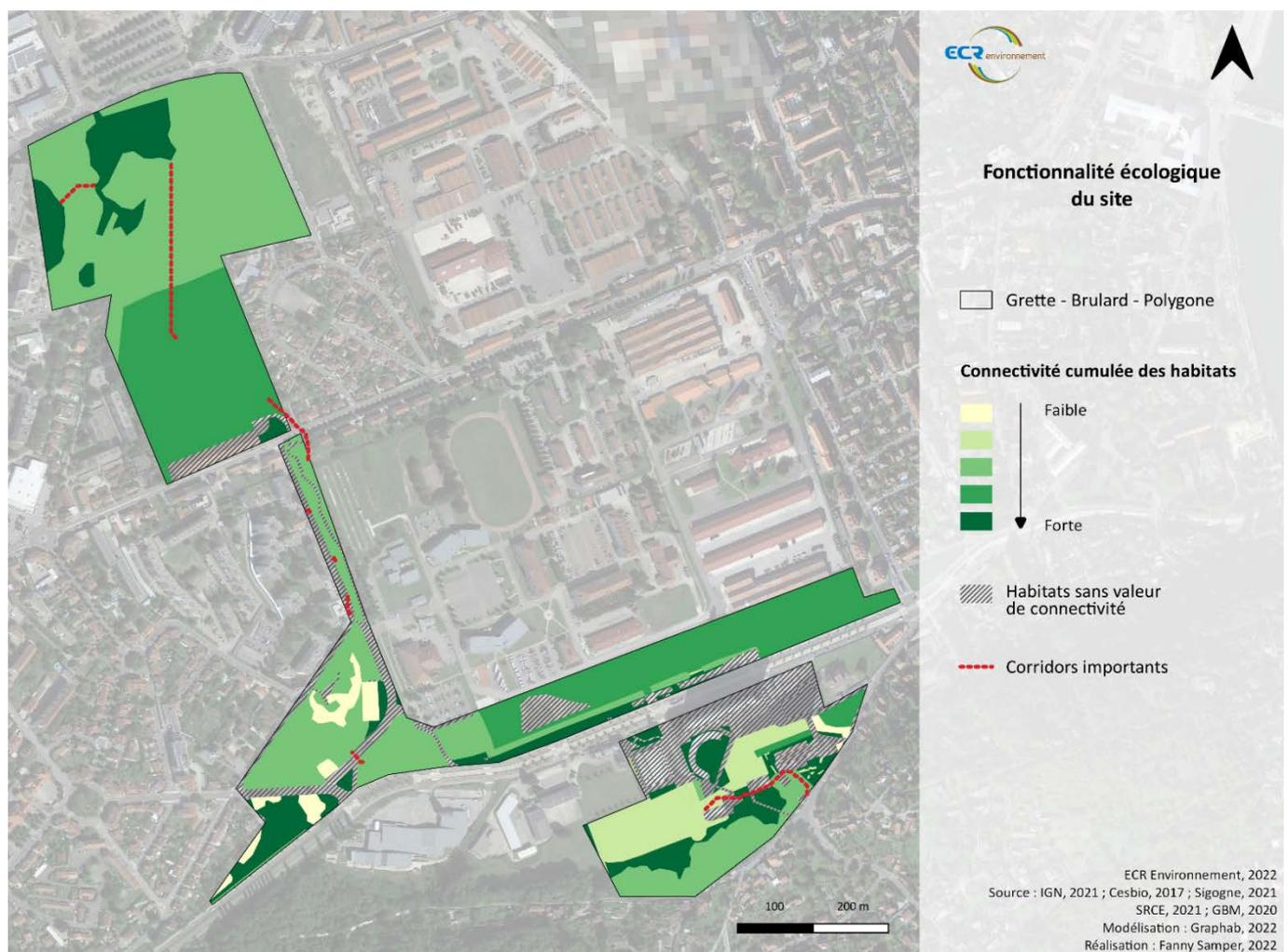


Figure 31: Carte présentant le fonctionnement écologique du site d'étude

Au sein de la forêt de Polygone, les espaces qui ont la valeur de connectivité la plus forte sont les clairières, et non pas la zone de boisement, comme on aurait pu s’y attendre. En effet, ces espaces à tendance semi-ouverte sont attractifs pour un plus grand nombre de cortège que les espaces boisés, qui sont plus spécifiques. Ainsi, la zone de végétation rase au sud de la forêt de Polygone, et le terrain vague de Brulard, apparaissent également avec des valeurs plus fortes que celles des boisements. Les espaces avec des valeurs de connectivité faibles sont situés dans la zone ouest du secteur de Brulard. Ce sont des espaces de surface assez réduite, avec un intérêt écologique moins important pour l’avifaune.

## IV. Discussion et conclusion

Dans cette dernière partie du rapport, nous allons revenir sur la démarche mise en œuvre, en essayant de cerner ses limites et perspectives d'améliorations, ainsi que les apports de cette analyse.

### 4.1 Limites de la modélisation

Dans ce rapport, l'objectif était de cibler les espaces naturels importants des quartiers de Polygone/Grette/Brulard, afin de préserver la biodiversité présente sur le site, dans le cadre du projet de renouvellement urbain de cette zone. La modélisation des réseaux écologiques des espèces d'oiseaux inventoriées a été utilisée dans ce cadre.

En géographie, la modélisation est une représentation schématique de la réalité<sup>25</sup>. La création de modèles spatiaux permet de représenter des phénomènes localisés sur un territoire. L'analyse spatiale qui en découle, vise à comprendre les effets et les interactions de ces phénomènes.

Le choix de l'aire d'étude est primordial dans l'analyse spatiale : Elle détermine la portée des faits observés. Pour ce travail, le périmètre choisi à l'échelle locale comporte un biais dû la centralité des sites d'étude dans la zone modélisée, ce qui influence les graphes paysagers et les métriques de connectivité calculées. A l'échelle globale, le choix d'un périmètre administratif peut entraîner un effet de non-concordance des éléments paysagers. Néanmoins ces biais de la modélisation, sont difficiles à contourner. L'analyse multi-échelle permet de prendre du recul sur les résultats produits.

Les sources de données sont une information fondamentale pour toutes les analyses ultérieures. Le grain spatial des données est lié au détail avec lequel on représente les éléments du paysage. Plus il est fin, et plus les erreurs sont possibles, d'où la nécessité de se baser sur des sources fiables et mises à jour régulièrement.

De même, la « rationalisation » des comportements faunistiques est aussi une représentation. Dans la réalité des faits, les oiseaux ne se déplacent pas forcément selon un schéma défini et prévisible. Les chemins de moindre coûts utilisés pour pondérer les liens d'un graphe paysager ne correspondent pas aux trajectoires réelles, mais on suppose qu'il s'agit des plus probables.

La modélisation permet d'avoir une idée de la façon dont les espèces agissent potentiellement sur un territoire, mais il est toujours bénéfique de comparer les résultats théoriques avec les observations de terrain.

### 4.2 Apports de l'analyse dans le cadre de l'aide à la décision

L'analyse multi-échelle des phénomènes observés a permis d'identifier plusieurs enjeux de territoire. D'un point de vue localisé, les quartiers de Polygone/Grette/Brulard s'inscrivent dans des réseaux écologiques forestiers assez bien développés sur le territoire métropolitain de Besançon. L'ancrage de ces quartiers à la périphérie des espaces naturels et du tissu urbain en fait une zone d'interface pour la biodiversité, avec des corridors de déplacement assez importants, qui pourraient être développés vers l'intérieur de la ville.

---

<sup>25</sup> Définition de la modélisation spatiale par Géoconfluences.

A l'échelle de la ville de Besançon, il y a une différence nette entre les zones forestières et agricoles localisées autour de la ville, et le tissu dense de la zone urbaine. Néanmoins Besançon reste une ville implantée dans un cadre dont la naturalité reste forte, et qui dispose de nombreux espaces verts et boisements, avec des réseaux écologiques en assez bon état. La zone d'étude, du fait de ses surfaces forestières, apparaît comme une pénétrante verte au sein de la ville. C'est un espace avec un fort potentiel écologique.

Les enjeux de la zone de Polygone/Grette/Brulard sont multiples, et ne concernent pas seulement la préservation de la biodiversité. Pour la municipalité, il s'agit de faire de cet espace une zone propice au développement des mobilités douces en milieu urbain. Ainsi, l'un des projets est de créer au sein du site une « trame socio-écologique », qui allierait à la fois préservation de la biodiversité et déplacement en modes doux. Ce projet d'une liaison douce intra urbaine qui relie Rosemont et Chailluz prend en compte les potentialités écologiques des sites d'étude. Plusieurs études ont déjà été élaborées par la ville de Besançon pour créer cette trame socio-écologique, notamment un travail réalisé en 2019<sup>26</sup>. Cette trame pourrait passer par les milieux ciblés dans l'analyse en tant que couloirs importants pour la biodiversité : la zone boisée de Brulard, l'espace semi-ouvert au sud de Polygone, la forêt et la clairière. La préservation de ces zones, qui ont une connectivité forte au sein des réseaux écologiques des espèces, permet de sauvegarder cette continuité écologique. L'ambition d'étendre ce corridor jusqu'à la forêt de Chailluz permettrait de relier les deux réservoirs de biodiversité situés des deux côtés de la ville.

Il apparaît donc que le site d'étude est important pour le réseau écologique de Besançon. La diversité des milieux augmente leur connectivité car cela permet aux espèces de se reproduire, nicher, chasser et transiter sur la zone. La nécessité de concilier développement urbain et préservation des espaces naturels prend tout son sens.

