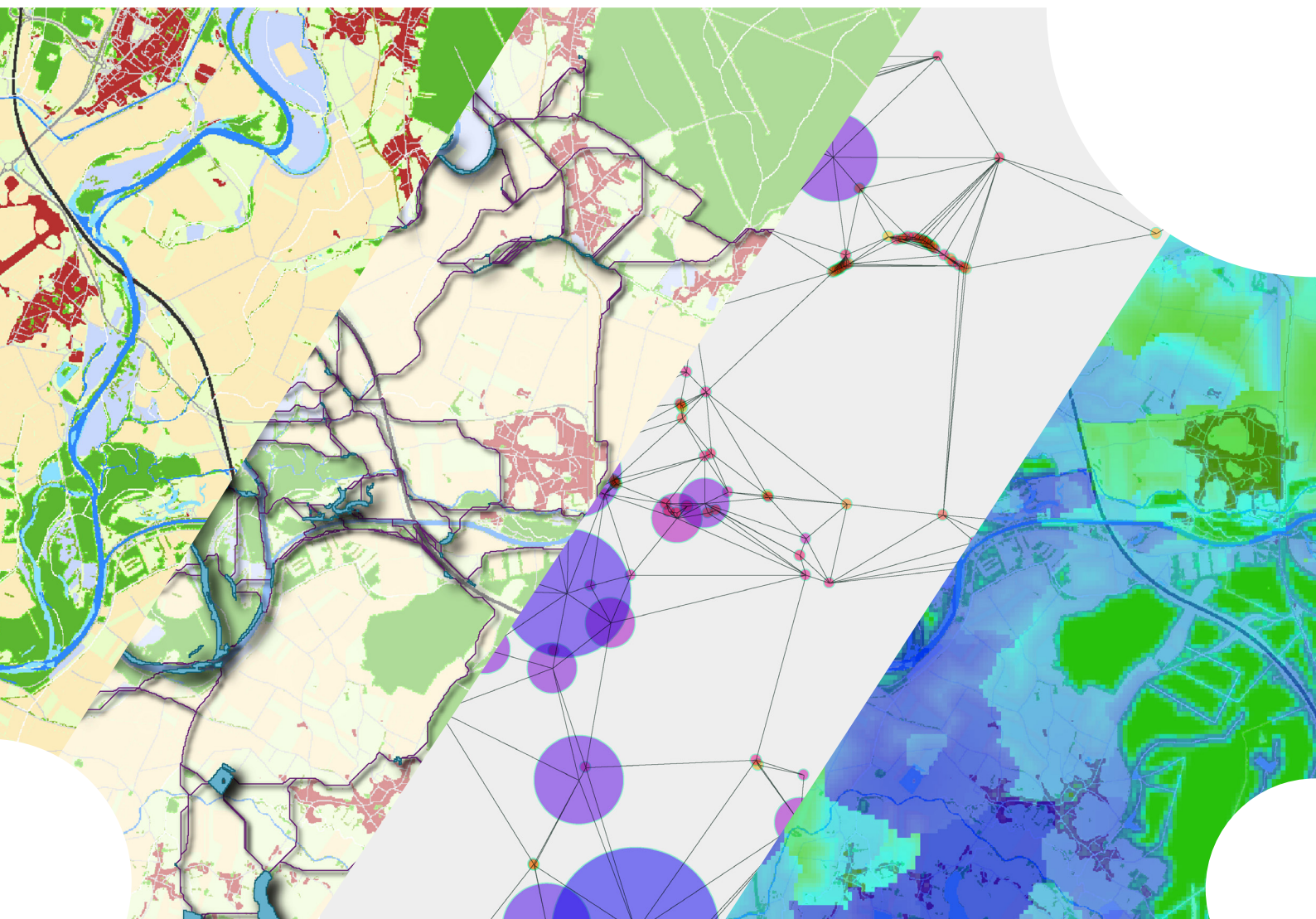


# Graphab

## 14 RÉALISATIONS À DÉCOUVRIR



Coordinateurs du livret :  
Xavier GIRARDET et Céline CLAUZEL



Coordinateurs du livret :  
Xavier GIRARDET <sup>a</sup> et Céline CLAUZEL <sup>b</sup>

Janvier 2018

<sup>a</sup>Laboratoire ThéMA  
UFR Lettres SHS, 32 rue Mégevand  
25030 Besançon Cedex

<sup>b</sup>LADYSS  
Université Paris Diderot, 5 rue Thomas Mann  
75013 Paris Cedex



Cette oeuvre est sous licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Partage dans les Mêmes Conditions 4.0 International. Pour accéder à une copie de cette licence, merci de vous rendre à l'adresse suivante <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> ou envoyez un courrier à Creative Commons, 444 Castro Street, Suite 900, Mountain View, California, 94041, USA.

---

# S o m m a i r e

---

|                        |   |
|------------------------|---|
| Introduction . . . . . | 1 |
|------------------------|---|

## Conservation

|                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Le tissu naturel urbain de la ville de Strasbourg ou comment modéliser la<br>reconnexion des parcs de la ville grâce à l'Ecureuil et aux Noctules . . . . .  | 7  |
| Définir les trames vertes et bleues d'un territoire à l'aide de Graphab. Retours<br>d'expérience de deux communautés d'agglomération franciliennes . . . . . | 10 |
| Quantifier la contribution des espaces verts d'entreprise aux connectivités<br>écologiques d'Île-de-France . . . . .                                         | 13 |
| Intégration de sites industriels dans les trames vertes et bleues . . . . .                                                                                  | 16 |
| Apport de la modélisation pour la prise en compte des réseaux écologiques à<br>l'échelle d'un site . . . . .                                                 | 19 |
| Définir un zonage à partir du réseau de prairies pour le suivi des populations de<br>campagnols terrestres . . . . .                                         | 22 |

## Restauration

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Intégration de la connectivité régionale dans la restauration de mares : approche<br>combinée modélisation/dire d'experts . . . . .       | 25 |
| Restauration de la connectivité écologique : proposition méthodologique pour<br>une localisation optimisée des passages à faune . . . . . | 28 |
| Création et réhabilitation de passages à faune favorables à plusieurs espèces :<br>cas d'étude dans le Grésivaudan . . . . .              | 31 |
| Mesures agro-environnementales : soutenir la lutte contre le campagnol terrestre<br>à l'échelle du paysage . . . . .                      | 34 |

## Evaluation

|                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Evaluation de l'impact potentiel d'une infrastructure sur la connectivité des mares . .                                                                                     | 37 |
| Prise en compte des réseaux écologiques dans le choix du tracé d'une<br>infrastructure de transport . . . . .                                                               | 40 |
| La définition des zones de collisions entre un réseau routier et des réseaux<br>écologiques : application à deux départements . . . . .                                     | 43 |
| Mesurer et spatialiser les impacts des formes de croissance urbaine sur les<br>réseaux écologiques pour guider des politiques d'aménagement et de<br>conservation . . . . . | 46 |





# Introduction

Les ressources naturelles sont soumises à une pression constante exercée par les activités humaines, par le biais de processus tels que l'étalement urbain, la densification des réseaux de transport ou l'intensification agricole. Ces processus contribuent à diminuer et fragmenter les habitats naturels (Forman, 1995), rendant plus difficiles les déplacements des espèces animales entre les taches d'habitats. Ces flux biologiques assurent la diversité génétique, permettant ainsi aux populations de conserver leur capacité de survie face aux nombreux stress environnementaux. Dans ce contexte, la connectivité paysagère est considérée comme un facteur-clé de la viabilité des populations. Elle est définie comme la réponse fonctionnelle d'une espèce aux conditions offertes par les structures paysagères, en termes de déplacements individuels (Taylor *et al.*, 2006).

La nécessité de prendre en compte les flux biologiques entre les principales sources de biodiversité s'est traduite en aménagement du territoire par l'émergence du concept de « réseaux écologiques ». En France, ce concept se manifeste surtout par la loi Grenelle 1, intégrant les trames vertes et bleues dans les politiques d'aménagement du territoire (Cormier *et al.*, 2010). Le réseau écologique est ici considéré comme l'ensemble spatial formé par les cœurs de biodiversité reliés par des zones de connexion biologique (Opdam *et al.*, 2006). Ce concept est donc intimement lié à la notion de connectivité paysagère, le réseau symbolisant la configuration spatiale souhaitable pour le maintien des flux biologiques alors que la connectivité est une propriété mesurable en un lieu donné, qu'un réseau soit présent ou non.

Depuis une dizaine d'années, les graphes paysagers sont une des approches les plus utilisées pour modéliser les réseaux écologiques et mesurer la connectivité paysagère dans une perspective opérationnelle (Urban *et al.*, 2009). Un graphe paysager est constitué d'un ensemble de nœuds (les taches d'habitat pour une espèce ou un groupe d'espèces) connectés par des liens représentant les chemins de déplacement potentiels. Les graphes paysagers ont l'avantage de concilier une certaine simplicité, comparés aux modèles spatialement explicites comme les simulations multi-agents, et une bonne capacité à représenter le potentiel fonctionnel des structures paysagères. Par leur simplicité de construction, ces méthodes ont pour vocation de fournir

un appui à l'aménagement et la gestion paysagère, dans une logique de préservation des continuités écologiques.

## La construction des graphes paysagers

La mise en œuvre des graphes paysagers comporte plusieurs étapes, de la définition de la carte d'occupation du sol au calcul de métriques de connectivité. À chacune de ces étapes, de nombreux choix sont à effectuer selon le contexte de l'analyse.

### Constitution de la carte d'occupation du sol et définition des nœuds

Les données initiales sont constituées par une carte d'occupation du sol regroupant différentes catégories paysagères (Figure 1a) en fonction de leur aspect plus ou moins favorable pour l'espèce ou le groupe d'espèces étudiés : de l'habitat préférentiel (le plus favorable) aux barrières et éléments répulsifs (les plus défavorables) en passant par des éléments intermédiaires. Ces connaissances sont acquises par le biais de la littérature scientifique et/ou par entretien avec des experts naturalistes. La cartographie des éléments du paysage peut reposer sur plusieurs types de données : des cartes ou bases de données existantes, comme par exemple la BD TOPO de l'IGN en France ; un traitement d'images aériennes telles que les orthophotographies ou les images satellites.

Chaque catégorie d'occupation du sol est associée à une valeur de résistance, représentant la difficulté de franchissement par les individus. L'habitat préférentiel et les autres catégories favorisant les déplacements ont la valeur de résistance minimale. À l'inverse, les éléments les plus difficiles à traverser ont une valeur maximale.

Les nœuds correspondent aux taches d'habitat préférentiel (Figure 1b), le terme « tache » traduit de l'anglais « *patch* » étant compris comme une entité surfacique différenciée de son contexte paysager. En pratique, ces taches peuvent être définies comme les agrégats de cellules adjacentes appartenant à la catégorie d'habitat préférentiel. Elles sont associées à un indicateur de potentiel démographique (appelé « capacité ») traduisant la qualité ou le potentiel de la tache à accueillir une population. Par défaut, cet indicateur est la surface de la tache, puisque le potentiel démographique dépend en général de la quantité de ressources, pouvant approximativement être assimilée à une valeur

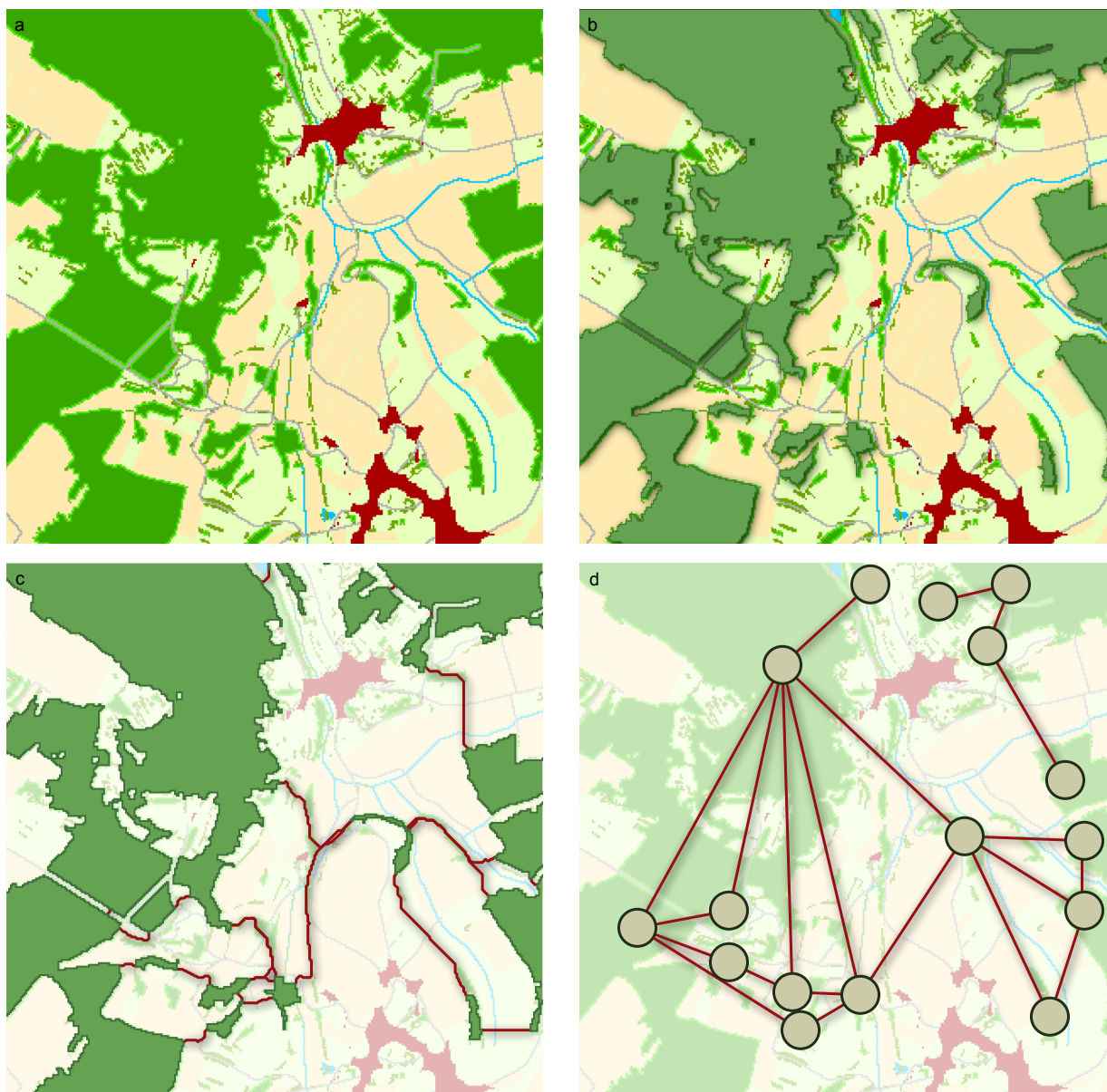


Figure 1 : A partir d'une carte d'occupation du sol (a), identification des taches d'habitat d'une espèce forestière (b) et visualisations réaliste (c) et topologique (d) d'un graphe paysager.

proportionnelle à la surface. Dans les cas d'habitat composite (comme les habitats aquatiques et terrestres des amphibiens), cet indicateur peut être défini par la surface d'autres types d'occupation du sol.

### Définition des liens

Selon la conception la plus fréquente des graphes paysagers, un lien est créé entre deux taches d'habitat si on suppose que les individus sont capables de traverser l'espace qui sépare ces taches, c'est-à-dire si le coût de déplacement est jugé inférieur à un certain seuil (Figure 1c). En amont de ce diagnostic, la mise en place des liens potentiels nécessite deux choix fondamentaux : 1) leur topologie, 2) leur pondération.

1) Topologie des liens. Il existe deux grandes possibilités : soit tous les liens entre toutes les taches sont pris en compte, ce qui correspond à une topologie dite complète ; soit seuls les liens formant un graphe planaire minimal (Fall *et al.*, 2007) sont pris en compte. Dans la

topologie complète, les liens peuvent se superposer. La topologie planaire n'autorise pas ces superpositions et peut être considérée comme une approximation de la topologie complète (Galpern *et al.*, 2011), accélérant les calculs mais au prix d'une certaine simplification.

2) La pondération des liens consiste à leur attribuer une valeur d'impédance. Cette valeur représente le coût de déplacement entre les deux taches, exprimée en distance euclidienne ou en distance de moindre coût. Il est communément admis que les distances de moindre coût, tenant compte de l'hétérogénéité du paysage, sont plus pertinentes pour analyser les déplacements des individus. Dans ce cas, la pondération des liens est directement liée aux valeurs de résistance attribuées à chaque type d'occupation du sol.

Une fois les liens potentiels définis, il reste à finaliser le graphe en choisissant quels sont les liens « valides », c'est-à-dire considérés comme des flux possibles pour l'espèce. De façon classique, il s'agit de créer un graphe

seuillé consistant à ne valider que les liens dont le poids est inférieur ou égal à un seuil représentant la distance de dispersion maximale de l'espèce.

## Calcul des métriques de connectivité

Les étapes précédentes ont conduit à la mise en place d'un graphe paysager, qui représente de façon simplifiée l'espace de déplacement disponible pour une espèce. Cette représentation est le support de calcul de métriques de connectivité destinées à caractériser des propriétés du graphe. Ces métriques, provenant de la théorie des graphes ou de l'écologie, sont nombreuses et calculables à plusieurs niveaux différents (taches, liens, composantes, graphe entier) (Galpern *et al.*, 2011) (Figure 2). Par ailleurs, ces métriques peuvent être distinguées selon leur type de calcul : soit strictement topologique, soit intégrant la pondération des liens et des nœuds, respectivement les distances inter-taches et la capacité des taches (Rayfield *et al.*, 2011).

Nous présentons ici seulement les métriques utilisées dans les études de cas. Elles sont regroupées en catégorie en fonction de leur niveau d'application. Pour plus d'informations sur leur mode de calcul (formule par exemple) ou sur les autres métriques, se référer à la [notice Graphab](#).

### Métrique globale pondérée

La **Probabilité de connectivité (PC)** (Saura et Pascual-Hortal, 2007) équivaut à la probabilité que deux individus tirés au hasard dans la zone d'étude parviennent à entrer en contact. Il est calculé comme la somme des produits de la capacité de tous les couples de taches pondérées par leur probabilité d'interaction, divisée par le carré de la zone d'étude. La probabilité d'interaction diminue en fonction de la distance entre les deux taches.

### Delta métrique

Une métrique globale, calculée au niveau du graphe entier, peut être utilisée pour qualifier l'importance de chaque tache pour la connectivité globale en utilisant la méthode de retrait itératif des nœuds (*removal method*). La métrique globale est calculée à l'état initial, une tache est retirée du graphe et la métrique globale est recalculée. La différence entre les deux valeurs est implémentée dans la tache retirée, traduisant la perte de connectivité engendrée si cet élément était retiré. Ce calcul est ensuite appliqué à chacune des taches, permettant ainsi de les hiérarchiser en fonction de leur contribution à la connectivité d'ensemble.

Le **Delta-PC (dPC)** correspond au taux de variation entre la valeur de métrique PC (Probabilité de Connectivité) et la valeur PC' représentant la suppression d'un élément.

Le **Delta-PC décomposé** est la décomposition de la valeur de dPC en trois fractions :

**dPCarea** correspond à la variation de PC due à la perte seule de la surface suite à la suppression de la tache focale;

**dPCflux** correspond à la variation due à la perte des interactions entre la tache focale et les autres taches ;

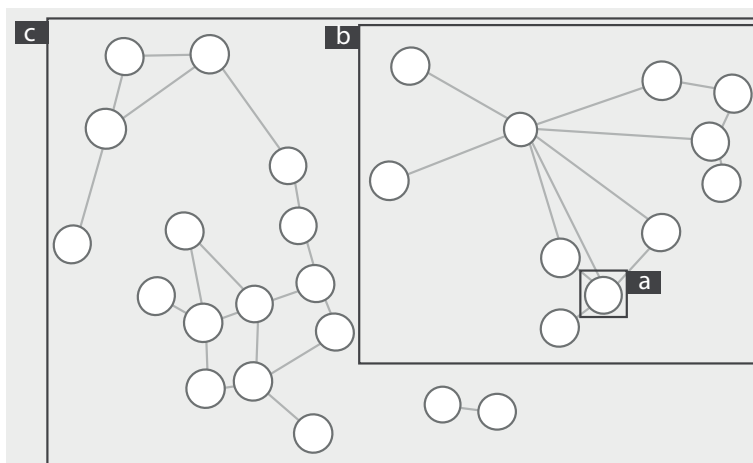


Figure 2 : Niveaux d'analyse des graphes : (a) à l'échelle d'un nœud (local) ; (b) à l'échelle d'une composante ; (c) à l'échelle globale.