Il ressort de cette analyse que la modélisation a permis de déterminer le fonctionnement écologique potentiel de la zone d'étude, en se basant sur une méthodologie claire et reproductible sur un autre projet. L'analyse spatiale mise en œuvre a permis de cibler les zones à préserver et à restaurer. Dans le processus de prise de décision, l'analyse spatiale est un gain de temps pour les aménageurs : elle permet de rationaliser les dynamiques spatiales des populations et d'analyser le territoire de manière objectivée, en s'appuyant sur des concepts scientifiques, théoriques mais représentatifs des phénomènes observés sur le terrain. Ainsi, le processus décisionnel est amélioré.

---

<sup>26</sup> Matusiak C., 2019. *Elaboration du schéma directeur de la continuité socio-écologique « Rosemont-Chailluz » à Besançon*. Université de Strasbourg - Ville de Besançon.



## BIBLIOGRAPHIE

Bernier A., Théau J., 2013. *Modélisation de réseaux écologiques et impacts des choix méthodologiques sur leur configuration spatiale : analyse de cas en Estrie (Québec, Canada)*. Vertigo 13 Volume 2.  
<https://journals.openedition.org/vertigo/14105>

Bourgeois M., 2015. *Impacts écologiques des formes d'urbanisation. Modélisations urbaines et paysagères*. Université de Franche-Comté – Ecole doctorale « Langages, Espaces, Temps, Sociétés ». [https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01368998/file/these\\_A\\_BOURGEOIS\\_Marc\\_2015.pdf](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01368998/file/these_A_BOURGEOIS_Marc_2015.pdf)

Clauzel C., Gaber C., Godet C., 2020. *Fiches méthodologiques pour la prise en main de Graphab*. [https://www.researchgate.net/publication/342344729\\_Fiches\\_Graphab\\_Tutoriel](https://www.researchgate.net/publication/342344729_Fiches_Graphab_Tutoriel)

Clauzel, C., Foltête, J.-C., Girardet, X., & Vuidel, G., 2020. *Graphab 2.6 Manuel d'utilisation*. <https://sourcesup.renater.fr/www/graphab/download/manual-2.6-fr.pdf>

Court C., 2019. *Etude de la connectivité fonctionnelle : application à l'étude des réseaux de mares franciliens*. Université Paris 1 Panthéon Sorbonne.

Direction Urbanisme Projets et Planification, 2021. *Etude préalable Grette – Brulard – Polygones*. Ville de Besançon.

Foltête J.-C., Clauzel C., Vuidel G., 2012. *A software tool dedicated to the modelling of landscape networks*. Environmental Modelling & Software, 38 : 316-327.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364815212001995?via%3Dihub>

Foltête J.-C., Clauzel C., Vuidel G., Tournant P., 2012. *Integrating graph-based connectivity metrics into species distribution models*. Landscape Ecology 27 : 557-569.

Foltête J.-C., Vuidel G., Savary P., Clauzel C., Sahraoui Y., Girardet X. & Bourgeois M., 2021. *Graphab : an application for modeling and managing ecological habitat networks*. Software Impacts, 8 : 100065.  
[https://www.softwareimpacts.com/article/S2665-9638\(21\)00013-0/fulltext](https://www.softwareimpacts.com/article/S2665-9638(21)00013-0/fulltext)

Girardet X., 2013. *Paysage et infrastructures de transport : modélisation des impacts des infrastructures sur les réseaux écologiques*. Université de Franche-Comté – Ecole doctorale « Langages, Espaces, Temps, Sociétés ». <http://indexation.univ-fcomte.fr/nuxeo/site/esupversions/004d9924-326c-4fa1-b2f0-db75744f7753>

Matusiak, C., 2019. *Elaboration du schéma directeur de la continuité socio-écologique « Rosemont-Chailluz à Besançon*. Mémoire Master 2. Université de Strasbourg – Ville de Besançon.

Tarabon S., 2020. *La prise en compte des fonctionnalités écologiques dans l'aménagement du territoire et l'application de la séquence Eviter-Réduire-Compenser. De l'échelle projet à la planification*. Thèse de doctorat d'Avignon Université – Unité mixte de recherche IMBE – Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie. [https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03179882/file/MS\\_These\\_Tarabon.pdf](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03179882/file/MS_These_Tarabon.pdf)

---

## SITOGRAPHIE

*Artificialisation des sols.* (s. d.). Ministères Écologie Énergie Territoires.

<https://www.ecologie.gouv.fr/artificialisation-des-sols>

D. P.-A.-C. (2022, juin 30). *Définition de la trame verte et des continuités écologiques.* DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur. <https://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/definition-de-la-trame-verte-et-des-continuites-a14322.html>

*Définitions de la Trame verte et bleue | Trame verte et bleue.* (s. d.).

<https://trameverteetbleue.fr/presentation-tvb/qu-est-ce-que-trame-verte-bleue/definitions-trame-verte-bleue?language%3Den=fr>

*La fragmentation des paysages réduit-elle le choix d'habitat ? | INEE.* (s. d.).

<https://www.inee.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/la-fragmentation-des-paysages-reduit-elle-le-choix-dhabitat>

*La nature en ville : Des enjeux paysagers et sociétaux — Géoconfluences.* (s. d.).

<http://geoconfluences.ens-lyon.fr/doc/transv/paysage/PaysageViv.htm>

Papet G., Vanpeene S., 2020. Graphes paysagers et séquence ERC. *Comment intégrer les continuités écologiques à la séquence ERC avec les outils de graphes paysagers ?* INRAE – Centre de ressources TVB.

<https://www.trameverteetbleue.fr/documentation/references-bibliographiques/graphes-paysagers-sequence-erc>

*Qu'est-ce que la connectivité écologique ? | Connectivité Écologique.* (s. d.).

<https://connectiviteecologique.com/connectivite>

Sigward E., 2002. *Introduction à la théorie des graphes.* Académie Nancy-Metz.

<https://www.imo.universite-paris-saclay.fr/~ruette/mathsdiscretes/polygraph-Sigward.pdf>

# ANNEXES

## Annexe 1 – Matrice de pondération des modèles écologiques à l'échelle locale

Occupation du sol	Forestier généralistes		Feuillus strictes		Feuillus → semi-ouvert		Feuillus → ouvert		FO → semi-ouvert		FO → ouvert		Semi-ouvert		Ouvert		Urbains			
<b>21</b> Eau	Moyen	500	Moyen	500	Moyen	500	Moyen	500	Moyen	500	Moyen	500	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50		
<b>31</b> Semi-Ouvert	Chasse	1	Bon	10	Chasse	1	Bon	10	Chasse	1	Bon	10	Habitat	1	Chasse	1	Neutre	50		
<b>41</b> Conifères	Habitat	1	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Bon	10	Bon	10	Moyen	500	Faible	100	Neutre	50		
<b>42</b> Feuillus			H/C	1	Habitat	1	Habitat	1	Bon	10	Bon	10								
<b>43</b> Mixte			Bon	10	Bon	10	Bon	10	Bon	10	Bon	10								
<b>44</b> Formations ouvertes			Bon	10	Bon	10	Bon	10	Habitat	1	Habitat	1							Habitat	1
<b>111</b> Routes bruyantes	Moyen	500	Moyen	500	Moyen	500	Moyen	500	Moyen	500	Moyen	500	Moyen	500	Moyen	500	Faible	100		
<b>112</b> Autres routes	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50		
<b>113</b> Voie ferrée	Faible	100	Faible	100	Faible	100	Faible	100	Faible	100	Faible	100	Faible	100	Faible	100	Faible	100		
<b>114</b> Voie de tram	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50		
<b>121</b> Bâti < 11 m	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50		
<b>122</b> Bâti 11 <...> 28	Moyen	500	Moyen	500	Moyen	500	Moyen	500	Moyen	500	Moyen	500	Moyen	500	Moyen	500	Moyen	500		
<b>123</b> Bâti > 28 m	Fort	1000	Fort	1000	Fort	1000	Fort	1000	Fort	1000	Fort	1000	Fort	1000	Fort	1000	Fort	1000		
<b>131</b> Urbain diffus	Faible	100	Faible	100	Faible	100	Faible	100	Faible	100	Faible	100	Faible	100	Faible	100	Faible	100	Habitat	1
<b>132</b> Urbain continu	Fort	1000	Fort	1000	Fort	1000	Fort	1000	Fort	1000	Fort	1000	Fort	1000	Fort	1000	Fort	1000	Moyen	500
<b>133</b> Zones indu.	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50	Neutre	50
<b>51</b> Ouvert urbain	Bon	10	Bon	10	Bon	10	Chasse	1	Bon	10	Chasse	1	Chasse	1	Bon	10	Chasse	1		
<b>521</b> Prairies	Moyen	500	Moyen	500	Moyen	500			Moyen	500					H/C	1	Bon	10		
<b>522</b> Pelouses									Bon	10										