**dPCconnector** correspond à la variation due à la modification des chemins reliant les autres taches et passant initialement par la tache focale.

Ces trois fractions permettent d'évaluer les différents types de contribution à la connectivité que peut avoir une tache : la contribution à la connectivité intra-tache, c'est-à-dire la capacité d'habitat (**dPCarea**) ; la contribution aux flux entre taches, c'est-à-dire la capacité d'émettre ou recevoir des individus (**dPCflux**) ; la contribution comme relais (« *stepping-stone* »), c'est-à-dire le rôle de la tache comme relais dans la dispersion (**dPCconnector**).

### Métriques locales pondérées

L'**Indice de centralité intermédiaire (Betweenness Centrality, BC)** évalue dans quelle mesure une tache ou un lien a une position centrale dans le réseau. Il est calculé en faisant la somme des plus courts chemins passant par une tache ou un lien, chaque chemin étant pondéré par le produit des capacités des taches reliées et de leur probabilité d'interaction.

Le **PCflux** évalue la contribution de chaque tache à la connectivité globale mesurée par la Probabilité de connectivité (PC). Il est calculé en faisant la somme des produits de la capacité de la tache focale avec toutes les autres taches, pondérées par leur probabilité d'interaction. Elle équivaut à  $dPCflux + dPCarea$  non divisé par la valeur globale du PC. A noter : cette métrique a été renommée en Flux d'Interaction dans la version 2.2. de Graphab.

### Métriques locales topologiques

Le **Degré d'un nœud** équivaut au nombre de taches connectées à une tache focale.

La **centralité de proximité** est définie comme la distance moyenne de la tache focale vers toutes les autres taches de sa composante.

## Les applications des graphes paysagers

Trois types d'applications des graphes paysagers en aménagement du territoire et conservation de la biodiversité peuvent être identifiés en fonction de leur objectif :

### Conservation

Hiérarchiser l'importance des taches d'habitat et/ou des corridors pour le maintien de la connectivité. Cette application est au cœur des démarches d'identification et d'évaluation des Trames Vertes et bleues.

Etudes de cas :

1. Le tissu naturel urbain de la ville de Strasbourg ou comment modéliser la reconnexion des parcs de la ville grâce à l'Ecureuil et aux Noctules
2. Définir les trames vertes et bleues d'un territoire à l'aide de Graphab. Retours d'expérience de deux communautés d'agglomération franciliennes
3. Quantifier la contribution des espaces verts d'entreprise aux connectivités écologiques d'Île-de-France
4. Intégration de sites industriels dans les trames vertes et bleues
5. Apport de la modélisation pour la prise en compte des réseaux écologiques à l'échelle d'un site
6. Définir un zonage à partir du réseau de prairies pour le suivi des populations de campagnols terrestres

### Restauration

Identifier les meilleurs emplacements (ceux qui augmenteraient le plus la connectivité) pour créer de nouvelles taches d'habitat ou de nouveaux corridors. Cette application trouve notamment son utilité dans la mise en place des mesures compensatoires suite à un aménagement ou dans les mesures de protection à destination d'une espèce menacée (type amphibiens avec la restauration de mares).

Etudes de cas :

7. Intégration de la connectivité régionale dans la restauration de mares : approche combinée modélisation/dires d'experts
8. Restauration de la connectivité écologique : proposition méthodologique pour une localisation optimisée des passages à faune
9. Création et réhabilitation de passages à faune favorables à plusieurs espèces : cas d'étude dans le Grésivaudan
10. Mesures agro-environnementales : soutenir la lutte contre le campagnol terrestre à l'échelle du paysage

### Evaluation

Evaluer l'impact d'un aménagement (construction d'autoroutes ; étalement urbain) ou d'un changement d'occupation du sol (reconversion d'une prairie) sur la connectivité. Ce type d'application trouve son utilité dans les études d'impact pour choisir par exemple un fuseau de passage ou identifier les zones potentiellement les plus affectées.

Etudes de cas :

11. Evaluation de l'impact potentiel d'une infrastructure sur la connectivité des mares
12. Prise en compte des réseaux écologiques dans le choix du tracé d'une infrastructure de transport.
13. La définition des zones de collisions entre un réseau routier et des réseaux écologiques : application à deux départements
14. Spatialiser et mesurer les impacts locaux des formes de croissance urbaine sur les réseaux écologiques pour guider des politiques d'aménagement et de conservation

Il faut noter que ces trois applications visent à favoriser la connectivité mais elles peuvent également être utilisées dans un objectif inverse (réduire ou rompre la connectivité) lorsqu'il s'agit de limiter la propagation d'espèces considérées comme nuisibles (exemple du campagnol terrestre dans l'étude n°10).



Le [logiciel Graphab](#) est distribué en open source sous licence GPL. Son développement a été réalisé au laboratoire THEMA (UMR CNRS) par Gilles Vuidel, Jean-Christophe Foltête, Céline Clauzel, Xavier Girardet, Marc Bourgeois et Yohan Sahraoui. Il a bénéficié de financement entre 2008 et 2015 du programme [ITTECOP](#) du Ministère de la Transition écologique et solidaire.





# 1 Le tissu naturel urbain de la ville de Strasbourg ou comment modéliser la reconnexion des parcs de la ville grâce à l'Ecureuil et aux Noctules

Adine Hector <sup>a\*</sup>  
Aurore Sindt <sup>a,b</sup>  
Eugénie Schwoertz <sup>a,c</sup>

## Problématique

Les villes accueillent continuellement de nouveaux habitants et de nouvelles activités. Progressivement, elles se transforment, soit en se densifiant, soit en repoussant sans cesse leurs limites. Ce processus fragilise peu à peu la biodiversité en isolant les espaces de nature comme les jardins ou les parcs publics. Ces espaces sont pourtant essentiels, tant pour leur potentiel écologique (service de support, de régulation) que pour leur bienfait social lié notamment au bien-être qu'ils procurent.

Après avoir identifié la trame verte et bleue à l'échelle de son territoire afin d'assurer la préservation des continuités d'habitats naturels, l'Eurométropole de Strasbourg a souhaité tisser plus finement son réseau écologique. Ce travail s'est concentré sur la ville de Strasbourg, dont les plus grands espaces de nature, principalement des parcs, sont déconnectés par de nombreuses avenues et des zones de bâti dense. Ainsi, un projet d'identification et de construction d'un tissu naturel urbain (TNU) a été initié en 2014. Ce projet, dont l'objectif est de mettre en

connexion les espaces de nature existants, s'est construit à l'aide de graphes paysagers fondés sur le cheminement d'un animal.

L'objectif de cet article est de présenter une démarche originale pour identifier les liens les plus favorables pour relier les parcs de la ville qui représentent les réservoirs de biodiversité en milieu urbain. Le choix d'espèces arboricoles comme espèce modèle permet d'évaluer l'importance de certaines taches d'habitats à dominante arborée, et de décrire une connectivité potentielle à l'échelle de la Ville de Strasbourg.

## Zone d'étude

Strasbourg est située dans l'une des régions les plus denses et dynamiques d'Europe. La Ville compte 280 680 habitants pour 78,26 km<sup>2</sup> au sein d'une agglomération de presque 500 000 habitants. La Ville a le privilège de posséder, à quelques kilomètres de son centre, un patrimoine forestier d'exception. Trois forêts alluviales rhénanes sont classées en Réserves Naturelles Nationales qui sont de vrais réservoirs de biodiversité à l'échelle suprarégionale. L'eau est omniprésente. Le fleuve du Rhin borde le territoire à l'est. L'espace est quadrillé par un réseau hydrographique important et une nappe affleurante à l'origine d'importantes surfaces en zones humides. La nature s'invite aussi au cœur du milieu urbain avec 432 hectares d'espaces de nature répartis sur tout le territoire (Figure 1). La collectivité compte aussi un patrimoine arboré sur l'espace public considérable avec quasiment 80 000 arbres au sein des espaces verts et en accompagnement des voiries.

## Données utilisées

La modélisation repose principalement sur l'utilisation de la base de données d'occupation du sol « Végétation à grande échelle » réalisée par le Service Régional de Traitement d'Images et de Télédétection (SERTIT) pour l'Eurométropole de Strasbourg en 2012. Cette base de données contient quinze classes d'occupation du sol et peut être utilisée jusqu'au 1/2000ème avec une précision géométrique en dessous du mètre (60

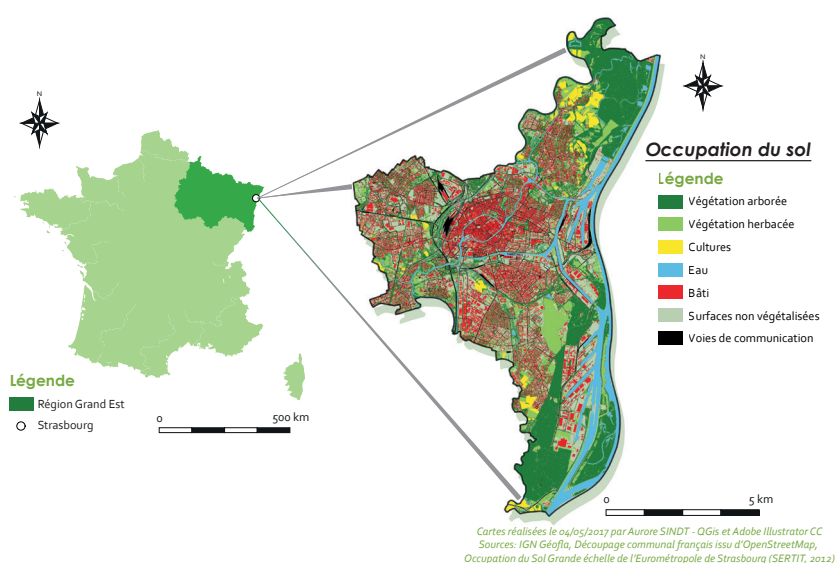


Figure 1 : Localisation et occupation du sol de la Ville de Strasbourg - A. Sindt

cm). Les éléments végétalisés sont discriminés selon des critères de forme et de taille.

La Base de Données d'Occupation du Sol (© CIGAL 2011-2012) a permis d'affiner l'information relative au bâti en identifiant les espaces denses. Les données ponctuelles relatives aux arbres appartenant à la Ville de Strasbourg, à l'éclairage public et aux zones humides ont permis de compléter les informations.

Enfin, les données d'observations des espèces modèles (Ecureuil roux et Noctules), fournies par le Groupe d'études et de protection des Mammifères d'Alsace (GEPMA) et l'Office des données naturalistes d'Alsace (ODONAT), ont permis d'évaluer les métriques de connectivité.

### Méthode

Deux types d'espèces arboricoles, dont la présence est avérée à Strasbourg, ont été choisies : un mammifère grimpeur, l'Ecureuil roux (*Sciurus vulgaris*) (Schwoertzig *et al.*, 2015) et deux espèces de chiroptères (Sindt, 2017), la Noctule commune (*Nyctalus noctula*) et la Noctule de Leisler (*Nyctalus leisleri*). Les choix relatifs au type et à la taille d'habitat, ainsi qu'à la préférence paysagère permettant de fixer des valeurs de résistance se sont basés sur des informations concernant la biologie et l'écologie recueillies dans la littérature et à dire d'experts régionaux. La surface minimale de la forêt, habitat préférentiel commun à chaque espèce, a été fixée à 0.5 ha pour l'écureuil et pour les noctules. Pour les noctules, l'habitat a été précisé en prenant en compte leur affinité pour certaines essences et les arbres d'un diamètre

### Paramètres utilisés dans Graphab

|                            | Ecureuil          | Noctules                            |
|----------------------------|-------------------|-------------------------------------|
| Connexité                  | 8                 | 4                                   |
| Taille minimale des taches | 0,5 ha            |                                     |
| Distance                   | 3 000 m           | 10 000 m                            |
| Probabilité de mouvement   | 0,05              |                                     |
| Type de distance           | Dispersion        |                                     |
| Impédance                  | Coût              |                                     |
| Echelle des coûts          | 1, 10, 800, 1 000 | 5, 10, 20, 40, 100, 200, 400, 1 000 |
| Topologie                  | Planaire          |                                     |

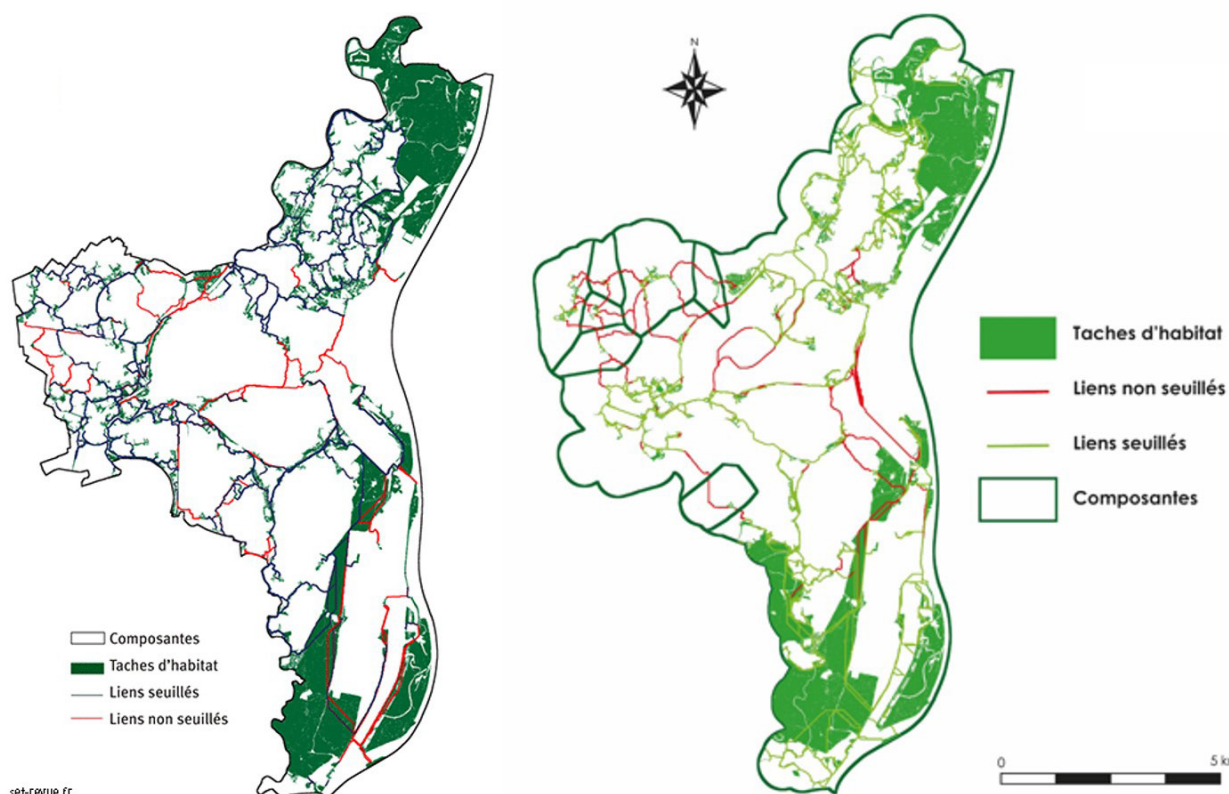


Figure 2 : Cartographies des liens en vue réaliste pour les deux espèces étudiées (Droite : Ecureuil ; Gauche : Noctules)– A.S & E.S

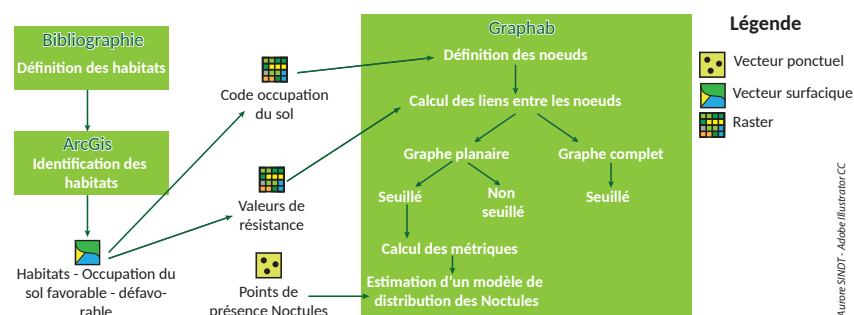


Figure 3 : Démarche méthodologique générale - A. Sindt

supérieur à 40 cm, l'absence d'un dispositif d'éclairage et la proximité d'espaces en eau.

Les valeurs de résistance pour chaque classe paysagère, allant de l'entité spatiale la plus favorable correspondant à l'habitat préférentiel, à l'entité spatiale la plus défavorable, ont d'abord été attribuées pour l'écureuil à partir du jeu de résistance proposé par Verbeylen *et al.* (2003) dans un contexte urbain. Ces valeurs ont ensuite été adaptées à dire d'experts pour les noctules.

Les données de présence ont été combinées à 250 points de pseudo-absence pour l'écureuil, 356 pour les Noctules communes et de Leisler cumulées, générés de façon aléatoire sur l'ensemble du territoire. Les graphes ont été générés à l'aide de Graphab v1.1 et Graphab v2 (Figure 3).

## Résultats

En couplant la production de graphes paysagers à un modèle de distribution des espèces modèles utilisées, il est possible de cartographier l'impact de l'urbanisation sur un réseau écologique potentiel à un instant t.

Deux scénarios ont été testés pour chaque étude. Le premier où seuls les liens répondant à la distance de dispersion maximale des espèces sont retenus (graphe planaire seuillé) et le deuxième sans contrainte de distance de dispersion, correspondant à un scénario plus optimiste (graphe planaire non seuillé). Dans le premier scénario, les habitats sont plus isolés. Si la connectivité spatiale est la même que pour le second scénario, la connectivité fonctionnelle est dégradée et de grandes ruptures de connectivité apparaissent.

Pour les deux espèces, les résultats concordent (Figure 2). Ainsi, on observe une absence de connectivité entre la partie nord et la partie sud de la ville. Cette rupture est compensée par plusieurs liens qui contournent le centre historique en s'appuyant sur des ripisylves, haies ou alignements d'arbres en bord de route et d'autoroute. Cette déconnexion n'est pas distinctement perceptible sur une carte paysagère. La comparaison des résultats des deux espèces permet aussi de mettre en exergue les obstacles et d'identifier les endroits où la connectivité pourrait être renforcée.

Le résultat de cette modélisation permet aux acteurs du territoire de s'approprier plus facilement la démarche de préservation et de développement des espaces de

nature en ville (Figure 4). L'approche « espèce » donne un repère et permet de déterminer une connectivité fonctionnelle. La visualisation des graphes sous la forme de carte met en évidence les espaces de nature, même petits, à préserver ou restaurer en milieu urbain afin de constituer un véritable maillage du territoire urbain.

La modélisation de réseaux écologiques est un outil de diagnostic efficace pour comprendre les enjeux de la connectivité ainsi qu'un outil de prospective pour orienter sur le long terme les politiques d'aménagement du territoire.