Annexe 2 – Matrice de pondération des modèles écologiques à l'échelle globale

Occupation du sol	Forestier généralistes		Semi-ouvert		Ouvert		Urbains		Rapaces	
<b>21</b> Eau	<i>Moyen</i>	<b>500</b>	<i>Neutre</i>	<b>50</b>	<i>Neutre</i>	<b>50</b>	<i>Neutre</i>	<b>50</b>	<i>Neutre</i>	<b>50</b>
<b>31</b> Semi-Ouvert	<i>Chasse</i>	<b>1</b>	<i>Habitat</i>	<b>1</b>	<i>Chasse</i>	<b>1</b>	<i>Neutre</i>	<b>50</b>	<i>Chasse</i>	<b>1</b>
<b>40</b> Forêt	<i>Habitat</i>	<b>1</b>	<i>Moyen</i>	<b>500</b>	<i>Faible</i>	<b>100</b>	<i>Neutre</i>	<b>50</b>	<i>Habitat</i>	<b>1</b>
<b>111</b> Routes bruyantes	<i>Moyen</i>	<b>500</b>	<i>Moyen</i>	<b>500</b>	<i>Moyen</i>	<b>500</b>	<i>Faible</i>	<b>100</b>	<i>Faible</i>	<b>100</b>
<b>112</b> Autres routes	<i>Neutre</i>	<b>50</b>	<i>Neutre</i>	<b>50</b>	<i>Neutre</i>	<b>50</b>	<i>Neutre</i>	<b>50</b>	<i>Neutre</i>	<b>50</b>
<b>113</b> Voie ferrée	<i>Faible</i>	<b>100</b>	<i>Faible</i>	<b>100</b>	<i>Faible</i>	<b>100</b>	<i>Faible</i>	<b>100</b>	<i>Faible</i>	<b>100</b>
<b>114</b> Voie de tram	<i>Neutre</i>	<b>50</b>	<i>Neutre</i>	<b>50</b>	<i>Neutre</i>	<b>50</b>	<i>Neutre</i>	<b>50</b>	<i>Neutre</i>	<b>50</b>
<b>121</b> Bâti inférieure à 11 m	<i>Neutre</i>	<b>50</b>	<i>Neutre</i>	<b>50</b>	<i>Neutre</i>	<b>50</b>	<i>Neutre</i>	<b>50</b>	<i>Neutre</i>	<b>50</b>
<b>122</b> Bâti entre 11 <...> 28 m	<i>Moyen</i>	<b>500</b>	<i>Moyen</i>	<b>500</b>	<i>Moyen</i>	<b>500</b>	<i>Moyen</i>	<b>500</b>	<i>Neutre</i>	<b>50</b>
<b>123</b> Bâti supérieur à 28 m	<i>Fort</i>	<b>1 000</b>	<i>Fort</i>	<b>1 000</b>	<i>Fort</i>	<b>1 000</b>	<i>Fort</i>	<b>1 000</b>	<i>Faible</i>	<b>100</b>
<b>131</b> Urbain diffus	<i>Faible</i>	<b>100</b>	<i>Faible</i>	<b>100</b>	<i>Faible</i>	<b>100</b>	<i>Habitat</i>	<b>1</b>	<i>Moyen</i>	<b>500</b>
<b>132</b> Urbain continu	<i>Fort</i>	<b>1 000</b>	<i>Fort</i>	<b>1 000</b>	<i>Fort</i>	<b>1 000</b>	<i>Moyen</i>	<b>500</b>	<i>Fort</i>	<b>1 000</b>
<b>133</b> Zones industrielles	<i>Neutre</i>	<b>50</b>	<i>Neutre</i>	<b>50</b>	<i>Neutre</i>	<b>50</b>	<i>Neutre</i>	<b>50</b>	<i>Neutre</i>	<b>50</b>
<b>52</b> Ouvert non-urbain	<i>Faible</i>	<b>100</b>	<i>Chasse</i>	<b>1</b>	<i>H/C</i>	<b>1</b>	<i>Chasse</i>	<b>1</b>	<i>Chasse</i>	<b>1</b>
<b>61</b> Cultures			<i>Bon</i>	<b>10</b>	<i>Bon</i>	<b>10</b>				

### Annexe 3 – Bibliographie de la création de la base de données Avifaune

Archives BFC. (s.d.). Etat initial du site et de son environnement. *Dossier de demande de dérogation*.

[https://www.bourgogne-franche-comte.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/dossier\\_demande\\_derogation\\_230818\\_pg201\\_300\\_cle07361b.pdf](https://www.bourgogne-franche-comte.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/dossier_demande_derogation_230818_pg201_300_cle07361b.pdf)

Barbet-Massin, M., Thuiller, W., & Jiguet, F. (2012). *The fate of European breeding birds under climate, land- use and dispersal scenarios*.

B.E.T Barussaud Expertise Territoriale. (2021). Prospections Faune/Flore/Zones humides Coordination de l'étude. *Evaluation des incidences du projet d'extension*.

<https://www.morbihan.gouv.fr/content/download/58443/413370/file/11%20Annexe%201%20Diagnostic%20C3%A9cologique.pdf>

Bonier, F.; Martin, P. R.; Wingfield, J. C. (2007). Urban birds have broader environmental tolerance. *Biology Letters*, 3(6), 670–673.

Burchell, M. R. (2012). Influence of Patch Size and Shape on Occupancy by Shrubland Birds. *The Condor*, 114(2), 268-278.

Clergeau, P., Sauvage, A., Lemoine, A., Marchand, J.-P., Dubs, F., & Mennechez, G. (1997). Quels oiseaux dans la ville ? Une étude pluridisciplinaire d'un même gradient urbain. *Les Annales de la recherche urbaine*, 74(1), 119-130.

Forman, R. T. T., & Alexander, L. E. (1998). Roads and Their Major Ecological Effects. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 29(1), 207-231.

Frey, C. (s. d.). *Avifaune et milieu urbain : Bilan et perspectives de trois années d'inventaires en quartiers denses et moins denses à Lyon – Villeurbanne*. 11.

Guingand, S. (2015). Recherche bibliographique sur la capacité de dispersion des oiseaux afin de modéliser le paysage et sa connectivité à l'aide de la théorie des graphes. *Sciences de l'environnement*. Hal-02602166

Harris, R. J., & Reed, J. M. (2002). Behavioral barriers to non-migratory movements of birds. *Annales Zoologici Fennici*, 39(4), 275-290.

Johnson, D. H., & Igl, L. D. (2001). Area Requirements of Grassland Birds: A Regional Perspective. *The Auk*, 118(1), 24-34.

Ministère National d'Histoire Naturelle. (s.d.). Fiches projet. *Fiches INPN "Cahiers d'Habitat « Oiseaux » - MEEDDAT- MNHN "*.

Ex : <https://inpn.mnhn.fr/docs/cahab/fiches/Coucou-gris.pdf>

Mitchell, G. W., Warkentin, I. G., & Taylor, P. D. (2009). Movement of Juvenile Songbirds in Harvested Boreal Forest: Assessing Residency Time and Landscape Connectivity. *Avian Conservation and Ecology*, 4(1), art5.

MSE Les Dunes. (2014). Etude d'impact sur l'Environnement et la Santé. Annexe 3 : Volet écologique initial 10 éoliennes.

<https://www.aisne.gouv.fr/content/download/17270/119666/file/3-%20Annexe%20III%20-Etude%20%20%C3%A9cologique%20initiale.pdf>

Paradis, E., Baillie, S. R., Sutherland, W. J., & Gregory, R. D. (1998). Patterns of natal and breeding dispersal in birds. *Journal of Animal Ecology*, 67(4), 518-536.

Scherrer, B. (1970). Migration et autres types de déplacements de la mésange noire *Parus ater* en transit au col de la Golèze. II. *La terre et la Vie*, 2, 257-313.

Schlossberg, S., & King, D. I. (2007). Ecology and management of scrub-shrub birds in New England: a comprehensive review. *Natural Resources Conservation Service, Beltsville, Maryland, USA*.

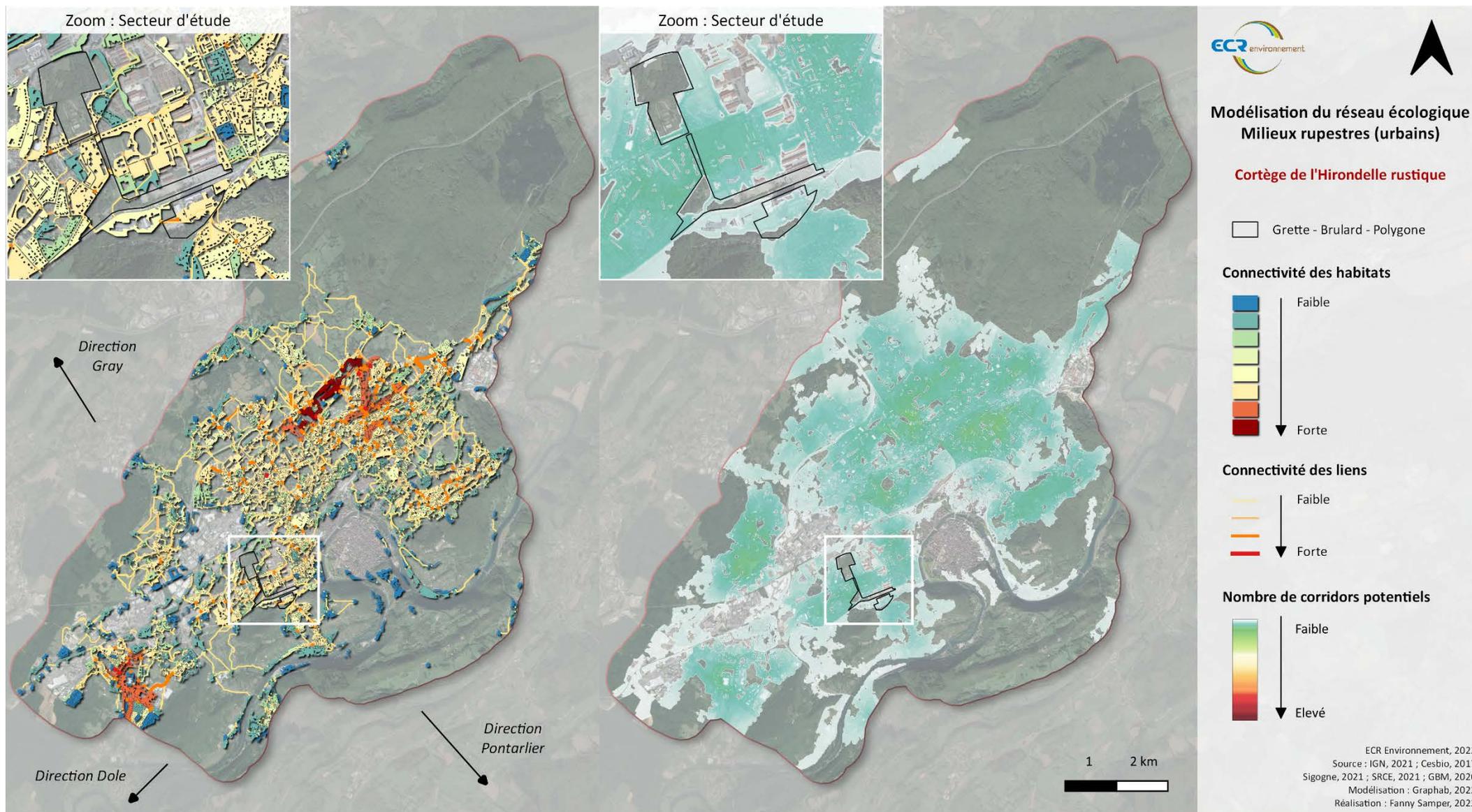
Sekercioglu, C. H., Loarie, S. R., Oviedo Brenes, F., Ehrlich, P. R., & Daily, G. C. (2007). Persistence of Forest Birds in the Costa Rican Agricultural Countryside. *Conservation Biology*, 21(2), 482-494.

Sordello et.al. (2013). Synthèses bibliographiques sur les traits de vie de 39 espèces proposées pour la cohérence nationale de la Trame verte et bleue relatifs à leurs déplacements et besoins de continuités écologique. *Rapport SPN 2013-24*.

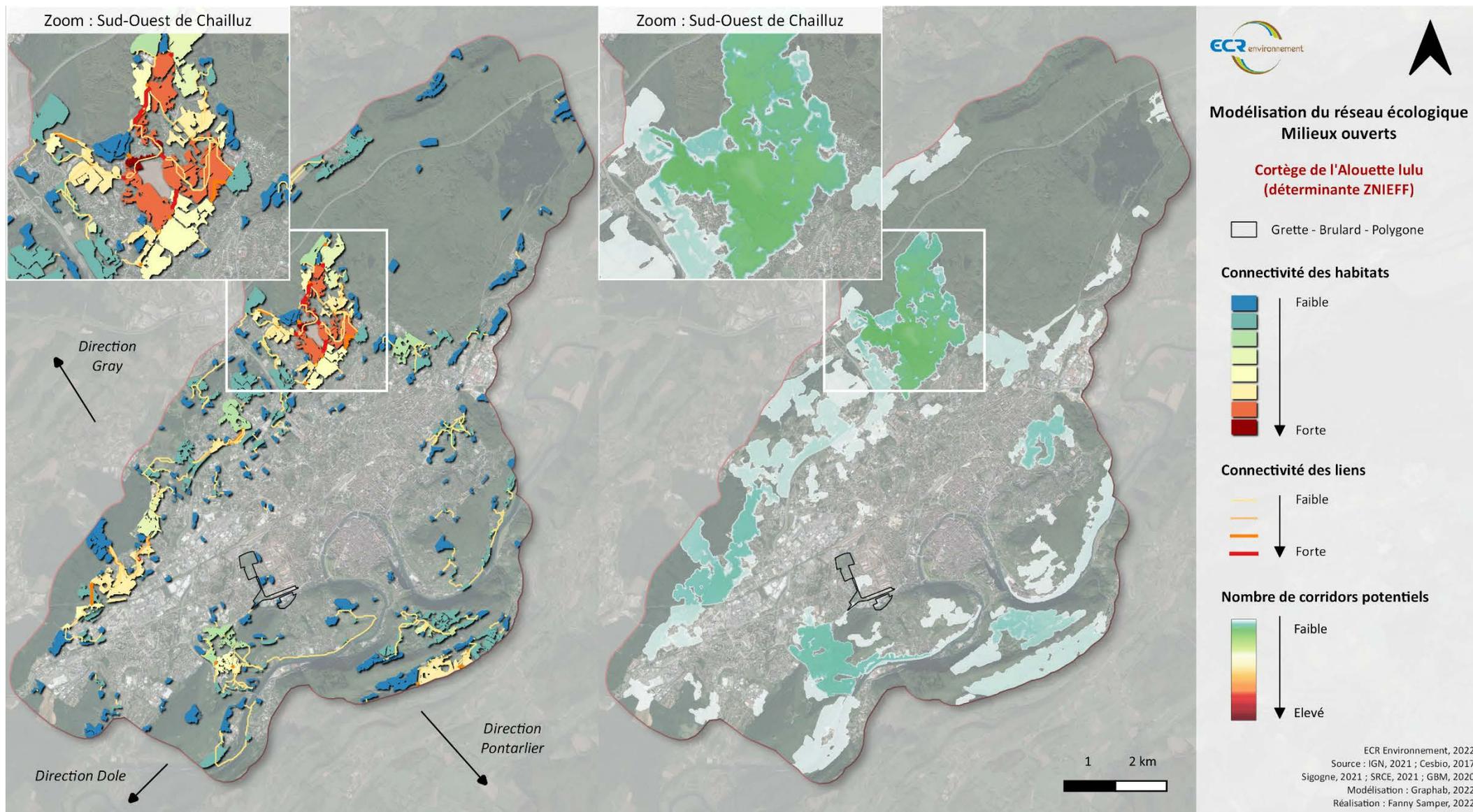
SRCE Picardie. (2013). Méthodologie retenue pour l'identification des composantes de la Trame verte et bleue du SRCE de Picardie.

St. Clair, C. C. (2003). Comparative Permeability of Roads, Rivers, and Meadows to Songbirds in Banff National Park. *Conservation Biology*, 17(4), 1151-1160.

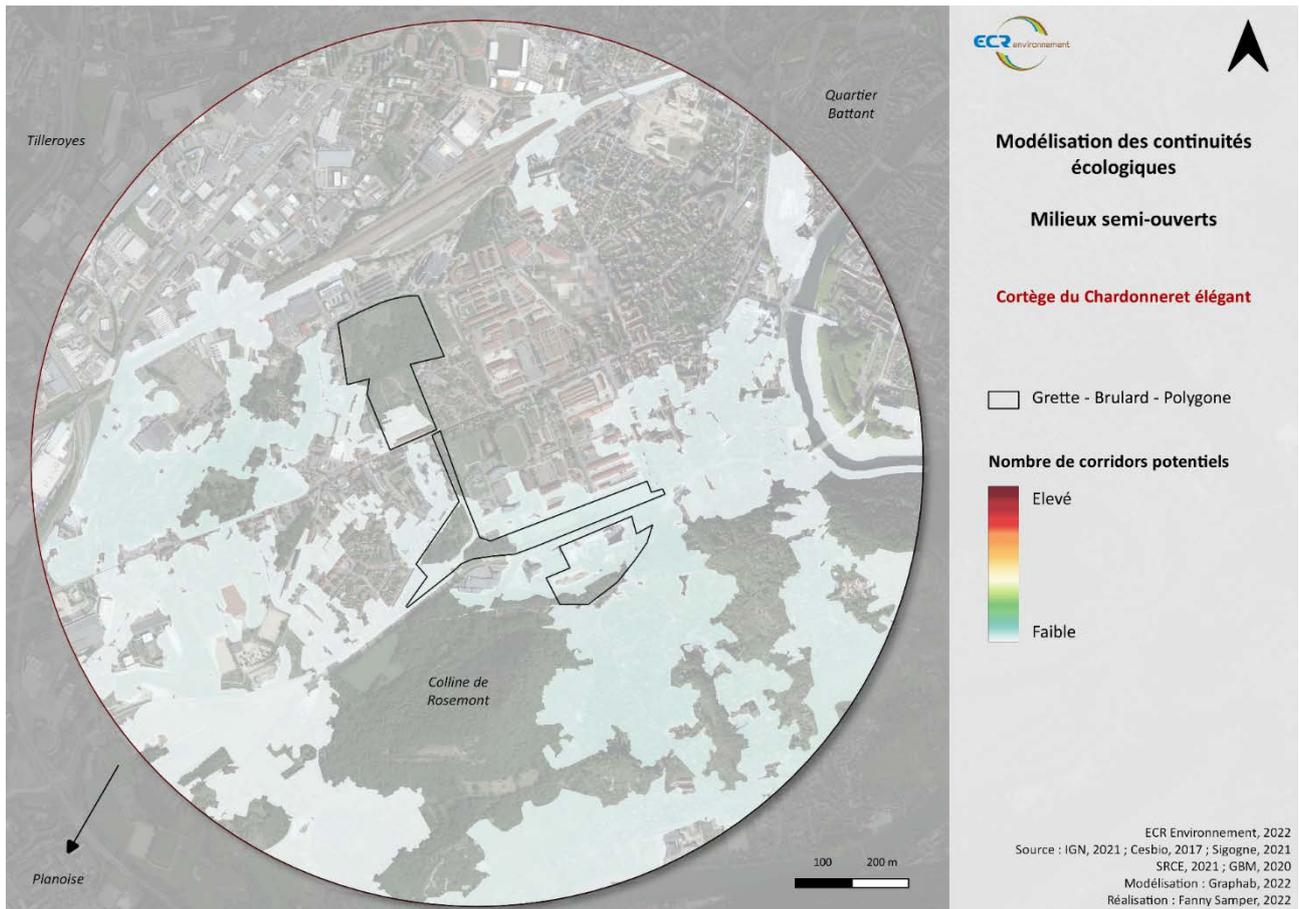
## Annexe 4 - Carte du réseau écologique des oiseaux urbains à l'échelle globale