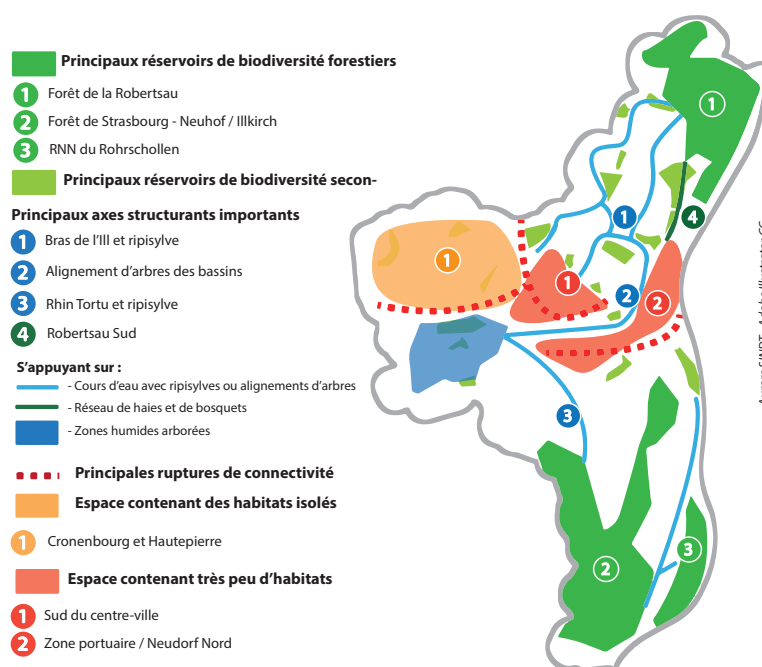


Figure 4 : Schéma de synthèse : la connectivité des habitats des écureuils et noctules - A. Sindt

a Eurométropole de Strasbourg, Service Environnement et Transition Énergétique, 1 Parc de l'Etoile 67076 Strasbourg

\* [adine.hector@strasbourg.eu](mailto:adine.hector@strasbourg.eu)

b Faculté de Géographie et d'Aménagement, Université de Strasbourg

c UMR 7362, CNRS Laboratoire Image Ville Environnement - Université de Strasbourg

Strasbourg.eu  
eurométropole

Faculté  
de Géographie  
et d'Aménagement  
Strasbourg

Image  
Ville  
Environnement  
UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

## 2 Définir les trames vertes et bleues d'un territoire à l'aide de Graphab. Retours d'expérience de deux communautés d'agglomération franciliennes

Hervé Moal <sup>a\*</sup>  
Hortense Serret <sup>b</sup>

### Problématique

Le concept de « Trame verte et bleue » (TVB) tel qu'il a été officialisé par le Grenelle de l'environnement est un véritable projet écologique, « un outil d'aménagement durable du territoire qui contribue à enrayer la perte de biodiversité, à maintenir et restaurer ses capacités d'évolution et à préserver les services rendus, en prenant en compte les activités humaines » (MEEDE, 2014). Sa mise en œuvre s'articule officiellement autour de grands principes, dont la prise en compte des activités humaines, des enjeux socio-économiques, des enjeux de cohérence nationale (espèces protégées, continuités d'importance nationale), ou encore l'organisation du suivi et l'évaluation de sa mise en œuvre (Article L. 371-2 du code de l'environnement). De la même manière que les régions ont été conduites à produire des Schémas régionaux de cohérence écologique (SRCE) ayant pour vocation de définir les enjeux régionaux de préservation et de restauration des continuités écologiques en identifiant les réservoirs de biodiversité et les corridors à

préserver et renforcer, les territoires, à une échelle plus réduite, se voient contraints de mener le même exercice avec les TVB.

Or, si l'identification des corridors et réservoirs à préserver ou restaurer au niveau régional peut être structurée par de grandes composantes naturelles comme des forêts, des fleuves ou de larges étendues aquatiques, elle s'avère plus difficile à déterminer à l'échelle locale, celle d'une ou plusieurs communes par exemple, dépourvues de ces grandes infrastructures paysagères. La définition des TVB se fait donc le plus souvent « à dire d'experts » et peut manquer parfois d'objectivité.

La mobilisation d'outils de modélisation comme Graphab peut s'avérer très pertinente pour contrer ces limites et travailler à des échelles locales. Deux communautés d'agglomération de la région parisienne ont souhaité tester Graphab afin d'apporter une vision objective aux travaux déjà menés en amont avec l'aide de bureaux d'études. Notre objectif est ainsi de comparer ces connectivités déterminées « à dire d'experts » avec celles définies à partir de la modélisation réalisée avec Graphab.

### Zones d'études

La zone d'étude est composée de deux communautés d'agglomération situées en région parisienne (Figure 1) :

- Grand Paris Seine Ouest (GPSO), 32 km<sup>2</sup>, regroupant Boulogne-Billancourt, Chaville, Issy-les-Moulineaux, Meudon, Sèvres, Vanves, Ville-d'Avray
- Les Lacs de l'Essonne, 11 km<sup>2</sup>, regroupant les communes de Grigny et Viry-Châtillon

GPSO comprend plus de 300 000 habitants soit 20 % de la population du département des Hauts-de-Seine. 40 % du territoire est composé d'espaces verts, dont la plupart sont des bois et forêts (Forêts de Meudon et de Fausses-Reposes). On y trouve également des zones humides avec étangs, mares, berges ou encore îles (liés à la présence de la Seine),

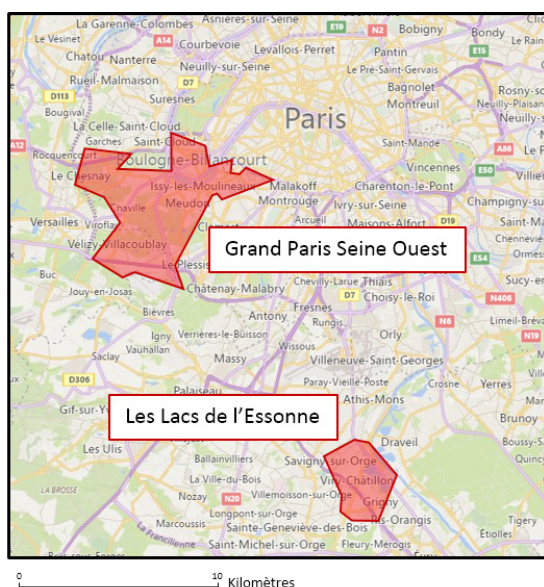


Figure 1 : Localisation des deux sites d'études, Grand Paris Seine Ouest et Les Lacs de l'Essonne



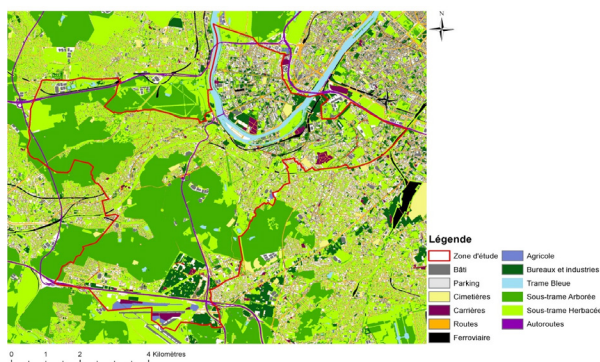


Figure 2A : Carte d'occupation des sols en 12 classes de la communauté d'agglomération de GPSO

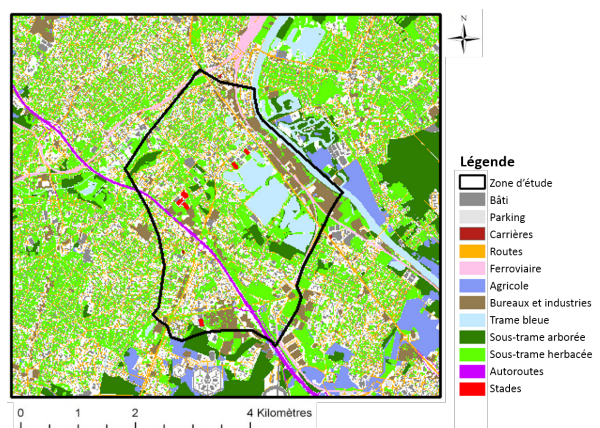


Figure 2B : Carte d'occupation des sols en 12 classes de la Communauté d'agglomération des Lacs de l'Essonne

de nombreux espaces verts urbains (parcs et jardins) et des zones de friches.

La communauté d'agglomération des Lacs de l'Essonne comprend 59 000 habitants. Si le territoire est un espace urbain très contraint, il abrite néanmoins un important réservoir de biodiversité, identifié au niveau régional par le SRCE d'Île-de-France, constitué de 6 étangs s'étendant sur 100 ha. Il s'agit de la 3<sup>e</sup> étendue d'eau d'Île-de-France.

### Données utilisées

Dans les deux cas, les données issues du Mode d'occupation des sols (MOS) réalisé par l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la région Île-de-France (IAU) ont été utilisées. Ces données ont été complétées et enrichies par des données locales plus précises (alignements d'arbres, pieds d'arbres, zones de prairie, strate arbustive, etc.). Ces données nous ont permis de réaliser deux cartes d'occupation du sol composées de 12 classes (Figures 2A et B). En fonction des données et après discussion avec les acteurs locaux, les éléments paysagers à prendre en compte ont légèrement différé (présence de cimetières minéralisés dans le cas de GPSO, nombreux stades dans le cas des Lacs de l'Essonne).

### Paramètres utilisés dans Graphab

|                            | Espèces peu mobiles | Espèces relativement mobiles | Espèces mobiles |
|----------------------------|---------------------|------------------------------|-----------------|
| Connexité                  | 8                   |                              |                 |
| Taille minimale des taches | 0 ha                |                              |                 |
| Distance                   | 200 m               | 500 m                        | 1 000 m         |
| Probabilité de mouvement   | 0,05                |                              |                 |
| Type de distance           | Quotidien           |                              |                 |
| Impédance                  | Coût                |                              |                 |
| Echelle des coûts          | 1 à 10 000          |                              |                 |
| Topologie                  | Planaire            |                              |                 |

### Méthode

Plusieurs graphes ont été réalisés afin de mettre en évidence les éléments les plus déterminants des différentes sous-trames. Pour les deux communautés d'agglomération, la modélisation a porté sur les sous-trames herbacées et arborées. Pour Les Lacs de l'Essonne, une étude complémentaire a été réalisée à plus grande échelle afin de quantifier l'intérêt des zones aquatiques pour la sous-trame aquatique.

D'après les cartes paysagères des deux territoires, des coûts pour chacun des éléments du paysage ont été attribués de 1 à 10 000 selon les sensibilités des espèces aux éléments paysagers. Pour chacune des sous-trames, plusieurs graphes seuillés ont été réalisés selon différentes distances de dispersion des juvéniles d'espèces observées dans les deux territoires.

- 200 m pour des espèces peu mobiles en milieu urbain. Exemple du Myrtil (*Maniola jurtina*), un papillon, pour la sous-trame herbacée des deux territoires et du Grand Capricorne (*Cerambyx cerdo*), un coléoptère, pour la sous-trame arborée de GPSO
- 500 m pour les espèces relativement mobiles en milieu urbain. Exemple du Demi-deuil, (*Melanargia galathea*), un papillon, pour la sous-trame herbacée des deux territoires et du Sorbier domestique (*Sorbus domestica*), pour la sous-trame arborée des Lacs de l'Essonne.
- 1 km pour les espèces mobiles en milieu urbain

comme la Fauvette grisette (*Sylvia communis*), pour les sous-trames herbacées et le Rouge-gorge (*Erithacus rubecula*) pour les sous-trames arborées.

Pour la réalisation de la trame aquatique des Lacs de l'Essonne, nous avons considéré les déplacements quotidiens de deux espèces dont l'habitat préférentiel est constitué d'eaux stagnantes. Une distance de dispersion quotidienne de 250 m a été attribuée à l'Agrion élégant (*Ischnura elegans*) et de 500 m au crapaud commun (*Bufo bufo*).

Pour hiérarchiser les contributions des taches d'habitat de chaque trame aux connectivités, deux métriques ont été utilisées, une métrique globale de connectivité, le PC et sa version locale décomposée, le delta-PC qui permet d'évaluer différents types de contribution à la connectivité. Le delta-PC a été calculé sur les taches et les liens afin de hiérarchiser leurs contributions respectives aux connectivités. Les « liens d'importance » résultent de la sélection de 20 % meilleurs liens dont les valeurs de connectivité sont les plus élevées.

### Résultats

**Résultats pour GPSO :** Pour la sous-trame arborée, l'analyse met en évidence le rôle central de la partie Ouest de la Forêt de Meudon et de la Forêt de Fausses-Reposes. L'analyse des « liens d'importance » montre que la liaison entre ces deux forêts, aujourd'hui séparées par un réseau autoroutier et ferroviaire, était stratégique. La modélisation a également permis de mettre en évidence l'intérêt des alignements d'arbres au sein de l'espace urbain dense situé à l'Est de la communauté d'agglomération (Figure 3).

Pour la sous-trame herbacée, les résultats révèlent l'importance pour la connectivité globale d'un talus SNCF, des jardins individuels, d'une base aérienne et d'un golf. En particulier, le talus SNCF semble jouer un rôle clé par son positionnement stratégique (valeur haute du dPCConnector pour les trWois seuillages).

**Résultats pour Les Lacs de l'Essonne :** Pour la trame arborée, les résultats montrent que les zones boisées contribuant le plus à la connectivité sont plutôt situées en dehors de la communauté d'agglomération. Néanmoins, l'analyse révèle que la restauration de corridors entre les différents parcs permettrait d'augmenter leurs

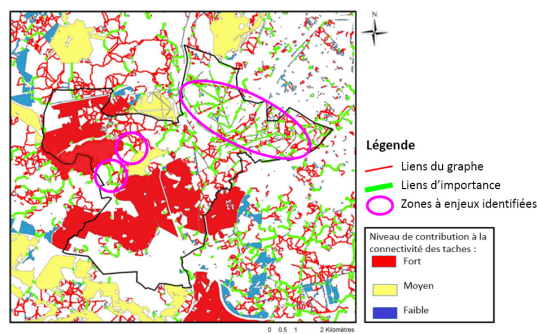


Figure 3 : Localisation des liens d'importance pour le maintien de la trame arborée (calcul du dPC pour un graphe seuillé à 200 m)

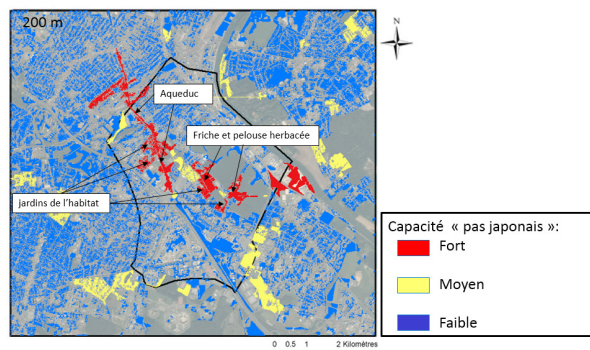


Figure 4 : Contribution des différents éléments de la trame herbacée en termes de « pas japonais » pour les espèces à faible capacité de dispersion (valeurs du dPCconnector pour un seuil de 200m)

contributions à la connectivité globale.

Pour la sous-trame herbacée, certains espaces situés au sein du territoire contribuent fortement au réseau. Il s'agit notamment d'un aqueduc végétalisé, de certains jardins individuels et de friches. Le calcul du delta-PC décomposé montre que c'est leur contribution en termes de « pas japonais » (valeurs fortes du dPCconnector) qui est la plus importante pour la connectivité globale et ce, pour toutes les distances de dispersion (Figure 4).

Concernant la trame bleue, l'analyse montre que le niveau de connectivité chuterait de 25 % si les lacs étaient supprimés. La contribution des lacs à la connectivité est particulièrement forte en termes de nombre de liens avec les taches voisines (valeurs fortes de dPCflux). En revanche, leur rôle en tant que « pas japonais » semble limité (valeurs faibles du dPCconnector pour les deux espèces cibles).

La modélisation réalisée à partir de Graphab a permis de localiser avec précision les zones les plus stratégiques pour les différentes sous-trames des territoires. La comparaison avec les TVB élaborées « à dire d'experts » révèle des similitudes dans les zones à restaurer (la liaison à restaurer entre les deux zones forestières sur GPSO), mais également des zones qui n'avaient pas forcément été identifiées : le talus SNCF pour la sous-trame herbacée et les alignements d'arbres dans les zones urbaines pour la sous-trame arborée dans le cas de GPSO, les espaces végétalisés de l'aqueduc dans le cas des Lacs de l'Essonne.

Graphab apparaît donc comme un outil de soutien qui permet, objectivement, de hiérarchiser les taches et les liens d'intérêt pour l'élaboration des TVB et d'orienter ainsi des politiques et pratiques de gestion en fonction des habitats que l'on souhaite maintenir ou restaurer et des espèces cibles que l'on souhaite favoriser.

a ARP-Astrance, Développement et Innovation, 9 rue de Capri, 75009 Paris

b Ewha Womans University, Division of EcoScience, Seoul 120-750, Republic of Korea

\* [hmoal@arp-astrance.com](mailto:hmoal@arp-astrance.com)



# 3 Quantifier la contribution des espaces verts d'entreprise aux connectivités écologiques d'Île-de-France

Hortense Serret <sup>a\*</sup>, Richard Raymond <sup>b</sup>, Jean-Christophe Foltête <sup>c</sup>,  
Philippe Clergeau <sup>d</sup>, Laurent Simon <sup>b</sup>, Nathalie Machon <sup>d</sup>

## Problématique

L'implantation des entreprises est devenue pour les villes une composante importante de l'aménagement urbain et constitue pour elles des enjeux forts. Les surfaces dédiées aux entreprises sont en constante augmentation depuis 30 ans. En 1982, les zones dédiées aux activités économiques couvraient 20 000 ha en Île-de-France. En 30 ans, ces surfaces ont augmenté de 50 % et occupent aujourd'hui près de 30 000 ha. C'est le type d'occupation du sol qui a le plus augmenté après le développement des habitats individuels. Les zones d'entreprise ne se sont pas développées de manière homogène sur l'ensemble du territoire. Tandis qu'elles ont eu tendance à diminuer dans le centre urbain dense de la région, elles se sont au contraire développées principalement dans les zones périurbaines, c'est-à-dire les communes autour de Paris, et dans les zones suburbaines, aux interfaces entre les zones rurales et urbaines.

Souvent construites sur d'anciennes terres agricoles, ces zones ont souvent recréé des

espaces verts dont on ne connaît que peu de choses. Quelles surfaces représentent-ils par rapport à d'autres types d'espaces verts ? Pourraient-ils potentiellement jouer un rôle dans les connectivités écologiques et dans quel type de gradient urbain ? Le travail que nous avons mené dans le cadre d'un doctorat a permis d'apporter des premiers éléments de réponse à ces questions.

## Zone d'étude

Nous avons choisi de nous intéresser à l'Île-de-France. Poumon économique national et européen, c'est sans doute l'un des territoires où la dynamique foncière des entreprises est la plus marquée. La région parisienne est depuis quelques siècles la région-capitale centralisant les pouvoirs et centres économiques du pays. Cela en fait une région propice à l'étude des espaces occupés par les activités et des espaces verts qui y sont installés.

Premier bassin d'emplois européen, l'Île-de-France accueille 34 % des cadres français. Le secteur tertiaire y est le plus représenté, 82 % des actifs franciliens y travaillent. En 2030, la population francilienne devrait atteindre autour de 13 millions d'habitants et compter le plus d'actifs potentiels (20-59 ans). On compte 1300 « Zones d'activités économiques » (ZAE) s'étendant depuis 2013 sur 28 500 ha, dont 2 700 ha de surfaces disponibles, surtout en périphérie de la petite couronne, et 52 millions de m<sup>2</sup> de bureaux.

Pour simplifier l'analyse, nous avons restreint l'analyse à une zone de 465 000 hectares comprenant tous les gradients d'urbanisation (Figure 1).

## Données utilisées

Pour cette étude, nous avons utilisé des données d'occupation des sols fournies par l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la région Île-de-France (IAU). Le Mode d'Occupation des Sols (MOS) contient 83 classes que nous avons choisi de regrouper en neuf classes : (1) Bois et forêt, (2) Agriculture, (3) Eau, (4) Urbain ouvert, (5)

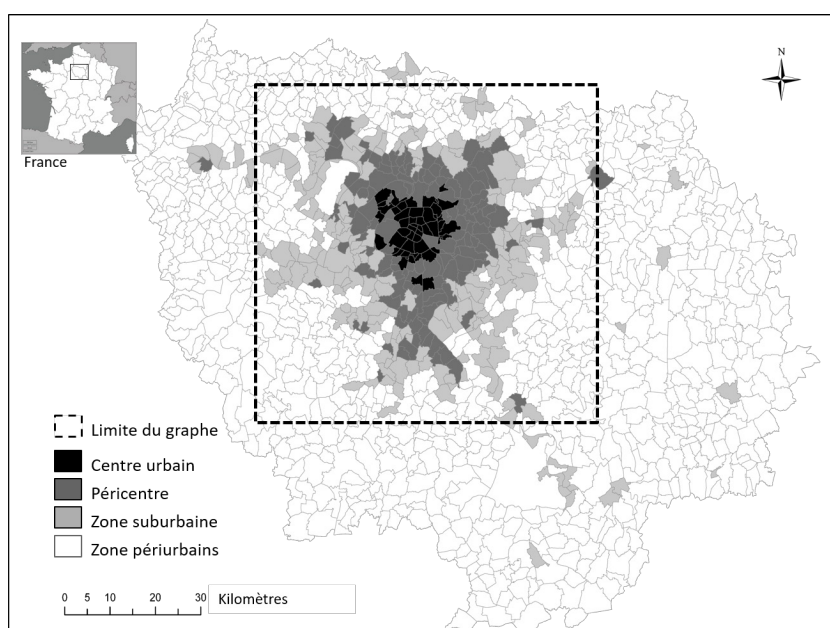


Figure 1 : Zone d'étude et gradients urbains en Île-de-France

Habitat individuel, (6) Habitat collectif, (7) Activités économiques, (8) Equipement et (9) Transport.