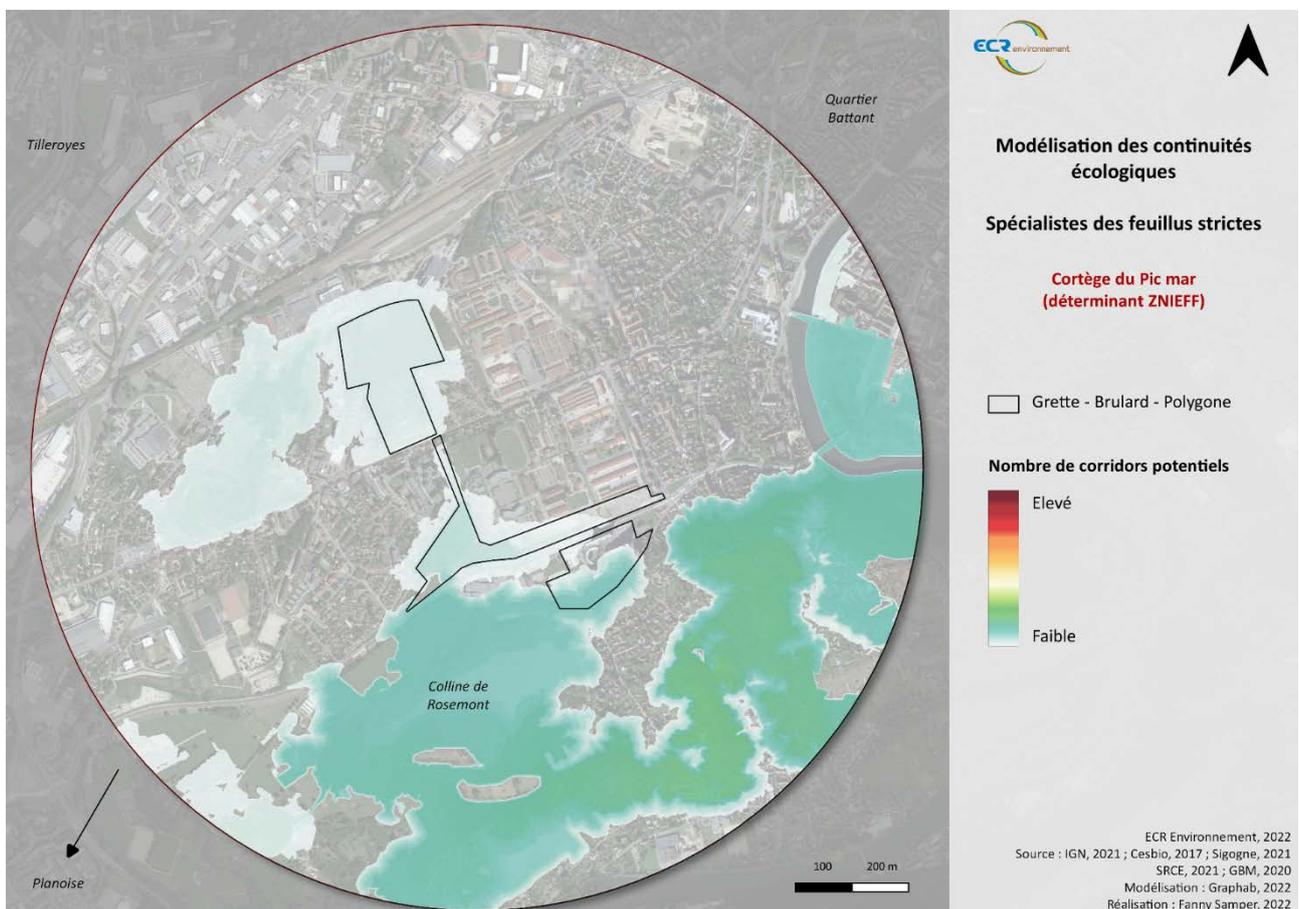
## Annexe 5 – Carte du réseau écologique des oiseaux des milieux ouverts, à l'échelle globale



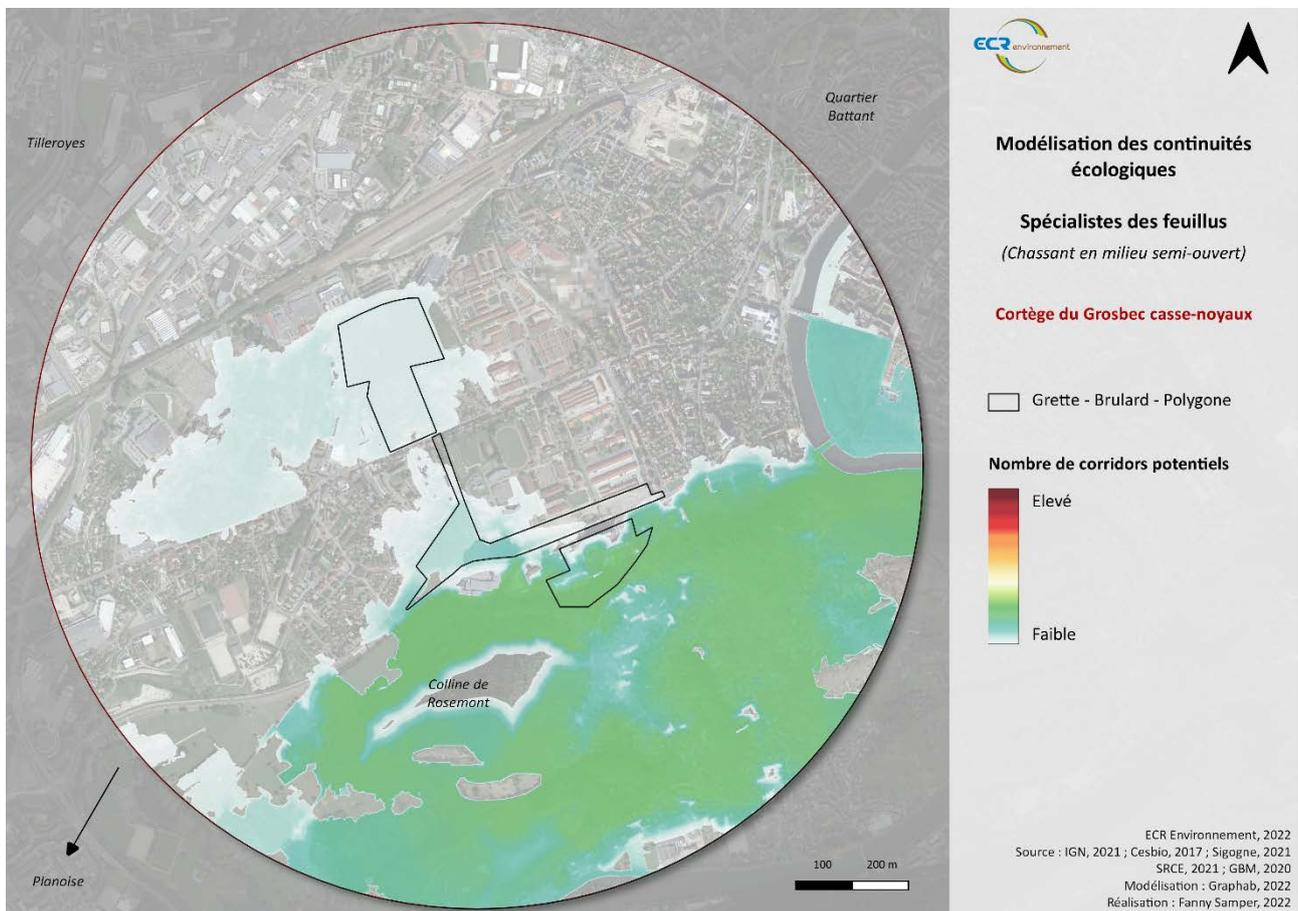
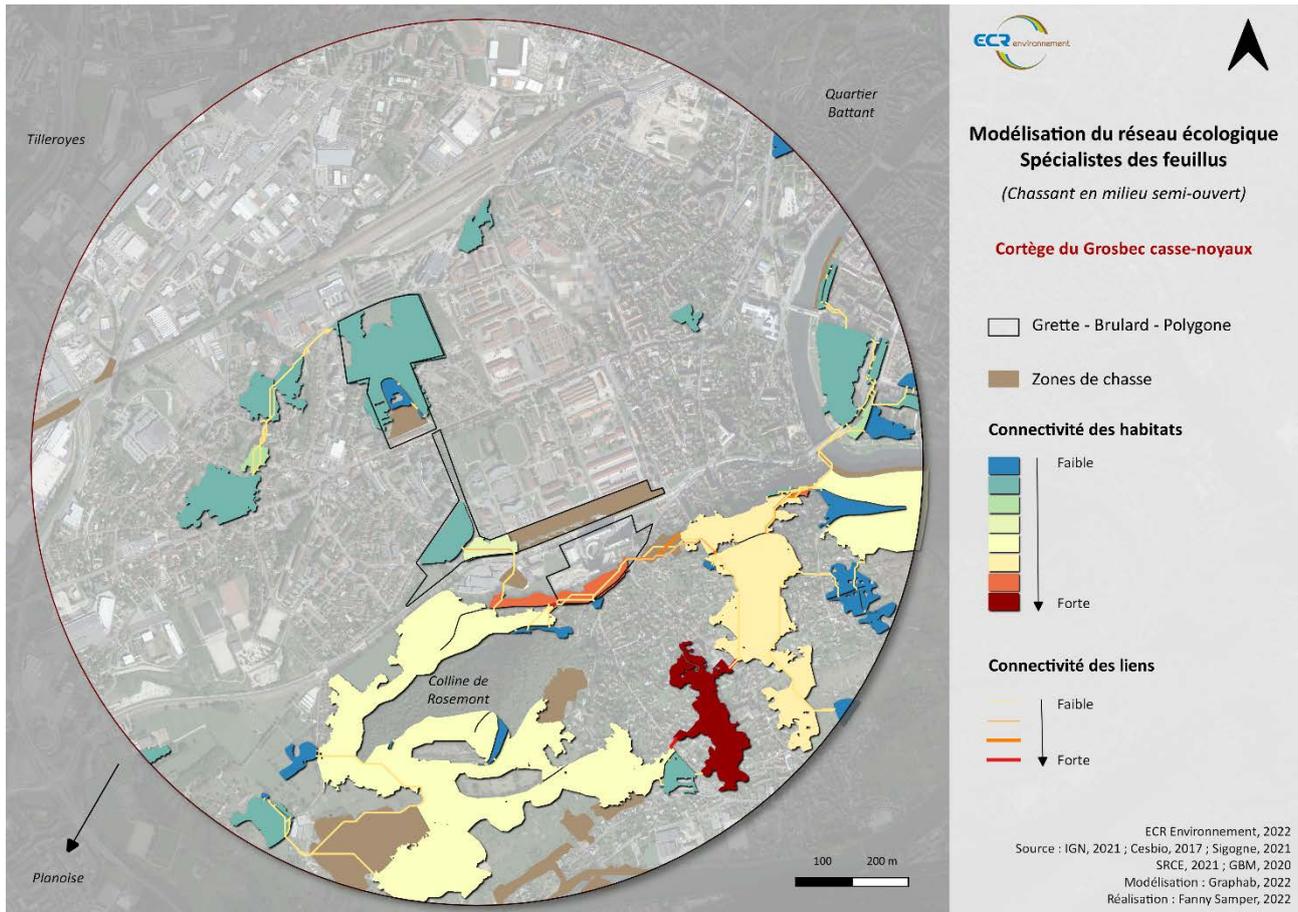
**Annexe 6 – Carte des corridors potentiels des oiseaux des milieux semi-ouverts à l'échelle locale**



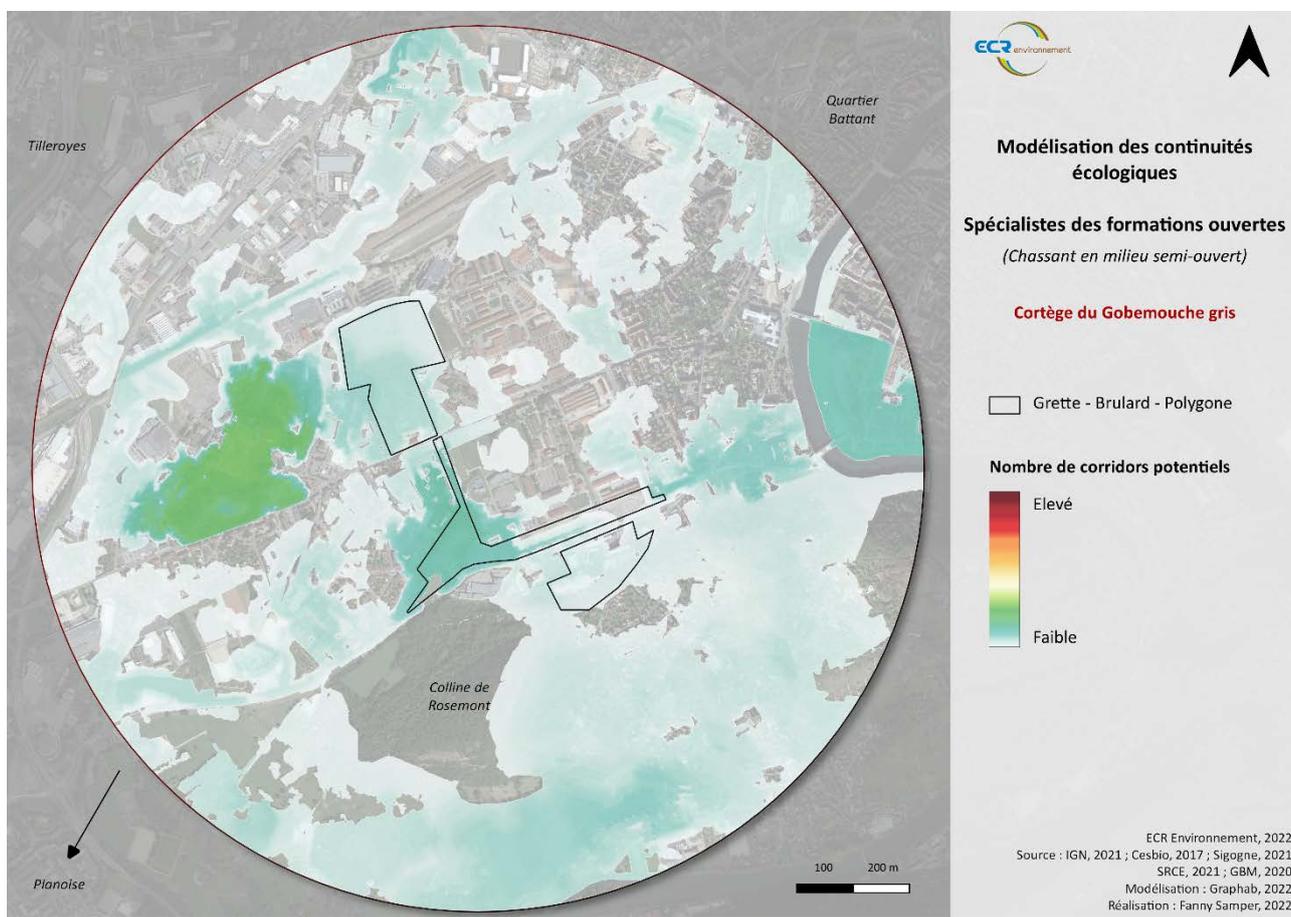
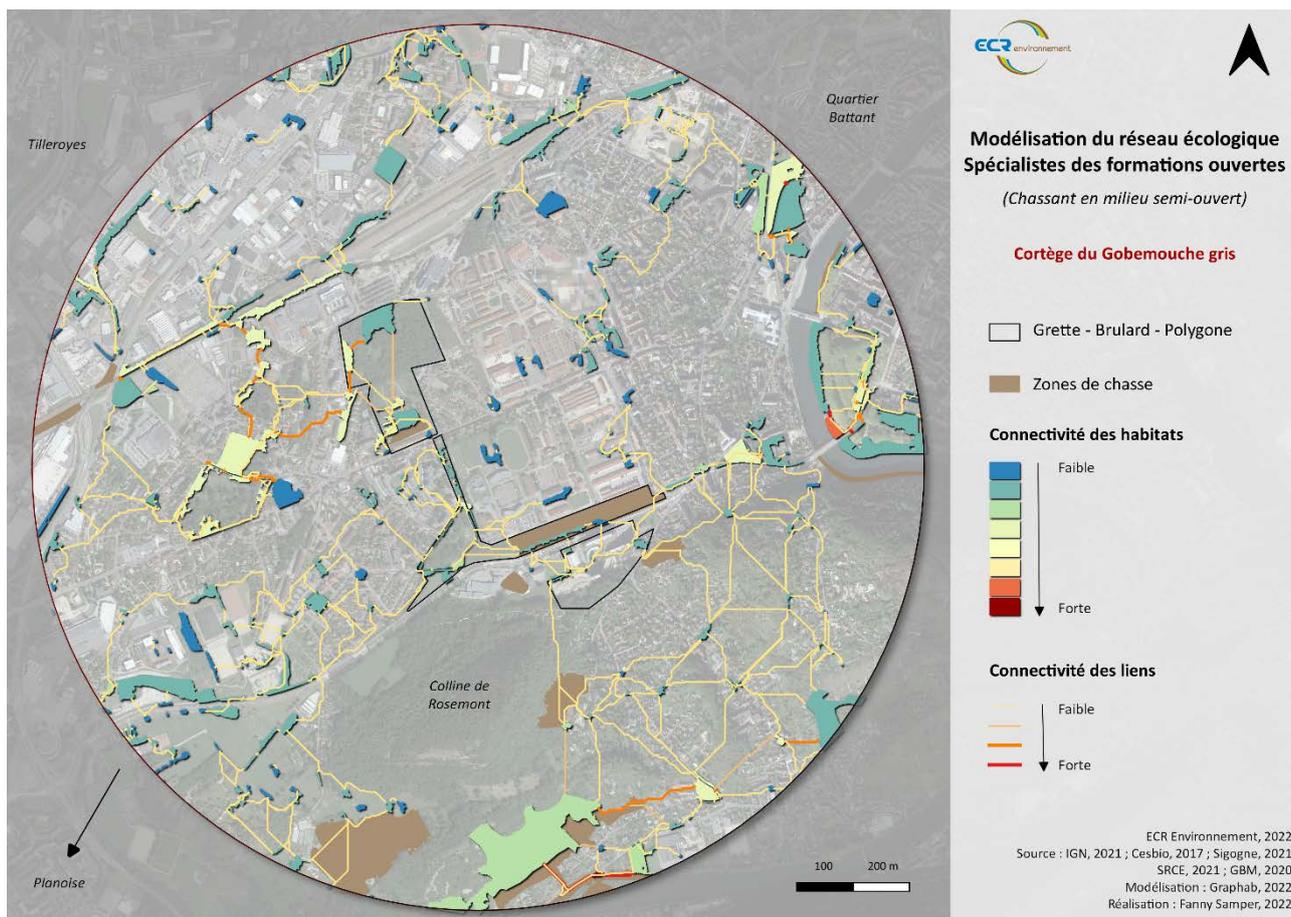
**Annexe 7 – Carte des corridors potentiels du cortège du Pic mar, à l'échelle locale**