Pour identifier les localisations exactes des sites d'entreprises, nous avons utilisé les données de l'IGN : BD TOPO (base de données topographiques) et BD Parcellaire (base de données parcellaires). Ces données nous ont permis de sélectionner les bâtiments d'entreprises parmi les catégories « activités en contexte urbain », « sites industriels », « zones d'activités économiques » et « bureaux ».

Pour déterminer l'ensemble des sites d'entreprises sur lesquels l'étude porterait, nous avons utilisé le logiciel de cartographie ArcGIS afin de sélectionner, parmi les zones « Activités économiques » de l'IAU, celles qui comprenaient les bâtiments d'entreprises définis par l'IGN.

Enfin, afin d'identifier les espaces verts présents sur ces zones, nous avons utilisé des données de couverture végétale (NDVI, *Normalised Difference Vegetation Index*).

Méthode

L'identification des espaces verts d'entreprise a été faite en réalisant une intersection entre l'indice de végétation – seuls les indices 1 à 5 de cet indice, désignant les espaces verts, ont été utilisés – et les zones identifiées comme sites d'entreprise nous ont permis d'identifier les espaces verts d'entreprise.

La carte d'occupation du sol a été réalisée d'après les données d'occupation du sol de l'IAU en se basant sur les neuf classes définies plus haut. A l'aide de Graphab, nous avons modélisé le réseau de l'ensemble des espaces verts urbains : parcs, jardins domestiques, zones urbaines ouvertes et espaces verts d'entreprises supérieurs à 0,2 ha. Nous avons choisi de nous focaliser sur le réseau herbacé et d'exclure les bois et forêts de cette modélisation. Il s'agit en effet de la strate la plus répandue dans les espaces verts d'entreprise.

Paramètres utilisés dans Graphab

|                            | Espèces peu mobiles | Espèces relativement mobiles | Espèces mobiles |
|----------------------------|---------------------|------------------------------|-----------------|
| Connexité                  | 8                   |                              |                 |
| Taille minimale des taches | 0,2 ha              |                              |                 |
| Distance                   | 200 m               | 500 m                        | 1 000 m         |
| Probabilité de mouvement   | 0,05                |                              |                 |
| Type de distance           | Quotidienne         |                              |                 |
| Impédance                  | Coût                |                              |                 |
| Echelle des coûts          | 1, 100, 1 000       |                              |                 |
| Topologie                  | Planaire            |                              |                 |

Des valeurs de résistance ont été attribuées afin de représenter au mieux les déplacements de groupes d'espèces comme les plantes ou les papillons sensibles à l'urbanisation. Ces résistances s'échelonnent arbitrairement de 1 (faible résistance) à 1000 (haute résistance). Les espaces verts urbains (désignés comme les « habitats » formant nos taches d'habitat) se sont vus attribuer une résistance de 1, les catégories « bois et forêts », « agriculture » et « eau » une résistance de 10. Un coût de résistance de 100 a été attribué aux routes

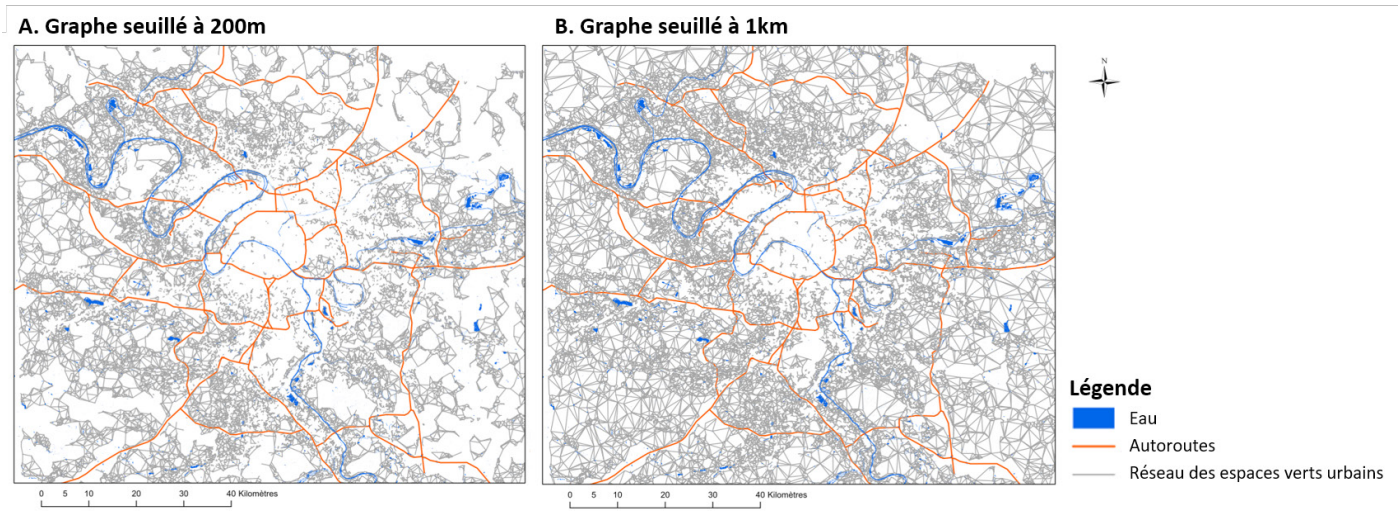


Figure 2 : Modélisation du réseau des espaces urbains pour les espèces peu mobiles (seuil de 200 m) et mobile (seuil de 1 km) en milieu urbain

et zones imperméabilisées. Enfin, les coûts les plus importants (1000) ont été attribués aux bâtiments, autoroutes et lignes ferroviaires.

Trois graphes ont été générés afin de modéliser les déplacements d'espèces mobiles en milieu urbain (1 km de dispersion), relativement mobiles (500 m) et peu mobiles (200 m) (Figure 2).

Pour quantifier la contribution des différents espaces verts urbains aux connectivités locales, nous avons choisi de travailler avec la métrique dPC décomposée. Cette métrique permet de différencier et hiérarchiser les contributions aux connectivités des différentes taches d'habitat (Fig.3) : contribution en termes de surface (dPC<sub>area</sub>), contribution en fonction du nombre de liens qu'une tache permet de générer (dPC<sub>flux</sub>) et contribution en fonction du positionnement stratégique de la tache (dPC<sub>connector</sub>).

Une classification de l'ensemble des contributions des espaces verts urbains a été réalisée à partir de la méthode des seuils naturels. Ces seuils ont permis de déterminer 4 niveaux (1 étant le plus important niveau et 4, le plus faible) d'importance de chaque tache pour les trois types de contribution aux connectivités.

Afin de déterminer comment les espaces verts d'entreprise contribuaient aux connectivités locales nous avons suivi la méthode suivante : parmi l'ensemble des espaces verts urbains contribuant le plus aux connectivités (niveaux 1 et 2), nous avons regardé combien, parmi eux, étaient des espaces verts d'entreprise.

## Résultats

Les espaces verts d'entreprise occupent 8 700 ha en Île-de-France, soit 8 % de l'ensemble des espaces verts urbains. C'est dans les zones suburbaines qu'ils sont les plus importants (3 500 ha, 11 % des espaces verts urbains). Les espaces verts d'entreprise constituent 10,4 % de l'ensemble des taches d'habitat. Les jardins domestiques, les parcs et les espaces ouverts, constituent respectivement 44,5 %, 39,3 % et 5,8 %, et des taches d'habitat.

Parmi les taches contribuant le plus aux connectivités pour le critère de surface (dPC<sub>area</sub>), aucun d'eux ne sont des espaces verts d'entreprise. Pour l'indice dPC<sub>flux</sub>, les espaces verts d'entreprise représentent 10 % pour les espèces à mobilité faible ou modérée (graphes générés à partir des seuils 200 et 500 m de dispersion). Pour l'indice dPC<sub>connector</sub>, les espaces verts d'entreprise représentent 25 % des taches d'importance pour les espèces mobiles (1 km de dispersion) et respectivement 6 % et 11 % pour les espèces à mobilité modérée.

Les espaces verts d'entreprise figurant parmi les taches d'habitat contribuant le plus aux connectivités via les critères dPC<sub>flux</sub> et dPC<sub>connector</sub> sont principalement

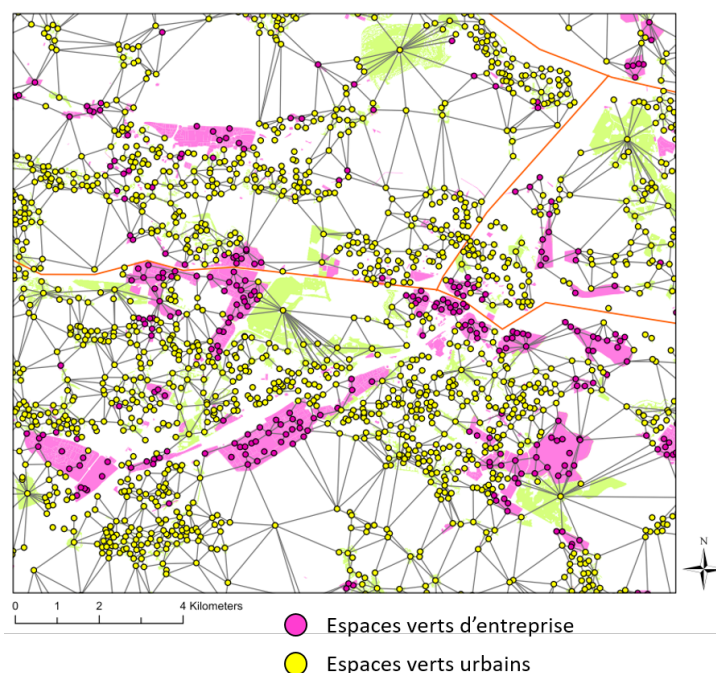


Figure 3. Intégration des espaces verts d'entreprise dans un réseau d'espaces verts urbains, exemple de la commune de Saint-Quentin en Yvelines

situés dans les zones suburbaines et dans une moindre mesure, dans les zones péri-centrales.

Ces résultats montrent que les espaces verts d'entreprise peuvent être considérés comme des espaces stratégiques permettant de contribuer aux connectivités écologiques dans des contextes urbains particuliers. Nos résultats ont montré que ces espaces peuvent jouer un rôle clé dans le déplacement des espèces, notamment en formant des pas japonais à travers une matrice urbaine souvent hostile (Figure 4).

Cette modélisation montre que ces espaces peuvent, en théorie, jouer un rôle pour améliorer la connectivité. La gestion de ces sites est donc un enjeu majeur pour qu'ils constituent des espaces réellement favorables à la biodiversité.

a Ewha Womans University, Division of EcoScience, Seoul 120-750, Republic of Korea

\* [hortense.serret@gmail.com](mailto:hortense.serret@gmail.com)

b UMR 7733 CNRS, Université Panthéon-Sorbonne, LADYSS, 2, rue Valette, 75005 Paris

c UMR 6049 ThéMA, 32 rue Megevand 25030 Besançon cedex, CNRS-Université Bourgogne Franche-Comté

d UMR 7204 CNRS-MNHN-UPMC, Centre d'Ecologie et des Sciences de la Conservation, Muséum national d'Histoire naturelle, 61 rue Buffon, 75005 Paris



# 4

## Intégration de sites industriels dans les trames vertes et bleues

Caroline De Zutter <sup>a\*</sup>  
Denis Leca <sup>b</sup>  
Nathalie Machon <sup>c</sup>

### Problématique

L'Organisation des Nations unies a déclaré 2010 Année Internationale de la Biodiversité. Dans le même temps, Storengy, filiale du groupe ENGIE en charge des stockages de gaz souterrains, lançait le projet « Storengy 2015 ». Ce projet incluait dans sa dimension durable des actions de préservation de la biodiversité sur ses sites industriels. Il répondait également aux objectifs de préservation de la biodiversité du groupe ENGIE, dont l'atteinte était fixée en 2015 ; tous les sites sensibles devaient fournir un plan d'action de préservation et de promotion de la biodiversité.

Storengy s'est associé à ENGIE Lab CRIGEN, le Centre de recherche et innovation gaz et énergies nouvelles, et au Centre des Sciences de la Conservation (CESCO) du Muséum national d'histoire naturelle (MNHN) pour définir et mettre en œuvre une méthodologie dont les enjeux étaient de : (1) mesurer l'état de la biodiversité autour des stockages de gaz, sur le foncier de Storengy, (2) identifier et prioriser les

parcelles permettant de préserver la biodiversité existante, (3) fournir une série de préconisations permettant d'améliorer les pratiques de gestion et favorables à la biodiversité, (4) établir un plan de gestion détaillé avec les chefs de site, (5) évaluer qualitativement le rôle que chaque site de stockage pourrait jouer dans le rétablissement des continuités écologiques à l'échelle régionale, (6) fournir les outils permettant de partager la connaissance ainsi acquise auprès des intervenants travaillant sur le site (salariés de Storengy, prestataires, etc.), parties prenantes locales, voisins.

### Zone d'étude

Pour chacun de ces sites, la zone d'étude va de la parcelle cadastrale à la maille du territoire. Les cartographies réalisées couvrent des périmètres de 5 km de rayon au-delà du foncier de Storengy.

Le *patch* (ou tache) est une unité spatiale développée dans cette étude, qui correspond à une surface de même habitat écologique continue pour une même parcelle cadastrale. Cela permet de mettre en place un plan d'action biodiversité à une échelle très fine et de faciliter la prise de décision.

Chaque site de stockage occupe au-dessus du périmètre de stockage souterrain plusieurs types d'installations en surface. La station centrale contient les installations industrielles. Un nombre variable de plateformes de puits sont ensuite réparties autour de la station centrale. Enfin, Storengy est également propriétaire de réserve foncière non exploitée pour des besoins industriels. Les parcelles concernées sont soit mises à disposition d'exploitants tiers, via des baux d'exploitation agricole ou forestière par exemple, soit non exploitées, comme certaines prairies.

### Données utilisées

Plusieurs types de données ont été utilisés pour modéliser le territoire : les Schémas Régionaux de Cohérence Ecologique (SRCE) ont permis d'identifier les espèces clés présentes sur le territoire ; les inventaires faune et flore réalisés

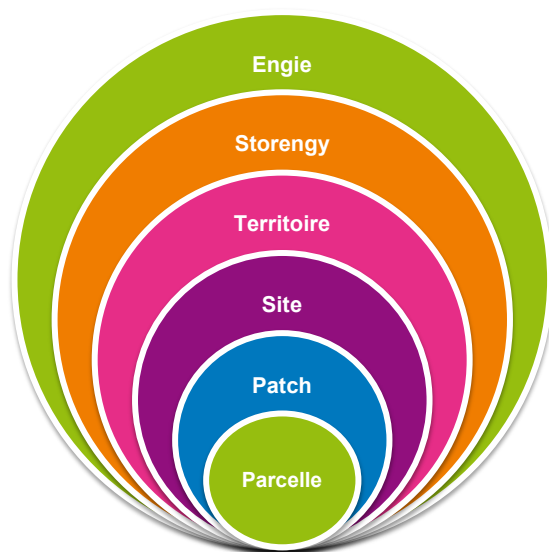


Figure 1. Echelles d'application de la méthodologie.

| Site                 | Département        | Région               |
|----------------------|--------------------|----------------------|
| Saint-Clair-sur-Epte | Val d'Oise         | Ile-de-France        |
| Chémery              | Loir-et-Cher       | Centre-Val de Loire  |
| Etrez                | Ain                | Auvergne-Rhône-Alpes |
| Cerville             | Meurthe-et-Moselle | Grand Est            |

Tableau 1 : 4 sites de stockage ont fait l'objet du déploiement de la méthodologie entre 2013 et 2017

sur les parcelles de Storengy ont permis d'identifier par groupe les espèces effectivement présentes sur la zone d'étude ; le cadastre des parcelles appartenant à Storengy a été fourni par l'entreprise. En fonction des sites, les données cartographiques sur l'occupation du sol à une échelle infra-communale ont pu être récupérées (par exemple : le Mode d'Occupation du Sol de l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Île-de-France a été utilisé pour le site de Saint Clair sur Epte). Un travail de photo-interprétation a été réalisé à partir d'images satellites en accès libre (*Google Earth*, *Google Map*, *Open Street Map*). Les données disponibles dans le Géoportail ont été utilisées lorsqu'elles étaient pertinentes.

## Méthode

L'étude est menée à partir de la cartographie d'occupation du sol. Les modes d'occupation du sol les plus proches en termes de structure sont rassemblés en quatre sous-trames : arborée, herbacée, humide et agricole.

Pour chaque sous-trame, deux espèces représentatives sont désignées qui figurent à la fois parmi les espèces clés identifiées dans le SRCE et les espèces observées dans la zone d'étude. Pour chaque espèce désignée, sont estimés en fonction des données disponibles dans la littérature, ou des connaissances des experts du MNHN :

- sa capacité à se déplacer dans son milieu de vie naturel;
- son habitat principal ;
- les coûts de franchissement par mode d'occupation du sol, c'est-à-dire ses difficultés à traverser chaque autre type de milieu.

### Paramètres utilisés dans Graphab

|                           |                              |
|---------------------------|------------------------------|
| Connexité                 | 8                            |
| Taille minimal des taches | 0 ha                         |
| Distance                  | 500 m                        |
| Type de distance          | Quotidienne                  |
| Probabilité de mouvement  | 0,05                         |
| Impédance                 | Coût                         |
| Echelle des coûts         | 1, 10, 100, 1 000, 1 000 000 |
| Topologie                 | Planaire                     |

Par exemple, les amphibiens se déplacent jusqu'à 500 mètres par jour dans les zones humides, leur habitat principal étant les plans d'eau temporaires. Ils se déplacent moins facilement dans les espaces agricoles.

A partir des paramètres définis ci-dessus, Graphab est utilisé pour calculer les connectivités potentielles entre les taches d'habitat pour un type d'organisme donné. Dans notre exemple, il s'agit des liens qui relient les plans d'eau temporaires que les amphibiens peuvent rejoindre quotidiennement. Plus le réseau est dense, plus il est en « bon état » écologique.

Dans un second temps, Graphab est utilisé pour identifier les continuités écologiques à l'échelle du territoire, en calculant les composantes.

Enfin, Graphab est utilisé pour identifier les taches d'habitat contribuant le plus à la connectivité au sein des composantes. Celles-ci sont superposées au parcellaire appartenant à Storengy afin d'identifier les parcelles qui correspondent aux taches d'habitat les plus importantes du point de vue de la connectivité. Les métriques utilisées pour calculer la connectivité entre les taches est le delta de Probabilité de Connectivité (dPC). Graphab a également été utilisé pour calculer deux des indices de connectivité composant l'indicateur de valeur écologique : le degré du nœud et la centralité de proximité. La méthode a été développée par Axelle Solibieda dans le cadre de son stage Master 2 au MNHN.



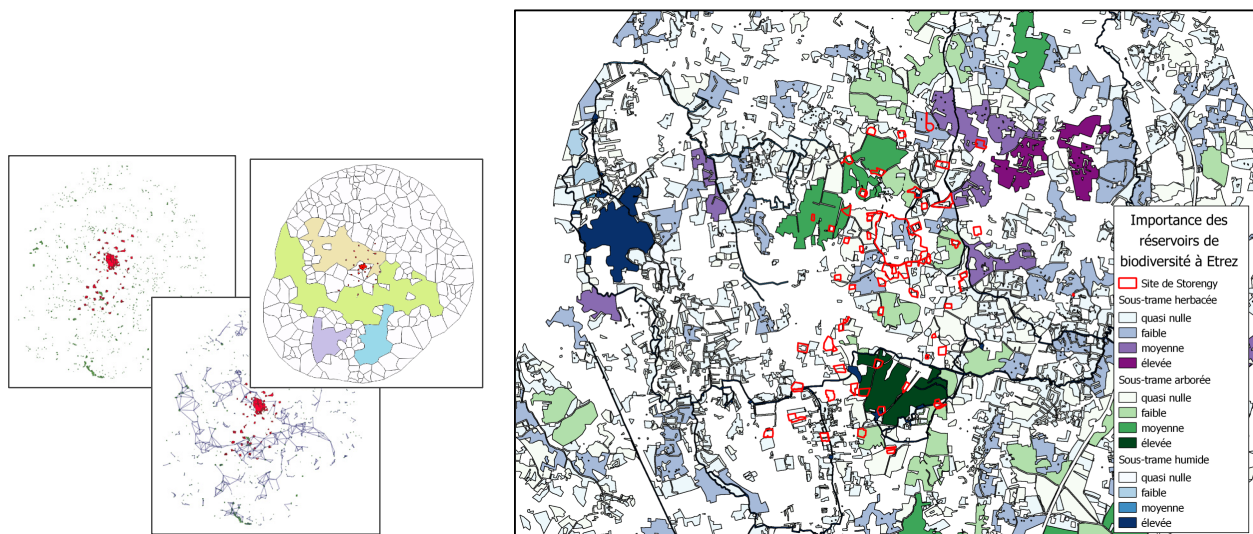


Figure 2 Résultats de la modélisation dans Graphab. Exemple des amphibiens : les amphibiens de la composante n°1 sont relativement indépendants de ceux de la composante n°2. Carte réalisée par Hugo Denoun dans le cadre de son stage Master 2 au Muséum national d'histoire naturelle.

### Résultats

Le but de l'étude était de voir si certaines pratiques de gestion pouvaient faciliter la circulation des espèces dans ou vers les corridors écologiques. Le résultat de cette étude a permis de fournir à chacun des sites :

- Une série d'indicateurs donnant un état initial de la biodiversité, compilés sous forme d'un tableau de bord.
- Des préconisations de gestion par habitat à la maille de la parcelle cadastrale
- Une priorisation des parcelles sur lesquelles agir, basée sur le résultat de l'indicateur de valeur écologique des parcelles, et également sur l'identification des parcelles qui correspondent aux taches d'habitat les plus importantes du point de vue de la connectivité.

Les études ont permis de confirmer que chacun des sites étudiés hébergeait une biodiversité ordinaire et également une biodiversité remarquable. Elles ont également illustré en quoi chacun des sites pouvait à sa façon contribuer à maintenir voire restaurer des continuités écologiques. Par exemple, pour l'un des sites, on a pu identifier la présence d'une prairie calcicole de grande valeur écologique, à la fois pour son habitat et pour sa contribution à la sous-trame herbacée. Un second site est ressorti comme particulièrement riche en surface boisée contributrice à la sous-trame arborée. Et un troisième site s'est révélé utile pour reconstituer une continuité de la sous-trame humide. Dans l'exemple de la figure 2, l'étude Graphab fait apparaître plusieurs parcelles situées dans une tache d'importance élevée pour assurer la continuité de la sous-trame arborée.

Les résultats de ce travail ont permis à Storengy d'ouvrir des discussions avec ses parties prenantes. Ils ont également été intégrés dans la démarche plus large d'engagement de Storengy à la Stratégie Nationale pour la Biodiversité validée en 2015.

a ENGIE Lab CRIGEN, 361 Avenue du Président Wilson, 93210 Saint-Denis

b Storengy

c UMR 7204 CNRS-MNHN-UPMC, Centre d'Ecologie et des Sciences de la Conservation, Muséum national d'Histoire naturelle, 61 rue Buffon, 75005 Paris, France

\* [caroline.de-zutter@engie.com](mailto:caroline.de-zutter@engie.com)

storengy  
Une société de ENGIE

ENGIE  
Lab



MUSÉUM  
NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

## 5

# Apport de la modélisation pour la prise en compte des réseaux écologiques à l'échelle d'un site

Chloé Thierry <sup>a\*</sup>  
Cindy Fournier <sup>a</sup>  
Olivier Delzons <sup>a</sup>  
Honorine Baldenweck <sup>a</sup>

## Problématique

La fragmentation et la destruction des habitats naturels sont une des causes majeures de l'érosion actuelle de la biodiversité (Barbault, 2006; Vitousek *et al.*, 1997). Le maintien et la restauration de continuités écologiques sont donc nécessaires pour limiter les impacts des activités humaines sur la biodiversité. Afin de préserver des communautés naturelles viables et l'intégrité des processus écologiques, les stratégies de conservation doivent permettre de maintenir une connectivité effective sur un large éventail d'échelles spatiales (Bennett, 1999; Noss, et Harris, 1986). L'échelle du site est une échelle opérationnelle qui correspond au territoire sur lequel un gestionnaire peut agir grâce à un aménagement et à une gestion écologique pertinente. C'est à cette échelle locale que s'inscrivent les actions menées notamment par des entreprises qui, du fait de leur vaste emprise foncière incluant souvent des espaces verts ou des zones naturelles, peuvent jouer un rôle clef dans la préservation de la biodiversité (Rubino, 2000; Serret, 2014).

L'étude engagée vise à évaluer l'intégration des sites industriels au sein des réseaux écologiques mais également à connaître et préserver ou améliorer leur connectivité fonctionnelle potentielle. Les travaux, basés sur la théorie des graphes et le logiciel Graphab (Foltête *et al.*, 2012), doivent permettre de fournir un outil d'aide à la décision à destination des gestionnaires de sites. Ces derniers pourront ainsi orienter leurs choix d'aménagement ou de gestion et anticiper leurs conséquences potentielles sur les réseaux écologiques. Cet article présente une analyse de l'influence de la création de mares sur le réseau de déplacement du Sonneur à ventre jaune (*Bombina variegata*) dans un site industriel d'Alsace. Il vise également à illustrer la contribution des outils de modélisation dans une démarche experte.

## Zone d'étude

Le site d'étude correspond à une installation de stockage de déchets (ISD) exploitée par SUEZ à Retzwiller, dans le Haut-Rhin en Alsace. D'une surface de 37 ha, elle est située dans la région naturelle du Haut-Sundgau, région de collines du sud de l'Alsace traversée par le cours de la Largue. L'ISD se place au sein d'un paysage d'agriculture intensive (céréales, colza), de quelques prairies, d'espaces boisés, de ripisylves et d'espaces urbanisés (Figure 1). Elle occupe un positionnement stratégique vis-à-vis des réseaux écologiques car elle surplombe la vallée alluviale de l'Elbaechlein. Cette vallée est identifiée comme un corridor écologique d'intérêt régional « à renforcer » d'après le SRCE d'Alsace (Ecoscop, 2014). Le site de Retzwiller fait l'objet de mesures compensatoires pour certaines espèces à enjeux, intégrant les questions de connectivité, telles que la création en 2015 de 4 mares en chapelet pour le Sonneur à ventre jaune venant compléter le réseau existant. La zone d'étude correspond à l'emprise du site ainsi qu'à une zone tampon de 600 mètres autour de celui-ci. Une analyse à une échelle plus large a également été réalisée mais les résultats ne sont pas présentés dans cet article.

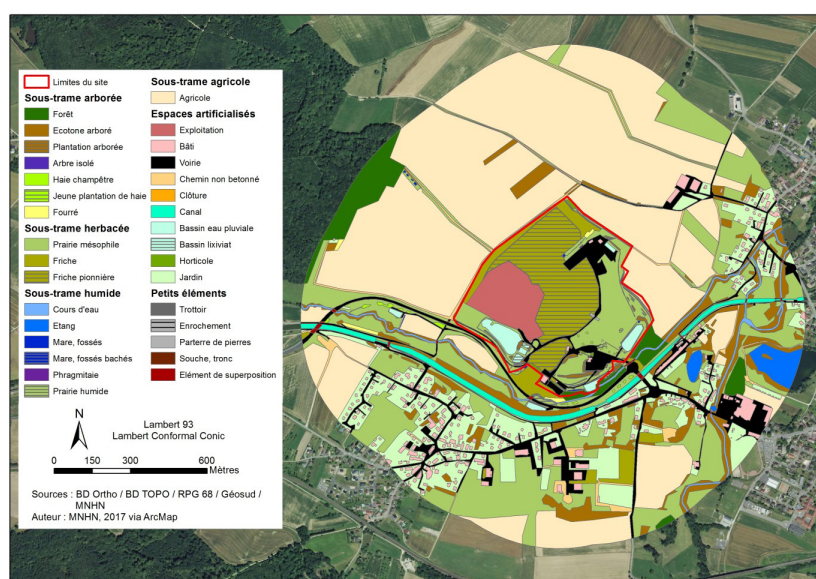


Figure 1 : Cartographie de l'occupation du sol de la zone d'étude située dans le Haut-Rhin en Alsace

## Données utilisées

Les données utilisées pour établir la cartographie d'occupation du sol proviennent principalement de la BD TOPO (2012). Celle-ci a servi à la création des couches liées à la sous-trame forestière, aux différents types de bâtis, au réseau hydrographique ainsi qu'au réseau routier. Le Registre Parcellaire Graphique (68) de 2012 a quant à lui été utilisé pour créer les couches liées à la sous-trame ouverte. La zone d'étude a également fait l'objet d'un recueil de données, basé notamment sur le protocole IQE (Indicateur de Qualité Ecologique) (Delzons *et al.*, 2012), qui a permis de récolter des éléments plus précis sur les habitats présents, leur fonctionnalité ainsi que leur richesse en espèces.

## Méthode

Dans le but de tester la réponse des outils de modélisation à une échelle très locale, la cartographie a été réalisée avec beaucoup de finesse (mailles de 50 cm) et s'est basée sur les couches SIG disponibles et sur un travail de terrain visant à recenser les micro-habitats, les petits éléments nuisant à la perméabilité ou les éléments de superposition.

L'espèce cible de cette étude est le Sonneur à ventre jaune, pour lequel la distance de dispersion choisie pour alimenter le modèle est de 1500 m (Pichenot, 2008; Smith, et Green, 2005; Trochet *et al.*, 2014). Les nœuds du graphe correspondent aux mares et aux fossés favorables à la reproduction de l'espèce.

## Paramètres utilisés dans Graphab

|                            |                     |
|----------------------------|---------------------|
| Connexité                  | 8                   |
| Taille minimale des taches | 0 ha                |
| Distance                   | 1 500 m             |
| Type de distance           | Dispersion          |
| Probabilité de mouvement   | 0,5                 |
| Impédance                  | Coût                |
| Echelle des coûts          | 1, 5, 10, 100, 1000 |
| Topologie                  | Complet             |

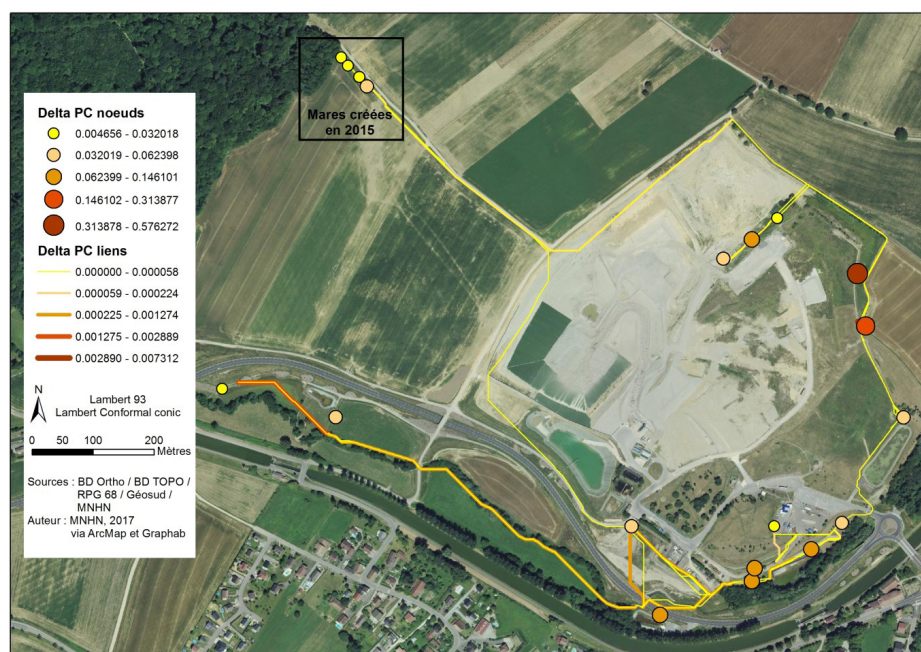


Figure 2 : Graphe du réseau du Sonneur à ventre jaune (*Bombina variegata*) intégrant les 4 mares créées en 2015 au nord-ouest du site d'étude. Les nœuds sont représentés en vue topologique (cercle) et les liens en vue réaliste (chemin). Cela permet de faire ressortir les taches d'habitat souvent très petites ou linéaires (mares ou fossés) et de mieux visualiser les déplacements possibles sur la zone d'étude.



Deux graphes ont été réalisés avec les mêmes paramètres, l'un basé sur la carte d'occupation du sol sans les quatre mares créées en 2015 et l'autre avec ces mares (Figure 2). Afin de mesurer leur influence sur la connectivité, cette dernière a été évaluée pour les deux graphes, à partir du calcul de la Probabilité de Connectivité (PC).

Trois secteurs, chacun comprenant trois mares de 20 m<sup>2</sup> séparées de 10 m, ont été déterminés géographiquement à dire d'experts en vue d'orienter la création de nouvelles mares autour du site. La valeur du PC a de nouveau été calculée pour trois graphes incluant chacun les mares d'un secteur différent, l'objectif visé étant d'identifier celui permettant un gain de connectivité le plus élevé. Un graphe supplémentaire a également été créé en ajoutant l'ensemble des 9 mares potentielles pour visualiser leur impact global sur le réseau du Sonneur à ventre jaune.

## Résultats

### Evaluation de la connectivité des mares créées en 2015

Le travail de comparaison de la connectivité avec et sans les 4 mares créées montre un gain de connectivité de 13 % (valeur du PC). Le réseau du sonneur est étendu et deux nouvelles connexions reliant les mares créées et celles présentes sur le site ressortent des modélisations. La présence d'individus dès la première année dans les mares confirme leur fonctionnalité.

### Choix des emplacements pour la création de nouvelles mares

Les résultats de la modélisation ont permis de hiérarchiser les 3 secteurs proposés à dire d'experts pour la création de nouvelles mares selon le gain de connectivité qu'ils engendrent. Si les résultats sont globalement peu discriminants, le secteur I est tout de même celui qui renforce le plus la valeur du PC, avec un gain de 3,47 %. Il permet principalement de conforter des liens déjà existants (Figure 3). Les secteurs II et III engendrent une augmentation moindre de la valeur du PC (+2,81% et +2,65% respectivement) mais permettent d'élargir l'emprise du réseau en créant de nouveaux chemins potentiels pour l'espèce considérée. L'ensemble des 3 secteurs permet un gain de connectivité de 9,04 %, ce qui indique qu'ils sont complémentaires.

L'usage de la modélisation, en complément du dire d'experts, peut donc être un outil d'aide à la compréhension de phénomènes complexes et à la décision en matière de gestion et d'aménagement de sites industriels. Cette étude montre en effet que des outils de modélisation, tels que Graphab, peuvent permettre de tester plusieurs scénarios et d'orienter les aménagements pour un gain de connectivité optimal

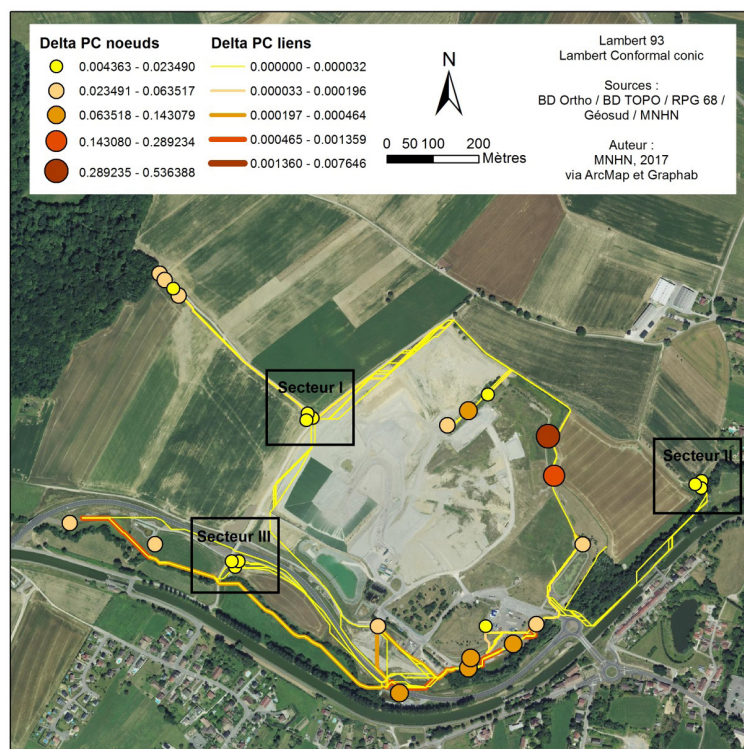


Figure 3 : Graphe du réseau du Sonneur à ventre jaune (*Bombina variegata*) intégrant les 9 mares potentielles des secteurs I, II et III.

ou un moindre impact, mais aussi de mieux analyser sur un secteur donné les points de rupture potentiels pour une espèce ou un groupe d'espèces considéré(e). Cependant, le recours à la modélisation, qui peut s'avérer chronophage, doit se faire en examinant en amont sa plus-value au regard des questions posées, des réponses apportées par les experts et des données mobilisables. L'étude engagée se poursuivra avec de nouveaux tests portant sur d'autres espèces cibles et sur d'autres sites d'étude.

a MNHN-UMS 2006 PATRINAT

\* [chloe.thierry@mnhn.fr](mailto:chloe.thierry@mnhn.fr)





# 6

## Définir un zonage à partir du réseau de prairies pour le suivi des populations de campagnols terrestres

Jean-Christophe Foltête <sup>a\*</sup>  
Gilles Vuidel <sup>a</sup>

### Problématique

Les populations de certains rongeurs sont parfois abondantes au point de poser de multiples problèmes aux sociétés humaines, qui cherchent à les gérer et à mieux contrôler leur dynamique. C'est le cas des campagnols terrestres qui pullulent et se diffusent sous forme de « vagues voyageuses » dans les prairies du Jura et d'Auvergne. Pour disposer de données permettant de gérer et si possible réguler ces populations, il est nécessaire s'appuyer sur un plan de suivi sur le terrain. Toutefois, le coût occasionné par les missions d'observation limite le nombre et la fréquence des relevés de terrain. Dans ce contexte, il peut être intéressant de chercher à intégrer la notion de connectivité de l'habitat dans la définition de tels plans de suivi, pour rationaliser les campagnes d'observation en fonction de critères fonctionnels (c'est-à-dire en fonction des flux de déplacement potentiels), plutôt que d'opter pour un échantillonnage spatial systématique pouvant conduire à une certaine redondance. Les graphes paysagers constituent une base méthodologique bien adaptée pour définir un zonage fonctionnel, car ils représentent de façon simplifiée les réseaux potentiels de déplacements. Partant de cette base, quelle méthode mettre en œuvre pour produire un tel zonage ? Quelle validité peut-on accorder aux résultats ?

### Zone d'étude

La zone d'étude est la partie franc-comtoise du massif jurassien, adossé à la frontière franco-suisse. Elle est délimitée à l'ouest par la basse vallée du Doubs où se situent les principales agglomérations urbaines (notamment Belfort-Montbéliard et Besançon). Vers l'est, le massif du Jura s'amorce par un escarpement continu délimitant les premiers plateaux, entre 400 et 700 m d'altitude. Ces plateaux faiblement peuplés présentent des paysages vallonnés de forêts de feuillus, de prairies et cultures, localement animés par des vallées en canyon (Loue, Lison). En continuant vers l'est, un nouveau talus marque les seconds plateaux entre 700 et 1000

mètres d'altitude, où de grandes étendues de prairies alternent avec des forêts de conifères, et où l'élevage laitier constitue la principale ressource agricole. Enfin, le long de la frontière franco-suisse, les forêts couvrent les plus hauts monts jurassiens de façon presque continue.

### Données utilisées

Dans cette zone, une carte d'occupation du sol à 10 m de résolution spatiale a été constituée en combinant plusieurs couches de la BD TOPO (IGN) (bâti, réseaux de transport, hydrographie, végétation arborée) et le Registre Parcellaire Graphique (Agence des Paiements) simplifié en deux catégories (prairies et cultures). Dans les prairies qui constituent l'habitat du campagnol terrestre, deux sous-catégories ont été définies pour tenir compte des effets de prédation provenant des éléments arborés : les cœurs de prairie, obtenus par érosion de 50 m, et les autres surfaces considérées comme des lieux favorables aux déplacements. Parallèlement, des données démographiques des populations de campagnols terrestre ont été mobilisées pour valider la méthode de zonage. Elles ont été constituées à partir des indicateurs de densité communale annuelle relevés par la Fredon Franche-Comté. Ces données communales ont été transformées pour disposer finalement de densités annuelles de 1989 à 2004 dans chaque tache correspondant à un cœur de prairie.