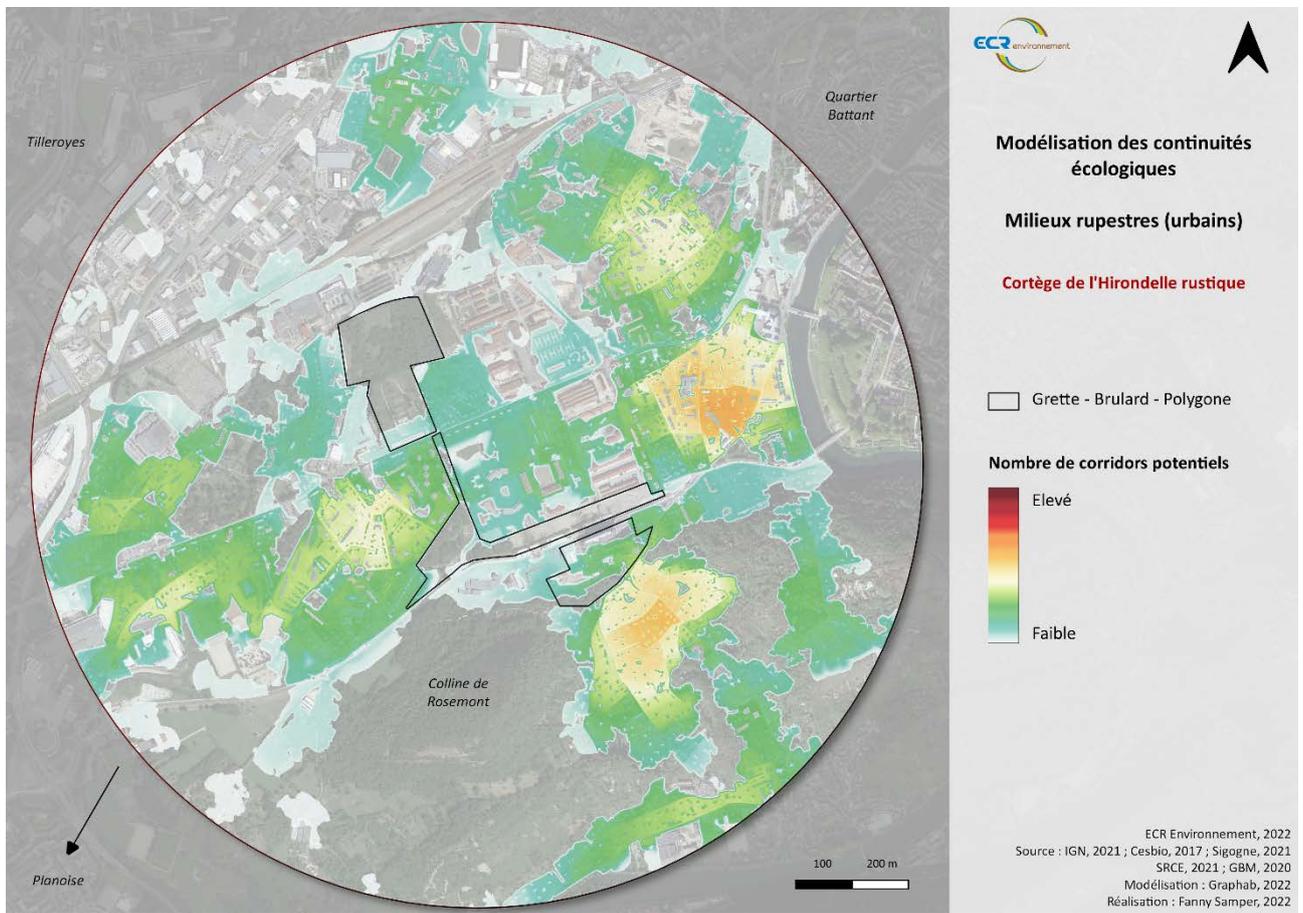
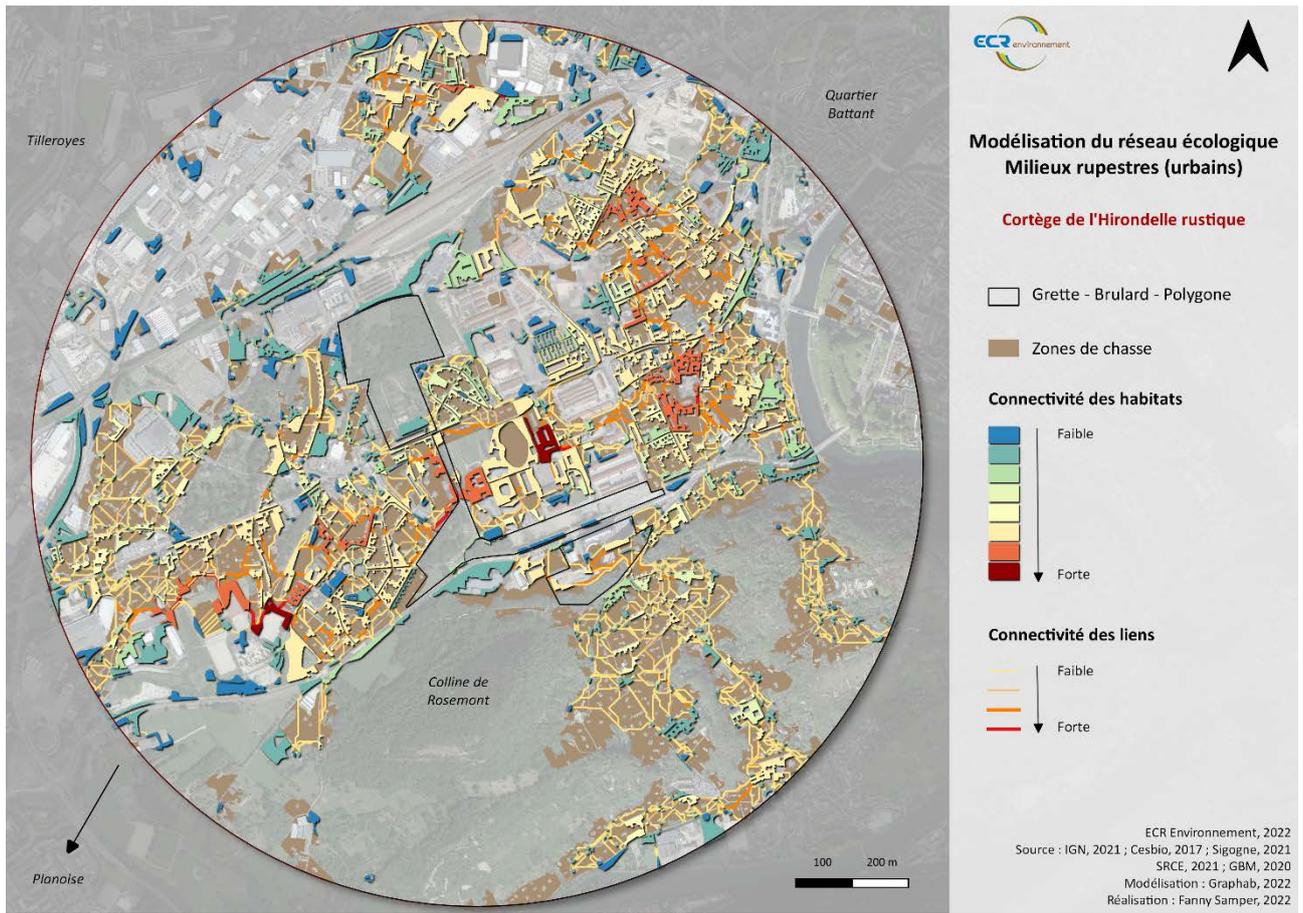
**Annexe 8 - Modélisation du réseau écologique des oiseaux spécialistes des feuillus, chassant en milieu semi-ouvert, à l'échelle locale**