### Méthode

Dans son usage classique, un graphe paysager peut être directement à l'origine d'un zonage si on seuille les liens, créant ainsi des sous-graphes ou composantes. Cependant, cette méthode simple ne tient pas compte de la configuration du graphe et a tendance à multiplier les zones là où les taches sont plus espacées. Parmi les méthodes de segmentation de graphe utilisées pour définir des « compartiments » au sein d'un réseau, celles qui sont fondées sur la notion de modularité présentent l'intérêt de s'adapter aux graphes de grande taille. La modularité est un critère basé sur la comparaison des connexions observées et des connexions théoriquement rencontrées en

supposant le graphe aléatoire. Ce critère habituellement utilisé pour les graphes binaires (l'arc entre deux nœuds est soit présent, soit absent) a été adapté ici pour s'appliquer aux graphes pondérés, c'est-à-dire pour tenir compte des distances caractérisant les liens et des capacités démographiques décrivant les nœuds. Dans le logiciel Graphab, une procédure automatique a permis de tester un nombre croissant de compartiments (de 2 à  $n$ ) à partir d'un graphe initial connexe et pour chacun, l'algorithme a identifié le découpage qui maximise la modularité. La validation de chaque segmentation a été fondée sur le Lambda de Wilks calculé à partir des données de densité de campagnols terrestres. Ce critère fondé sur le rapport entre les covariances intra-zones et les covariances totales est compris entre 0 (segmentation parfaite) et 1 (segmentation non pertinente). Le critère de pertinence de la segmentation est la statistique  $g^2L$  dérivée du Lambda de Wilks où l'effet du nombre de zones est supprimé. A mesure que ce nombre de zones augmente, cet indicateur renseigne sur un niveau de découpage pertinent quand il se stabilise ou augmente.

Les coûts attribués aux catégories d'occupation du sol ont été attribués à partir d'une étude précédente (Foltête, et Giraudoux, 2012) de la façon suivante : 1 pour les taches d'habitat (4132 taches de prairies) et les autres prairies, 25 pour les haies et cultures, 50 pour le bâti, les réseaux de transport, les forêts de conifères et les zones humides, 1000 pour les forêts de feuillus ou mixtes

### Paramètres utilisés dans Graphab

|                            |                  |
|----------------------------|------------------|
| Connexité                  | 8                |
| Taille minimale des taches | 5 ha             |
| Distance                   | 4 000 m          |
| Type de distance           | Dispersion       |
| Probabilité de mouvement   | 0,5              |
| Impédance                  | Coût             |
| Echelle des coûts          | 1, 25, 50, 1 000 |
| Topologie                  | Planaire         |

et les cours et plans d'eau. Le paramétrage du calcul de modularité s'est basé sur la même étude précédente, selon laquelle les flux potentiels ont été calculés avec une distance coût de 1000 correspondant à une probabilité de mouvement de 0,5.

### Résultats

Une première série d'analyses portant sur la comparaison de plusieurs valeurs de pondération des surfaces dans l'estimation des flux potentiels (via le paramètre  $\beta$  dans Graphab) a conduit à retenir le paramétrage  $\beta = 0,1$ . Les zonages issus de ce réglage ont ensuite été comparés à deux autres options : segmentation à partir de la modularité binaire ( $\alpha = 0$  ;  $\beta = 0$ ), composantes issues d'un simple seuillage. Pour ces trois options, les courbes des indicateurs de pertinence ont été calculées pour des découpages de 2 à 24 zones (Figure 1). Pour le Lambda de Wilks (a) comme pour le critère  $g^2L$  (b), la courbe basée sur la modularité pondérée est toujours la plus basse alors que celle basée sur les composantes est la plus haute. Cet ordre montre que la segmentation à partir de la modularité pondérée aboutit au découpage le plus cohérent sur le plan de la dynamique démographique. Il confirme également que les composantes issues du seuillage n'ont pas de pertinence pour représenter cette dynamique.

La courbe du critère  $g^2L$  fondée sur la modularité pondérée a ensuite été utilisée pour définir les nombres de zones les plus adaptés au cas d'étude (Figure 2). Un premier palier avec un minimum local est visible pour 10 zones, suivi de plusieurs autres minimums locaux, puis d'une valeur minimale atteinte pour 21 zones. Ces deux niveaux de découpage ont été choisis pour représenter un zonage hiérarchique au sein du réseau de prairie.

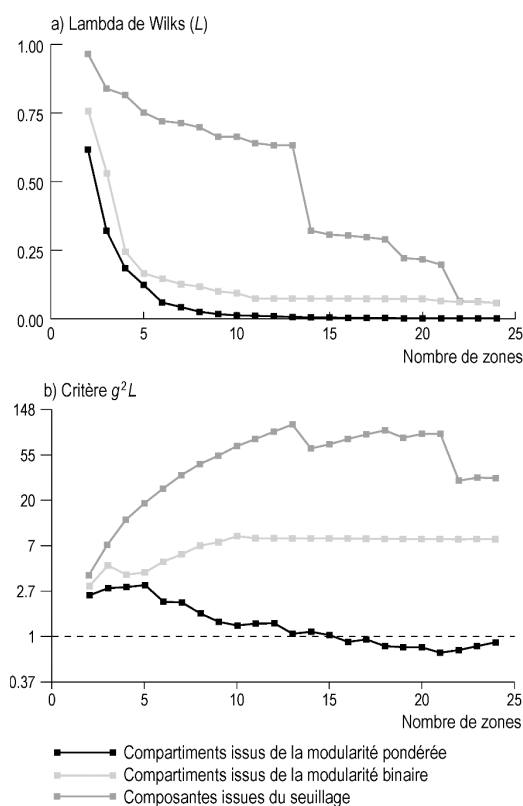


Figure 1 : Pertinence des zonages vis-à-vis de la dynamique démographique des campagnols terrestres en fonctions de trois options de découpage

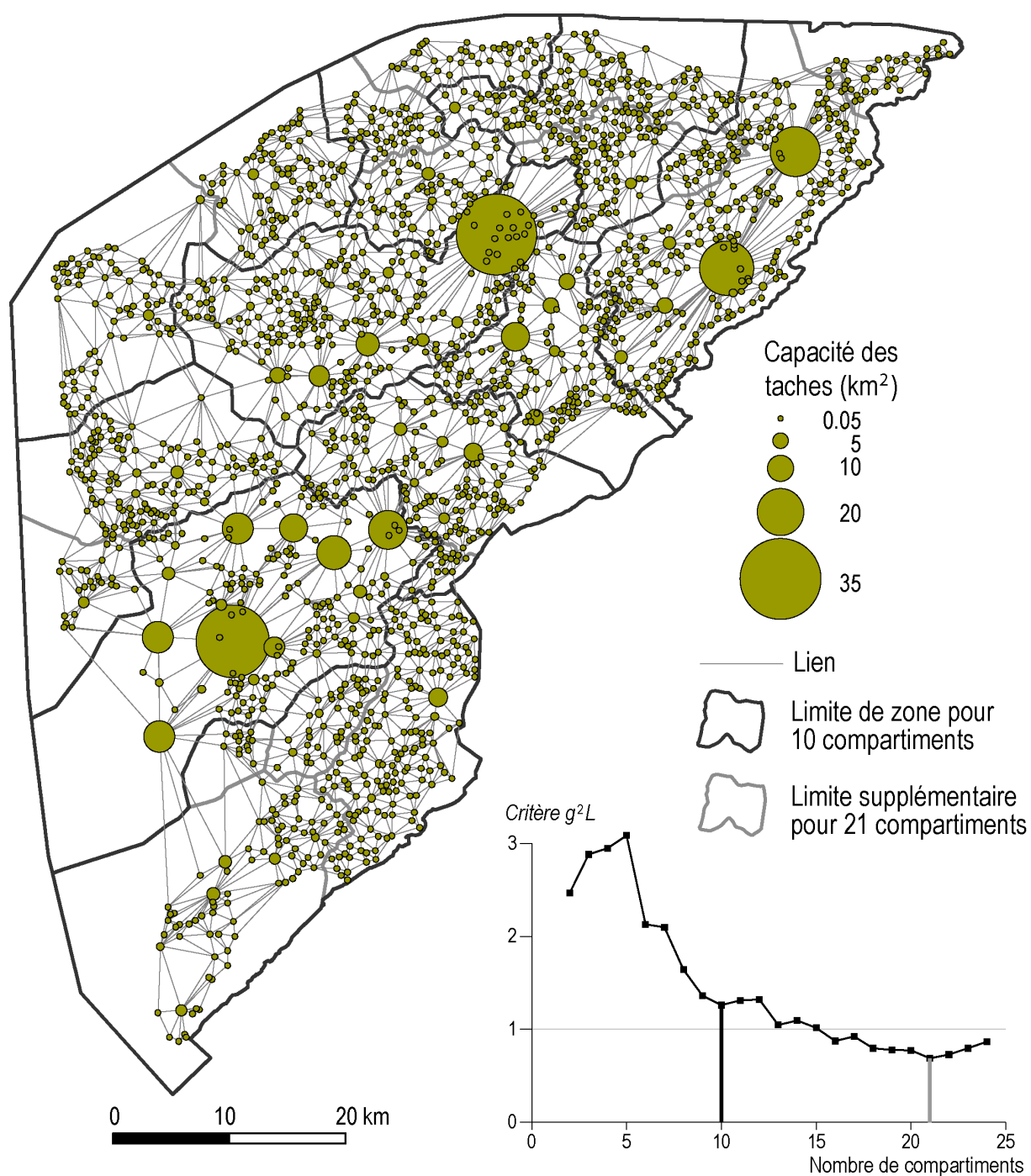


Figure 2 : Compartiments identifiés par le modèle.

Cette étude a montré que dans le cas du réseau de prairie, le critère de modularité est lié de façon significative à la dynamique démographique des campagnols terrestres. Elle suggère que dans les contextes où aucune donnée démographique n'est disponible, l'usage de ce critère pour définir des zones de suivi des populations est une approche pertinente. Cela suppose toutefois qu'on dispose de certains éléments sur les mouvements de l'espèce pour définir le paramétrage des flux potentiels.

a UMR 6049 ThéMA, 32 rue Megevand 25030 Besançon cedex,  
CNRS-Université Bourgogne Franche-Comté

\* [jean-christophe.foltete@univ-fcomte.fr](mailto:jean-christophe.foltete@univ-fcomte.fr)

# 7 Intégration de la connectivité régionale dans la restauration de mares : approche combinée modélisation/dire d'experts

Céline Clauzel <sup>a\*</sup>  
Cyrielle Bannwarth <sup>b</sup>

## Problématique

La restauration d'habitats naturels est une des actions possibles pour réduire la fragmentation paysagère. Cette restauration consiste à réhabiliter des habitats anciens et/ou dégradés ou à créer de nouveaux habitats dans des zones favorables. Actuellement, les opérations de restauration s'appuient sur la connaissance locale des experts de terrain pour sélectionner ces zones favorables. Mais pour certaines espèces ayant besoin de se déplacer, comme la rainette arboricole (*Hyla arborea*), la viabilité à long terme de la population dépend d'une bonne connexion régionale entre les taches d'habitat, permettant ainsi un échange régulier des individus. Il est donc nécessaire d'avoir une approche plus globale dans la recherche des sites potentiels de restauration.

Notre étude a consisté à mettre en place un

protocole méthodologique systématique pour rechercher les meilleurs emplacements pour la création de nouvelles taches d'habitat, c'est-à-dire ceux qui permettent le plus d'augmenter la connectivité régionale. L'étude s'est déroulée dans la région Bourgogne-Franche-Comté, impactée par l'implantation de la LGV Rhin-Rhône en 2011. La LPO et le Conseil Général du Doubs ont décidé de mener des opérations de restauration/création de 10 mares sur le périmètre d'un espace naturel sensible. Leur localisation a été définie par les experts de la LPO, à partir d'une bonne connaissance locale du terrain. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'intérêt des graphes paysagers pour localiser ces nouvelles taches d'habitat, et de comparer les résultats avec les emplacements suggérés par les experts.

## Zone d'étude

L'espace naturel sensible a une superficie de 53 km<sup>2</sup>. Cette zone est considérée comme « fragile » avec une haute valeur environnementale et des mesures spécifiques sont prévues pour préserver la qualité des milieux. Elle est une des zones principales de présence de plusieurs espèces d'amphibiens menacés en Bourgogne-Franche-Comté, comme le Sonneur à ventre jaune (*Bombina variegata*), le Crapaud calamite (*Bufo calamita*) ou encore la rainette arboricole. Depuis décembre 2011, la zone est traversée par la LGV Rhin-Rhône supposée agir comme une barrière vis-à-vis des déplacements des animaux, notamment les amphibiens.

## Données utilisées

Une carte d'occupation du sol a été créée en combinant plusieurs sources de données (BD TOPO, BD Zones Humides, RPG) et numérisée à une résolution spatiale de 10 m. Les données de présence de la rainette arboricole proviennent des relevés d'observation de la LPO réalisés entre 2006 et 2013. Chaque plan d'eau connu comme étant ou ayant été un site de reproduction ainsi que les plans d'eau potentiellement favorables ont été prospectés au moins 3 fois chaque année pour augmenter la probabilité de détection.

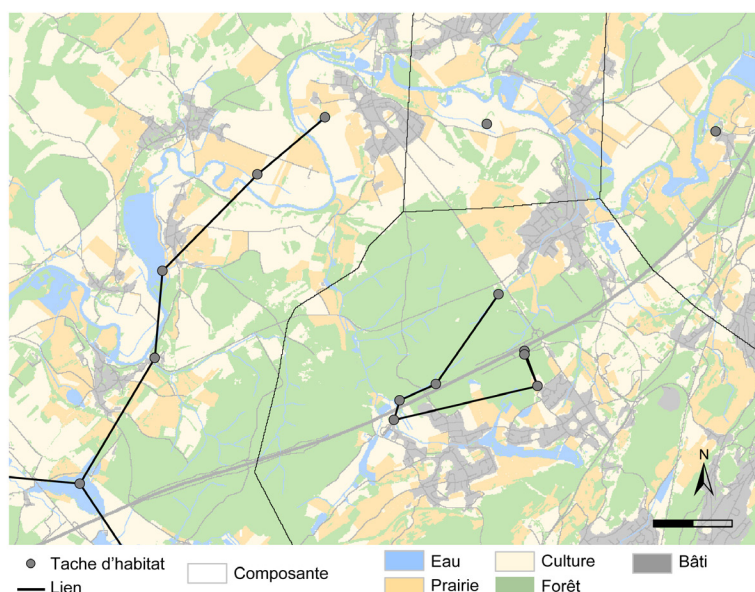


Figure 1 : Graphe modélisant le réseau écologique de la rainette arboricole sur l'espace naturel sensible



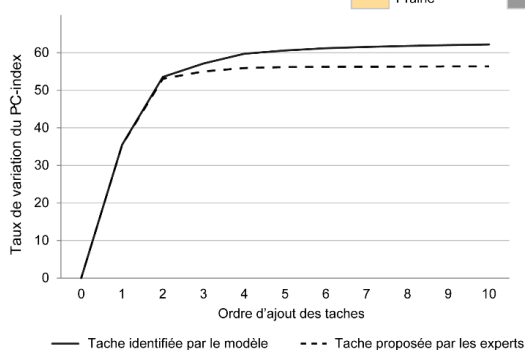
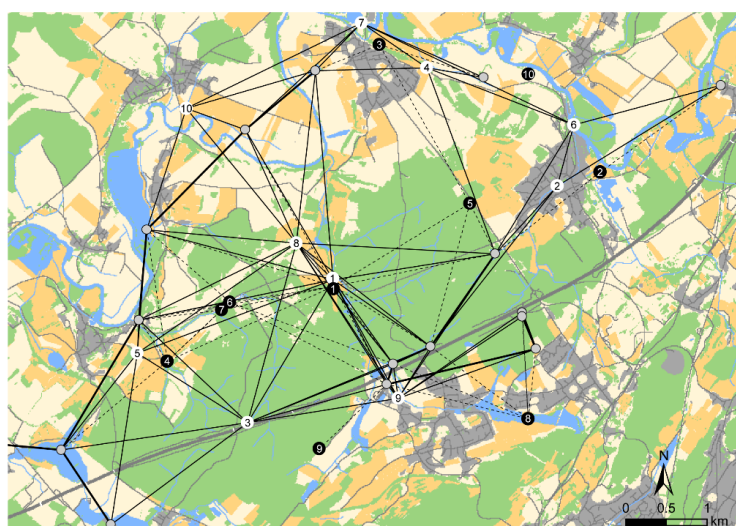
## Méthode

Afin de comparer les résultats issus de la modélisation avec les emplacements décidés par les experts, l'analyse s'est focalisée uniquement sur les plans d'eau effectivement utilisés par l'espèce, c'est-à-dire les plans d'eau où la présence de la rainette a été détectée depuis 2006. Grâce à cette sélection, la recherche des meilleurs emplacements pour créer de nouvelles mares s'appuie sur le même jeu de données que celui utilisé par les experts.

Le protocole méthodologique pour rechercher de manière systématique les meilleurs emplacements pour maximiser la connectivité est basé sur la méthode proposée dans Foltête *et al.* (2014). A partir du graphe représentant le réseau écologique, une métrique globale quantifiant la connectivité du réseau initial est calculée. Une grille est ensuite appliquée sur la carte d'occupation du sol et chaque cellule est testée comme emplacement potentiel pour une nouvelle tache d'habitat. L'algorithme de recherche ajoute virtuellement une tache d'habitat au centroïde de la cellule ainsi que les nouveaux liens connectant cette nouvelle tache aux taches existantes si

## Paramètres utilisés dans Graphab

|                            |                  |
|----------------------------|------------------|
| Connexité                  | 8                |
| Taille minimale des taches | 0 ha             |
| Distance                   | 2 500m           |
| Type de distance           | Dispersion       |
| Probabilité de mouvement   | 0,05             |
| Impédance                  | Coût             |
| Echelle des coûts          | 1, 10, 100, 1000 |
| Topologie                  | Complet          |



leur distance est inférieure à la distance de dispersion utilisée pour seuiliser le graphe. Après chaque ajout, la métrique globale est recalculée ainsi que son taux de variation par rapport à la valeur initiale. Une fois toutes les cellules testées, l'algorithme valide celle où l'ajout d'une nouvelle tache a produit la plus forte augmentation de la valeur de la métrique. Le processus est répété jusqu'au nombre souhaité de nouvelles taches à créer (ici 10) en intégrant les changements de topologie dans le graphe induit par l'ajout des taches précédentes.

La recherche des meilleurs emplacements a été limitée aux zones favorables à la rainette arboricole (lisières forestières, milieux humides, prairies) afin d'éviter de créer de nouvelles taches dans des milieux écologiquement inappropriés.

Enfin, la même démarche a également été appliquée aux 10 emplacements déjà décidés par les experts dans l'optique de les hiérarchiser.

## Résultats

Le réseau écologique apparaît très fragmenté avec une très faible densité de taches et de connexions en raison de la présence de cultures et de la LGV Rhin-Rhône (Figure 1). Les courbes de connectivité montrent une variation similaire des valeurs de PC pour chaque nouvelle tache implémentée par le processus itératif ou suggérée par les experts. Dans les deux cas, la valeur augmente fortement avec les 2 premières taches ajoutées (+55 %) puis tend à se stabiliser. A partir de la 4ème tache ajoutée, la modélisation fournit un taux de variation du PC de 4 points supérieurs à l'approche « experts » (Figure 2).