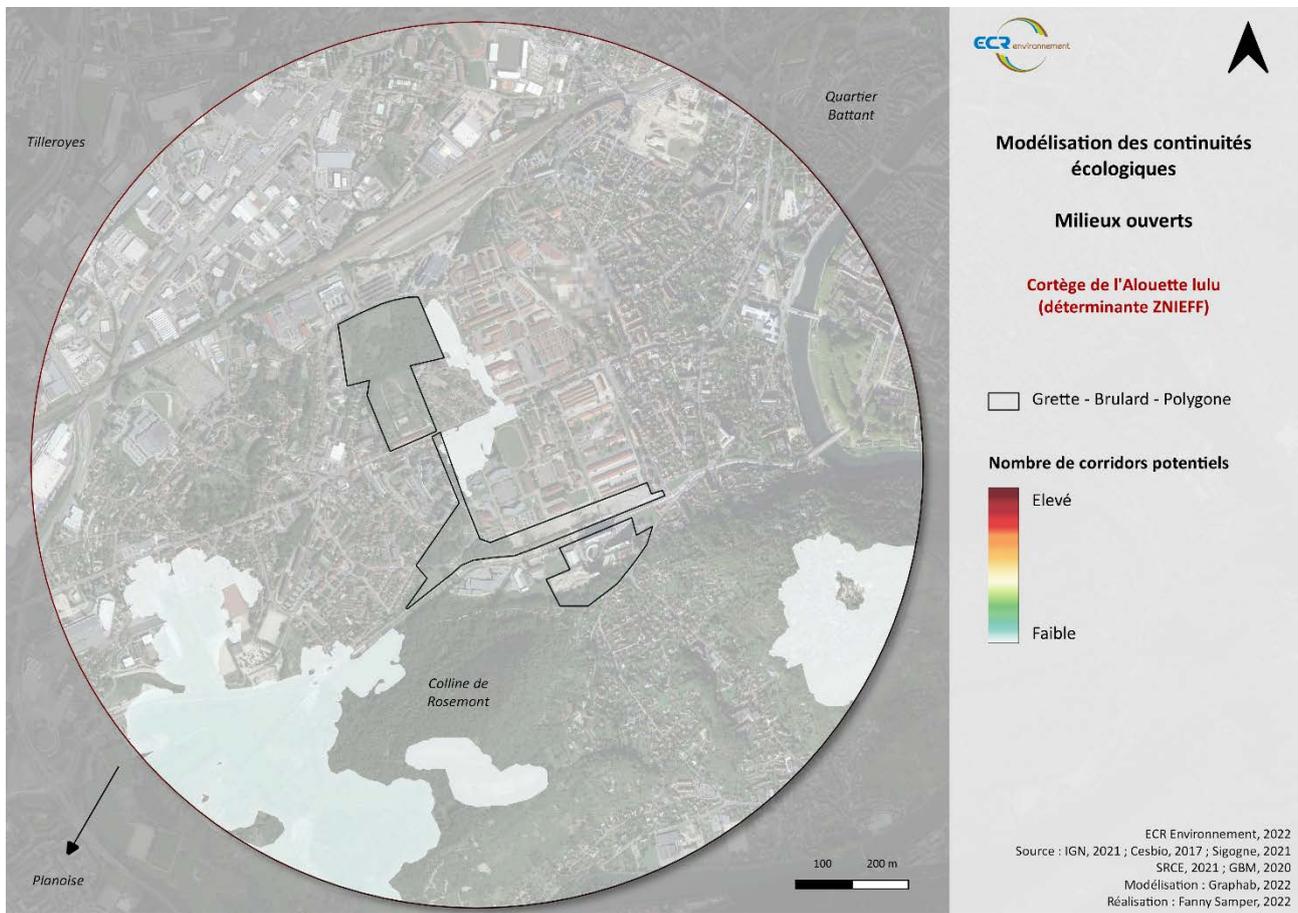
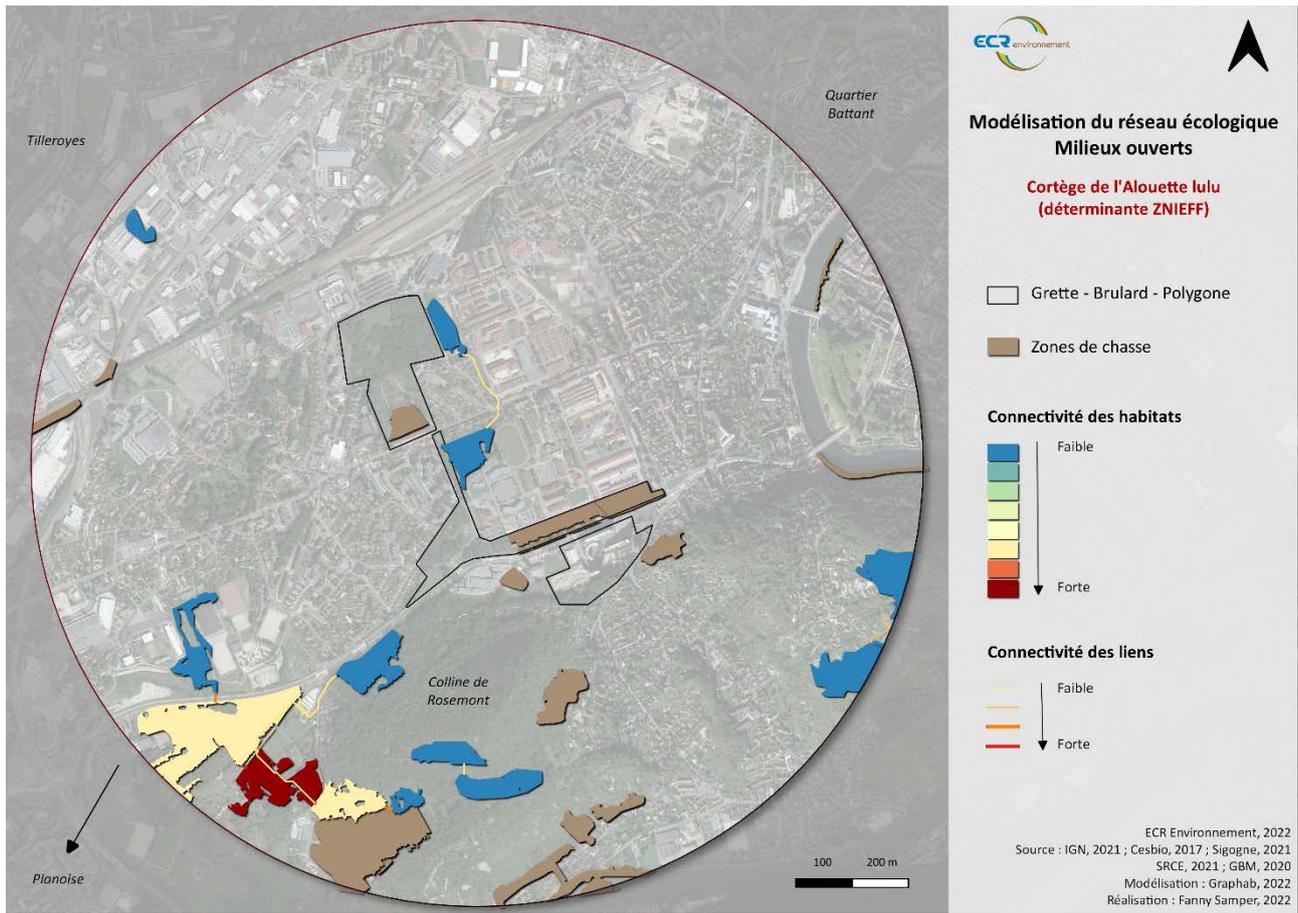
**Annexe 9 - Modélisation du réseau écologique des oiseaux spécialistes des formations ouvertes, chassant en milieu semi-ouvert, à l'échelle locale**



# Annexe 10 - Modélisation du réseau écologique des oiseaux urbains, à l'échelle locale



Annexe 11 - Modélisation du réseau écologique des oiseaux des milieux ouverts, à l'échelle locale



Annexe 12 - Valeurs cumulées de BC par cortège pour chaque habitat de la zone

Habitats	Valeur BC des taches par cortège								Total
	Forestier	Pic mar	Pic cendré	Feuillus (chassant en milieu semi-ouvert)	Torcol fourmilier	Formations ouvertes (chassant en milieu semi-ouvert)	Semi-ouvert	Urbain	
G5.2 : Petits bois anthropiques de feuillus caducifoliés	0,018	-	-	-	0,095	0	-	-	0,113
F3.11 : Fourrés médio-européens sur sols riches	0,150	0	0,008	0	-	-	-	-	0,158
X24 : Jardins domestiques des villes et des centres-villes	0,150	0	0,008	0	-	-	-	-	0,158
H5.6 : Zones piétinées	0	-	-	-	0,002	0,002	-	0,222	0,227
FA.1 : Haies d'espèces non indigènes	0	-	-	-	0,002	0,002	0,234	0,222	0,460
G1.A : Boisements mésotrophes et eutrophes [...]	0,036	0,009	0,013	0,745	0,030	0,012	0	-	0,846
G5.1 : Alignements d'arbres	0,350	0	0	0,043	0	0,004	0,234	0,222	0,853
E5.12 : Communautés d'espèces rudérales [...]	1,000	0,001	0,001	0,043	0,074	0,058	0,234	0	1,411
X22 : Petits jardins non domestiques des centres-villes	1,000	0,009	0,013	0,745	0,107	0,031	0,234	0,090	2,230
<b>Total</b>	<b>2,703</b>	<b>0,020</b>	<b>0,043</b>	<b>1,577</b>	<b>0,310</b>	<b>0,110</b>	<b>0,936</b>	<b>0,756</b>	<b>6,455</b>