Figure 2 : Localisation des nouvelles taches pour maximiser la connectivité sur l'ENS

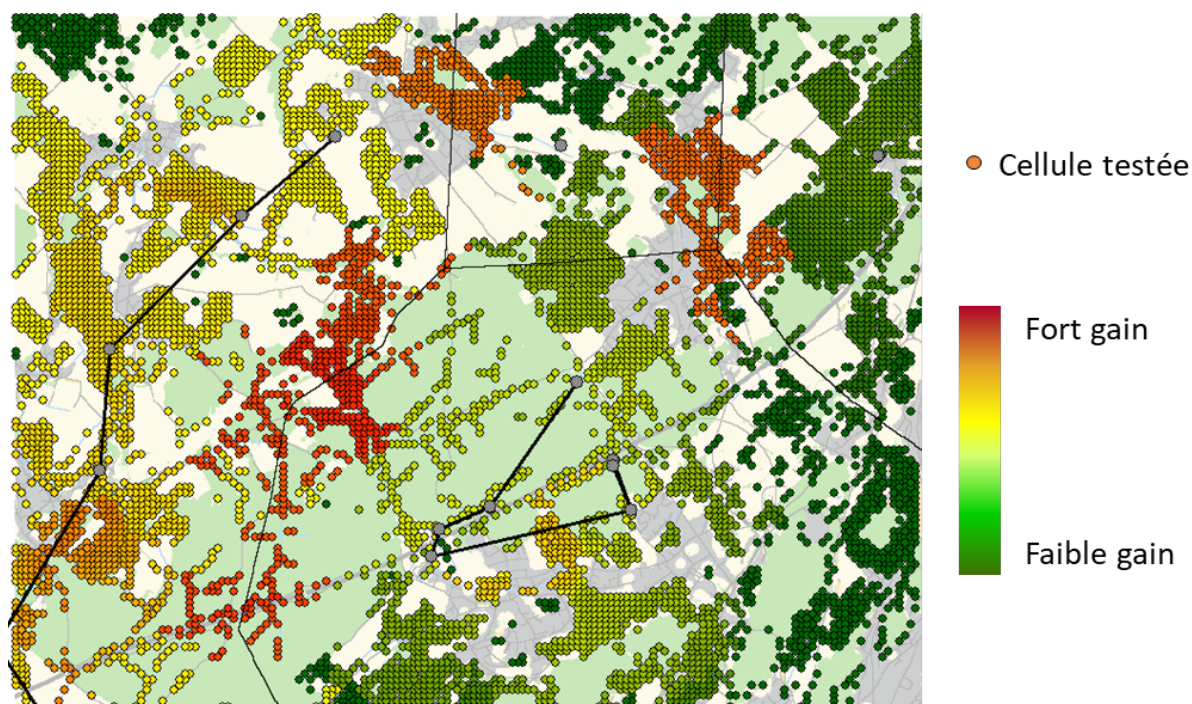


Figure 3 : Hiérarchisation des cellules en fonction du gain en connectivité procuré par l'ajout de la première mare. La recherche a été restreinte spatialement à un ensemble de zones écologiquement pertinentes.

Les résultats cartographiques permettent d'identifier les zones stratégiques pour l'amélioration de la connectivité. Les parties centrales et à l'est apparaissent comme les plus importantes dans les deux approches. La première tache ajoutée permet, dans les deux cas, de reconnecter les deux principales composantes du réseau. La deuxième tache ajoutée connecte un plan d'eau isolé au nord-est au reste du réseau. La troisième tache ajoutée par le modèle améliore les connexions entre le sud, le centre et l'ouest, grâce à des liens utilisant les lisières forestières et les passages à faune permettant de traverser la LGV. La hiérarchisation des 10 emplacements suggérés par les experts montre qu'à partir de la troisième mare ajoutée, la connectivité n'est quasiment plus améliorée. Cela doit néanmoins être nuancé, car même si la connectivité globale n'est plus améliorée, la simple augmentation du nombre de mares dans le réseau est, en soi, bénéfique pour la viabilité des populations de rainettes.

Les deux approches apparaissent finalement complémentaires. La méthode d'ajout de taches permet d'identifier les zones stratégiques d'un réseau pour améliorer la connectivité régionale (Figure 3). Elle renseigne également sur le nombre de taches à créer pour atteindre un niveau de connectivité souhaité. La connaissance locale des experts permet ensuite de préciser l'emplacement exact à l'intérieur de cette zone en intégrant les facteurs locaux (microtopographie, ombre des arbres, proximité à des cultures, etc.). Cette expertise locale permet par exemple de questionner la localisation de certaines taches proposées par le modèle, comme la n°10 (en blanc) qui obligerait les individus à traverser la rivière pour rejoindre les autres

taches, ou la n°2 (en blanc) ajoutée dans une ripisylve en milieu urbain et qui serait plus appropriée dans le milieu prairial à proximité comme suggéré par les experts. Ce genre de résultat, a priori non pertinent, est lié au nécessaire compromis à trouver entre le degré de réalisme de la modélisation, les données à acquérir et les temps de calcul. Une résolution plus fine de la carte d'occupation du sol aurait par exemple permis de dissocier les berges des rivières (favorables) et la rivière elle-même (défavorable), mais au prix d'un allongement considérable des temps de calcul.

a UMR 7533 CNRS, LADYSS ; Université Paris Diderot.

\* [celine.clauzel@univ-paris-diderot.fr](mailto:celine.clauzel@univ-paris-diderot.fr)

b LPO Franche-Comté, Maison de l'Environnement de Franche-Comté, Besançon

# 8

## Restauration de la connectivité écologique : proposition méthodologique pour une localisation optimisée des passages à faune

Xavier Girardet <sup>a\*</sup>

### Problématique

Les choix de localisation de ces passages le long d'une infrastructure sont le fruit d'une concertation entre les acteurs locaux et les experts des associations naturalistes. Fondés sur une connaissance locale du terrain, ces choix prennent rarement en compte le rôle de la connectivité du paysage à l'échelle régionale et reposent sur un diagnostic fortement dépendant de la spécialité des experts mandatés. Il pourrait donc être intéressant de coupler cette expertise avec une approche de modélisation spatiale, d'une part pour fonder la démarche sur un processus explicite et reproductible, d'autre

part pour chercher à optimiser les localisations et identifier le meilleur compromis entre le gain de connectivité et le coût économique des passages à faune.

L'objectif de cette étude est de présenter une nouvelle méthode, s'appuyant sur les graphes paysagers, pour aider à la restauration de la connectivité d'un réseau écologique perturbé par une infrastructure existante. L'hypothèse soutenue est que le maintien de la connectivité globale du réseau dépend davantage d'une répartition des passages à faune en fonction de la structure du paysage à l'échelle régionale, que d'une répartition régulière le long de l'infrastructure. Cette méthode permet de rétablir un niveau de connectivité théorique équivalent au niveau de connectivité du réseau écologique initial, en testant tour à tour l'apport de chaque passage potentiel dans la connectivité globale du paysage. Elle est appliquée à la localisation de passages à faune spécifiques à un ensemble d'espèces forestières le long de la ligne à grande vitesse (LGV) Rhin-Rhône, en Bourgogne-Franche-Comté (France).

### Profil : 100 ha - 10 km

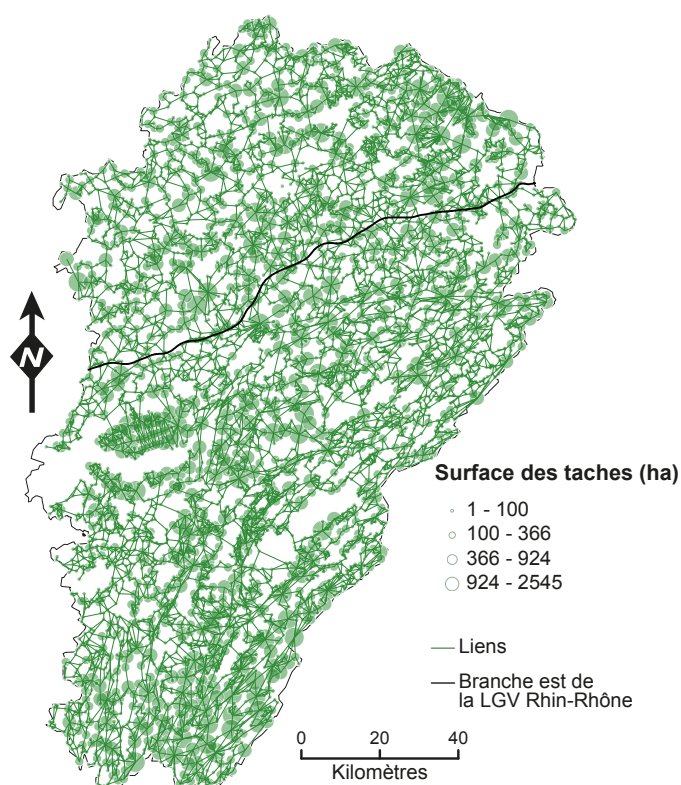


Figure 1 : Représentation topologique du graphe paysager d'un profil d'espèce forestière en Franche-Comté.

### Zone d'étude

La branche Est de la LGV Rhin-Rhône relie Auxonne (Bourgogne) à Mulhouse (Alsace) par un tracé de 138 km traversant d'ouest en est la région Bourgogne-Franche-Comté. Elle a été inaugurée en décembre 2011. Elle s'intègre dans un territoire composé majoritairement de forêts, de prairies, de cultures et de zones artificialisées. Le relief de la région est caractérisé par une succession de plateaux au sud-est, et est traversé par quatre vallées dans sa partie centrale et occidentale. Pour intégrer la dimension régionale des réseaux écologiques, l'analyse porte sur une large zone encadrant la LGV, s'étendant sur 16 202 km<sup>2</sup>.

### Données utilisées

Une carte d'occupation du sol a été construite à partir de plusieurs sources de données. Les différents éléments d'occupation du sol sont convertis au format raster à une résolution de 10 mètres pour offrir un bon compromis entre la taille de l'image



## Paramètres utilisés dans Graphab

|                            |                       |          |           |
|----------------------------|-----------------------|----------|-----------|
| Connexité                  | 4                     |          |           |
| Taille minimale des taches | 1 ha                  | 100 ha   | 1 000 ha  |
| Distance                   | 1 000 m               | 10 000 m | 100 000 m |
| Type de distance           | Dispersion            |          |           |
| Probabilité de mouvement   | 0,05                  |          |           |
| Impédance                  | Coût                  |          |           |
| Echelle des coûts          | 1, 10, 50, 100, 1 000 |          |           |
| Topologie                  | Planaire              |          |           |

produite et l'étendue spatiale de la zone d'étude. Cette résolution permet de limiter la surreprésentation des petits éléments du paysage comme les haies. A l'inverse, le tracé des axes principaux de transport a été dilaté de 2 pixels de façon à représenter leur largeur réelle, tout en comblant les éventuelles discontinuités artificiellement produites par la conversion du format vectoriel au format matriciel. Finalement, une carte regroupant 10 classes d'occupation du sol a été obtenue.

Nous avons opté pour une modélisation par « profil d'espèces », selon la même démarche que Minor et Lookingbill (2010). A partir des taches d'habitat forestier, trois profils ont été établis en fonction de la taille minimale des taches et de la distance de dispersion. Le premier profil correspond aux petits mammifères dont la taille minimale des taches est de 1 ha et dont la distance de dispersion est de 1 km. Le deuxième profil (mammifères moyens) correspond à 100 ha et 10 km, et le troisième (grands mammifères) à 1 000 ha et 100 km.

## Méthode

Pour construire un modèle écologiquement pertinent, la distance effective entre les taches, autrement appelée distance-coût, est préférée à la distance euclidienne. Dans cette étude, les valeurs échelonnées de 1 pour l'habitat à 1000 pour les éléments défavorables ont été définies à partir d'une synthèse bibliographique et de dires d'experts ; ces valeurs sont identiques pour les 3 profils précédemment identifiés.

L'analyse consiste ensuite à construire, pour chaque profil, un graphe paysager modélisant le réseau écologique d'une espèce. Ce graphe représente théoriquement l'état initial du réseau écologique avant la construction de l'infrastructure.

À partir de chaque graphe, l'objectif est d'identifier les meilleurs emplacements pour restaurer la connectivité en testant, un par un, les liens traversant l'infrastructure et en retenant celui qui maximise la connectivité. La méthode développée part d'une situation où l'infrastructure est considérée comme une barrière totalement imperméable. Cette situation se traduit par la construction d'un graphe où tous les liens traversant l'infrastructure sont supprimés. A ce stade, le niveau global de connectivité est évalué.

Ensuite, un processus itératif va être répété autant de fois que de passages à faune à créer. A chaque itération tous les liens initialement supprimés (et non sélectionnés lors des itérations précédentes) sont considérés comme candidats pour la localisation d'un passage à faune. Leur contribution à la connectivité est évaluée en simulant leur ajout au graphe issu de l'étape précédente, et en calculant leur contribution à l'augmentation de la

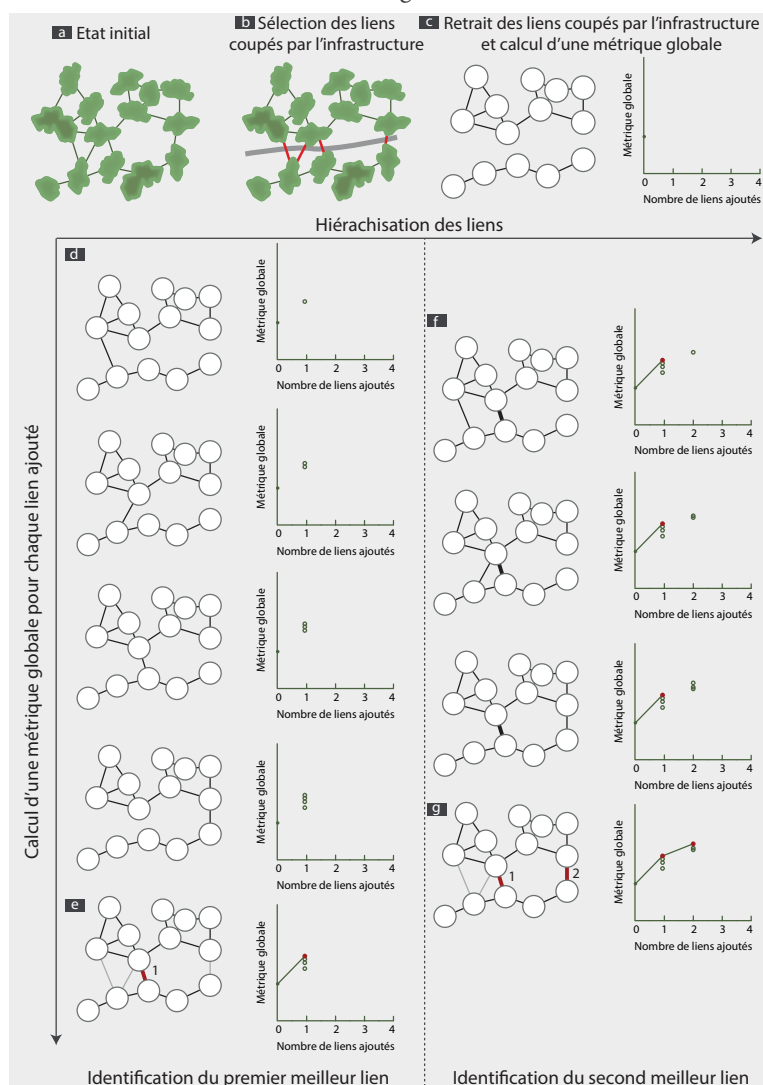


Figure 2 : Test itératif de chaque lien candidat pour la localisation de passages à faune. Parmi les liens coupés par une infrastructure (a et b), l'analyse identifie tout d'abord le premier lien à ajouter dans le graphe paysager pour maximiser une métrique de connectivité calculée à l'échelle du graphe entier (d et e). Dans un second temps, elle identifie ensuite itérativement les meilleurs liens suivants à ajouter au graphe paysager (f et g).



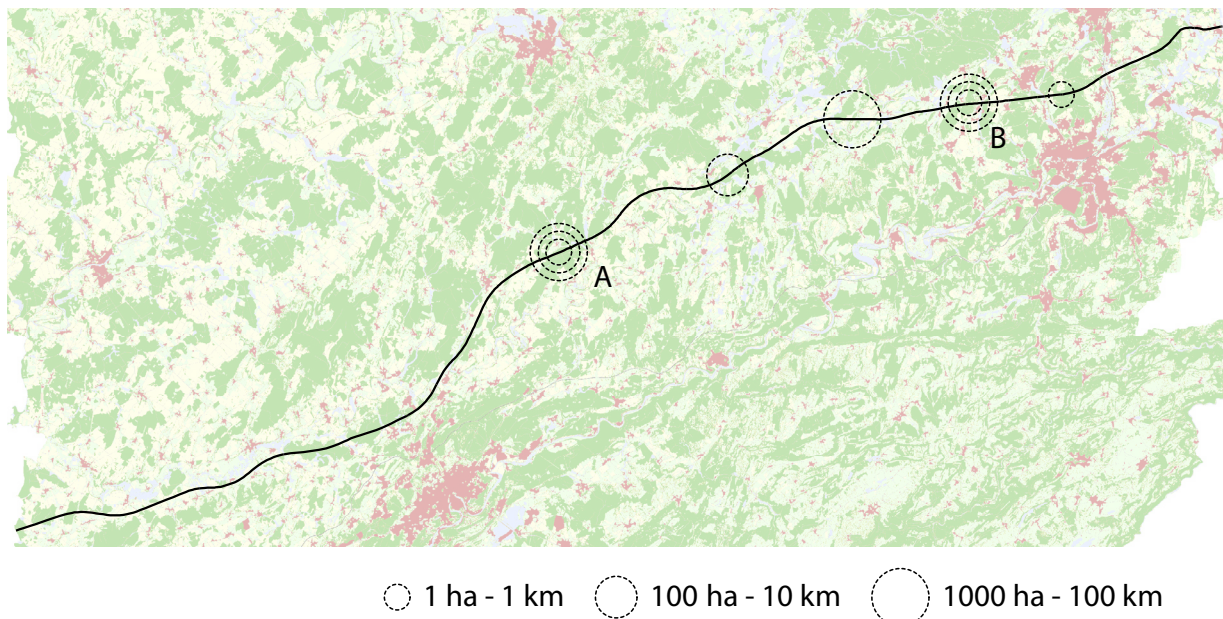


Figure 3 : Localisation des 3 passages à faune potentiels pour chaque profil d'espèces forestières

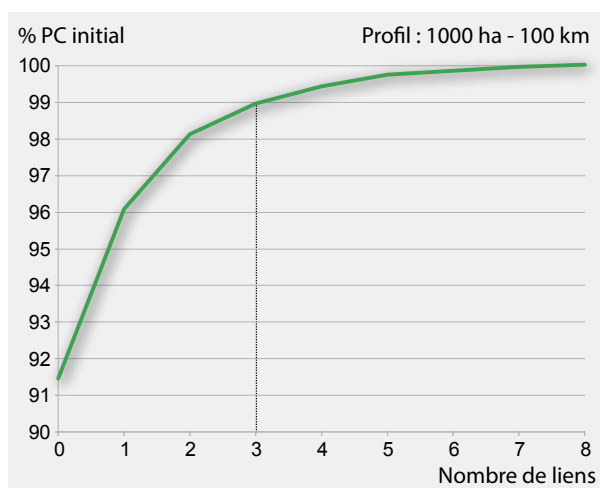


Figure 4 : Exemple de la contribution à la connectivité globale du graphe paysager de chaque lien ajouté pour un profil espèce.

connectivité globale, exprimée sous la forme d'un gain. Le lien qui apporte le gain le plus fort est validé, c'est-à-dire intégré au graphe. Cette itération peut être réalisée pour tous les liens candidats jusqu'à obtenir un niveau de connectivité souhaité ou jusqu'à un nombre de passages à aménager défini a priori.

### Résultats

Le nombre de liens coupés par l'infrastructure varie en fonction du profil d'espèce et du seuillage du graphe. Le profil 1 compte 120 liens, le profil 2 compte 90 liens, et le profil 3 en compte 8. Pour chaque graphe, tous les liens sont testés et les 10 meilleurs (ou 8 pour le profil 3) sont conservés. Les résultats montrent que pour tous les profils, les meilleurs passages potentiels ne sont pas distribués régulièrement le long de l'infrastructure. Leur

localisation est dépendante de la configuration globale du paysage, et notamment de la densité de forêts. Le calcul du gain de connectivité apporté par les passages potentiels montre que pour chacun des 3 profils, 3 liens suffisent théoriquement à restaurer à plus de 99 % la connectivité initiale.

La localisation des 8 liens sélectionnés le long de la LGV fait ressortir deux zones stratégiques pour les trois profils d'espèces. Le point A est situé au sud des plateaux calcaires centraux de Haute-Saône. Le tronçon de LGV près de ce point ne présente aucun passage spécifiquement aménagé pour la faune. Néanmoins, deux viaducs sont présents près du point défini par le modèle. On peut supposer que ces ouvrages offrent à la faune une capacité de traversée très importante. Trois franchissements dédiés au réseau routier sont également présents à l'ouest. Le point B est situé plus à l'est, près de l'agglomération Belfort-Montbéliard. En plus d'un viaduc, on relève deux aménagements dédiés à la faune : une tranchée couverte et un passage à faune supérieur. Cette tranchée couverte est la seule réalisée le long des 138 km de tracé. Elle offre une capacité de déplacement maximum à la faune puisqu'à cet endroit, le paysage n'a pas été modifié par la construction de l'infrastructure. Cette comparaison permet de montrer l'intérêt de l'approche méthodologique proposée, ici les aménagements réalisés viennent confirmer les points de passage potentiels identifiés par le modèle.

a UMR 6049 ThéMA, 32 rue Megevand 25030 Besançon cedex, CNRS-Université Bourgogne Franche-Comté

\* [xavier.girardet@univ-fcomte.fr](mailto:xavier.girardet@univ-fcomte.fr)

# 9 Création et réhabilitation de passages à faune favorables à plusieurs espèces : cas d'étude dans le Grésivaudan

Céline Clauzel <sup>a\*</sup>Anne Mimet <sup>b</sup>Jean-Christophe Foltête <sup>c</sup>

## Problématique

Le développement des infrastructures de transport engendre d'importantes conséquences sur les déplacements de la faune. Sur les lignes à grande vitesse, les clôtures des deux côtés de la voie combinées au volume et la vitesse du trafic rendent les réseaux très difficiles à traverser, entraînant un isolement plus grand des populations animales, les rendant ainsi plus sensibles au risque d'extinction. Pour atténuer ces effets, la construction de passages à faune s'est largement répandue depuis 30 ans. Pour être efficaces, ces structures doivent être localisées à proximité des corridors écologiques et doivent être pensés en amont des projets d'infrastructures. Les méthodes pour identifier les meilleures localisations sont diverses : données d'écrasement pour identifier les tronçons les plus fréquemment traversés par les animaux, traces GPS pour observer les déplacements précis, analyse de la composition

et de la configuration paysagère aux alentours de l'infrastructure. Un des enjeux est d'identifier des emplacements qui permettent d'améliorer la connectivité globale pour un ensemble d'espèces, notamment des espèces aux habitats variés.

L'étude présentée ici vise à mettre en place un protocole méthodologique, basé sur la théorie des graphes, pour répondre à cet enjeu. Deux scénarios sont étudiés. Un scénario « autoroute infranchissable » correspond au cas où l'analyse est menée en amont du projet de construction de l'infrastructure pour sélectionner les meilleurs emplacements pour les futurs passages à faune. L'autre scénario, « autoroute franchissable », s'applique à une infrastructure déjà en place et vise à améliorer la perméabilité de points de franchissement existants (viaducs, ponts, tunnels) qui peuvent occasionnellement être utilisés par les animaux.

## Zone d'étude

La vallée de l'Isère située au nord de l'agglomération de Grenoble, appelée Grésivaudan, est au cœur d'enjeux écologiques importants. Cette vallée d'environ 70 km de long sépare trois massifs montagneux, Grande Chartreuse, Vercors et Belledonne, au potentiel écologique relativement préservé. Le long de l'Isère, des milieux alluviaux maintiennent une biodiversité remarquable, alors que le reste de la vallée est soumis à une très forte pression anthropique, en raison notamment de l'étalement de l'agglomération grenobloise. Plusieurs infrastructures de transport traversent cette vallée, notamment les autoroutes A41 et A48. Dans ce contexte s'est mis en place le projet « Couloirs de vie » (2008-2014), financé par plusieurs partenaires et piloté par le Conseil Général de l'Isère. Ce projet visait à protéger et améliorer les connexions biologiques, et a permis de réunir un ensemble important de données décrivant l'occupation du sol à échelle fine, les infrastructures de transport et leurs aménagements, les enjeux de biodiversité (relevés d'espèces, pièges photographiques, relevés de collision faune-véhicules).

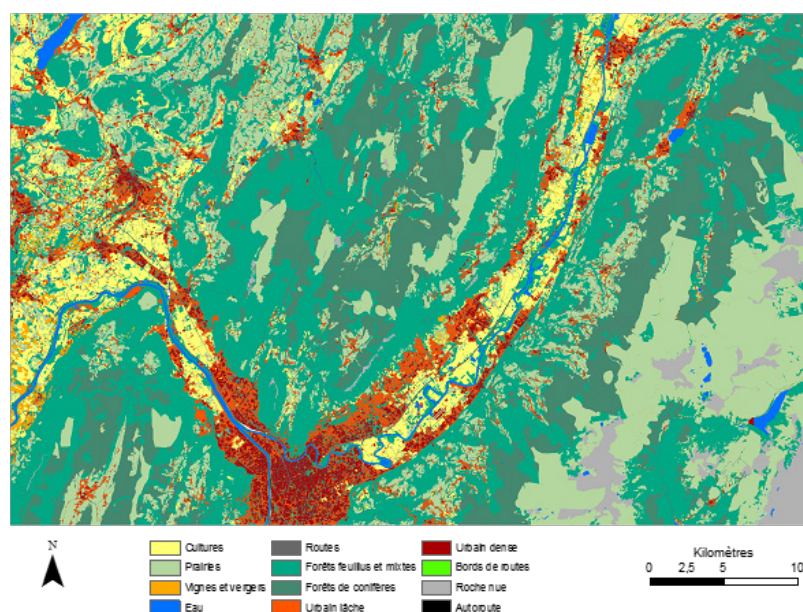


Figure 1 : Carte d'occupation du sol de la zone d'étude



## Méthode

La méthode est basée sur cinq étapes successives : (1) définition des groupes d'espèces, (2) cartographie de l'occupation du sol, (3) construction des graphes paysagers qui modélisent le réseau écologique de chaque groupe d'espèce, (4) hiérarchisation des passages à faune potentiels en fonction du gain de connectivité qu'ils sont susceptibles d'apporter, (5) intégration des résultats pour un diagnostic multi-espèces.

A partir de la liste des 87 espèces de mammifères vivant dans la région, 8 groupes d'espèces virtuelles ont été définis en fonction de leurs caractéristiques biologiques (régime alimentaire, masse corporelle) et de leurs capacités de dispersion. Ils se répartissent en 5 grands types d'habitat : forêt ; forêt de feuillus ; forêt et milieux ouverts ; milieux ouverts et prairies ; milieux ouverts de montagne.

Pour chacun des 8 groupes, un graphe est construit selon le principe des métataches (Zetterberg *et al.*, 2010). La modélisation des métataches (Figure 2) consiste à construire un premier graphe représentant l'échelle des individus et des déplacements quotidiens. Sur ce graphe, ne sont retenues que les métataches viables (c'est-à-

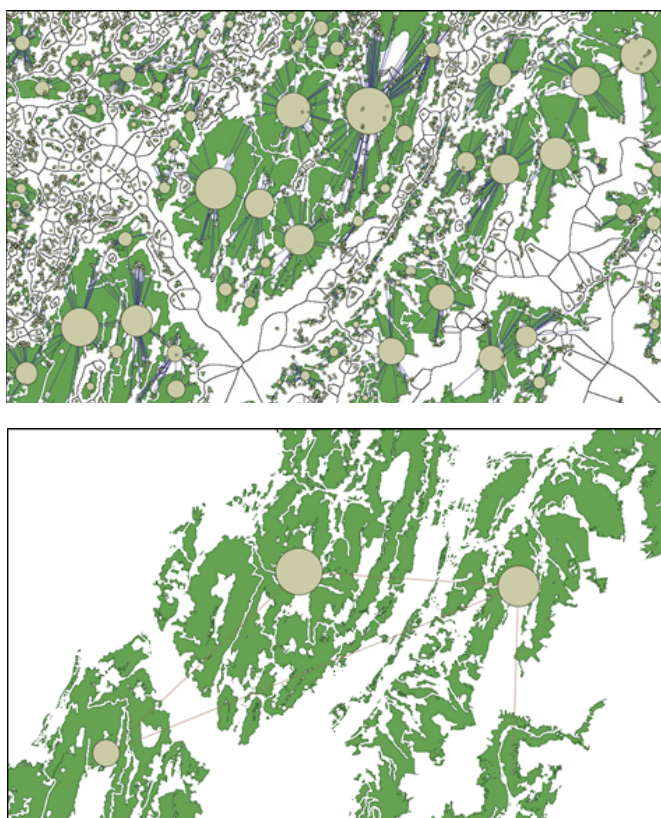


Figure 2 : Graphes modélisant le réseau écologique du groupe « petits mammifères forestiers » à l'échelle des déplacements quotidiens (en haut) et des événements de dispersion (en bas). Les taches d'habitat (en vert) qui appartenaient à des métataches non viables ne figurent pas parmi les taches du second graphe mais interviennent dans la matrice paysagère comme des éléments favorables aux déplacements.

## Paramètres utilisés dans Graphab

|                            |                                    |
|----------------------------|------------------------------------|
| Connexité                  | 8                                  |
| Taille minimale des taches | 25 ha à 26000 ha selon les espèces |
| Distance                   | 1,7 à 44 km selon les espèces      |
| Type de distance           | Quotidien et Dispersion            |
| Probabilité de mouvement   | 0,5                                |
| Impédance                  | Coût                               |
| Echelle des coûts          | 1 à 1 000 000                      |
| Topologie                  | Complet                            |

dire les composantes dont la superficie d'habitat est supérieure à l'espace vital nécessaire). Un second graphe est ensuite construit en considérant ces métataches comme des nœuds, potentiellement connectés par des mouvements de dispersion entre des populations viables.

A partir de ces graphes, l'objectif est de trouver les meilleurs emplacements pour les passages potentiels afin d'améliorer la connectivité. Dans les deux scénarios, la méthode de hiérarchisation est similaire ; seul le nombre de points testés change (100 pour le scénario franchissable, 643 pour le scénario infranchissable). La méthode (Foltête *et al.*, 2014) consiste à calculer une métrique globale quantifiant la connectivité initiale de l'ensemble du réseau, puis évaluer la contribution potentielle d'un passage sur le tracé de l'autoroute en calculant l'augmentation de la métrique globale induite par ce nouvel élément. La comparaison du gain de connectivité apporté par chaque ajout permet d'identifier la meilleure localisation pour l'aménagement ou la création d'un passage à faune. Pour l'ensemble de ces calculs, la connectivité est quantifiée par la métrique Probabilité de Connectivité (PC) (Saura, et Pascual-Hortal, 2007).

## Données utilisées

Une carte de l'occupation du sol a été réalisée par compilation, hiérarchisation et traitement de données provenant de différentes sources : la BD TOPO (bâti, forêts, routes, voies ferrées, réseau hydrographique) ; le Registre Parcellaire Graphique (espaces agricoles) ; Corine Land Cover pour les zones non renseignées. Au total 12 types d'occupation du sol ont été obtenus et rassemblés dans un fichier raster à une résolution de 10 m (Figure 1).

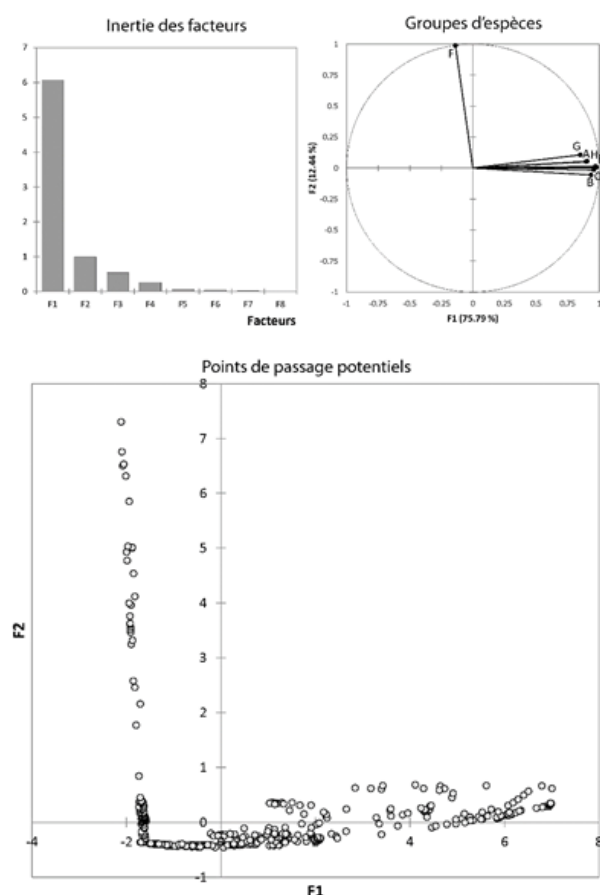


Figure 3 : Analyse en Composantes Principales des gains de connectivité pour le scénario d'autoroute infranchissable.

Les valeurs de résistance attribuées à chaque type d'occupation du sol sont pondérées par la pente. La valeur du coefficient est déterminée de façon à ce qu'une pente de 50° soit aussi difficile à parcourir que les éléments les plus défavorables. Cette valeur a été réduite pour les espèces montagnardes, moins impactées par la pente dans leurs déplacements.

## Résultats

Le gain maximal apporté par le meilleur point de passage varie fortement selon les espèces : de 0,004 % pour le groupe « petits herbivores de montagne » (type Marmotte) à 9,9 % pour le groupe « petits carnivores forestiers » (type Martre) pour le scénario franchissable ; et de 0.003 % pour les « petits herbivores de montagne » (type Marmotte) à 75 % pour les « grands carnivores forestiers » (type Lynx).

Une analyse en composantes principales (Figure 3) permet de synthétiser l'information et d'identifier les passages qui améliorent la connectivité pour un maximum d'espèces. Les résultats sont globalement similaires dans les deux scénarios. La construction de passages à faune bénéficie à tous les groupes à la fois, sauf le groupe « petits herbivores de milieu ouvert » (F sur la Figure 3) dont la recherche d'une meilleure fonctionnalité de cet habitat n'est pas compatible avec les autres groupes. Toutefois, l'apport de connectivité vis-à-vis des petits et grands herbivores montagnards est marginal, ce qui corrobore la faible probabilité supposée que ces espèces traversent la vallée. L'analyse suggère ici que la prise en compte de ces groupes n'a pas d'impact fort sur les résultats, mais que les lieux intéressants pour la reconnexion des autres groupes pourraient éventuellement servir à ces espèces montagnardes.



Figure 4 : Localisation optimale des passages à faune pour le scénario autoroute infranchissable (axe 1 de l'ACP) pour l'ensemble des espèces, excepté celles de milieu ouvert. Du beige au marron foncé, la contribution des points de passage à la connectivité est croissante.

Une seule zone, à l'Est, concentre tous les tronçons optimaux et très favorables (Figure 4). La densité de la ripisylve autour de l'Isère explique probablement l'intérêt de cette zone pour la reconnexion entre les massifs de Chartreuse et de Belledonne, malgré la proximité avec les zones bâties de la commune de la Terrasse.

a UMR 7533 CNRS, LADYSS ; Université Paris Diderot

\* [celine.clauzel@univ-paris-diderot.fr](mailto:celine.clauzel@univ-paris-diderot.fr)

b Biodiversity Synthesis, German Centre for Integrative Biodiversity Research (iDiv), Leipzig, Germany.

c UMR 6049 ThéMA, 32 rue Megevand 25030 Besançon cedex, CNRS-Université Bourgogne Franche-Comté



# 10 Mesures agro-environnementales : soutenir la lutte contre le campagnol terrestre à l'échelle du paysage

Elodie Perrot <sup>a\*</sup>  
Xavier Girardet <sup>a,b</sup>

## Problématique

En zone de moyenne montagne, les prairies se couvrent cycliquement et rapidement d'indices de présence de campagnols terrestres (Couval *et al.*, 2014). Les pullulations causent des dégâts aux prairies et bouleversent le fonctionnement des exploitations agricoles. Le phénomène est multifactoriel, mais la part des prairies permanentes dans la Surface Agricole Utile (SAU) augmente le risque de pullulation lorsque ce ratio dépasse 70 à 80 % (Giraudoux *et al.*, 1997).

Le concept de lutte raisonnée mobilise des méthodes de lutte directe et indirecte qui se déclinent à différentes échelles : parcelle, exploitation et paysage. L'objectif ici est d'aider les agriculteurs à identifier les îlots agricoles prioritaires sur lesquels définir une stratégie de lutte (gestion paysagère et/ou pratiques agricoles) dans le but de limiter la diffusion des campagnols terrestres à l'échelle du territoire et leurs impacts sur les exploitations agricoles. Cette hiérarchisation des îlots agricoles s'appuie sur la modélisation du réseau de prairies par les graphes paysagers à l'échelle de la commune.

Le projet Campagraphe, dans lequel cette application s'inscrit, a été mené dans le cadre d'un programme de recherche DIVA « Action

publique, Agriculture et Biodiversité » et la FREDON Auvergne et VetAgroSup en 2015.

## Zone d'étude

L'étude porte sur deux communes auvergnates : Siaugues-Saint-Marie (43) et Briffons (63). Ici, seul le cas de Briffons est développé mais la démarche est la même sur les deux communes.

La SAU de Briffons est de 2 256 hectares et se compose majoritairement de surfaces toujours en herbe (STH = 2 175 hectares) et de quelques surfaces labourables (81 hectares) (DISAR, 2014). Le rapport STH/SAU est de 96 %, c'est donc une commune sensible aux pullulations.

Les agriculteurs de cette commune sont actifs dans la lutte contre les campagnols terrestres et privilégient les méthodes de lutte directe (surveillance, piégeage, lutte chimique). L'ensemble des agriculteurs souhaitent renforcer la lutte collective sur la commune pour améliorer son efficacité.

## Données utilisées

Pour modéliser le réseau de prairies, une carte d'occupation du sol a été réalisée à partir de deux sources de données :

-BD TOPO (IGN) : surfaces boisées, hydrographie, bâti et réseaux de transports ;

-RPG 2014 (Agence Service et de Paiement) : types d'usages agricoles des îlots.

Ces données au format vectoriel ont été associées dans un fichier au format raster à une résolution de 10 mètres. La carte distingue 10 catégories d'occupation du sol : prairies, cultures, bâti, réseaux de transport, haies, forêts de feuillus, forêts de conifères, forêts mixtes, surfaces et cours d'eau.

## Méthode

L'analyse a été menée en deux temps. Des entretiens semi-directifs ont été menés en premier lieu auprès d'agriculteurs pour (1) connaître les



Figure 1 : Occupation du sol de la commune de Briffons (2010)

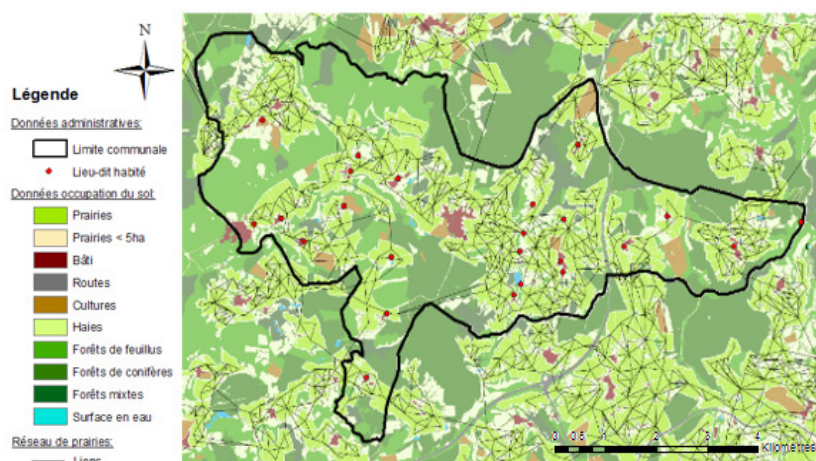


Figure 2: Réseau de prairies (Graphe Planaire - Vue topologique)

moyens qu'ils mettent en place pour lutter contre les campagnols terrestres et (2) identifier les freins et les leviers existants pour renforcer la lutte à l'échelle de leur exploitation agricole.

Le réseau de prairies de la commune a ensuite été modélisé par un graphe paysager. Les taches d'habitat des campagnols terrestres ont été identifiées à partir de la classe « prairie » de la carte d'occupation du sol. Seules les taches supérieures à 5 hectares ont été conservées et classées comme habitat, le reste des espaces prairiaux ont été classés en éléments favorables aux déplacements. Afin de calculer les chemins de moindre coût entre les taches d'habitat, une valeur de résistance a été attribuée à chaque classe d'occupation du sol.

### Paramètres utilisés dans Graphab

|                            |                  |
|----------------------------|------------------|
| Connexité                  | 4                |
| Taille minimale des taches | 5 ha             |
| Distance                   | 1 500m           |
| Type de distance           | Dispersion       |
| Probabilité de mouvement   | 0,5              |
| Impédance                  | Coût             |
| Echelle des coûts          | 1, 25, 50, 1 000 |
| Topologie                  | Planaire         |

Pour identifier les 30 îlots prioritaires du réseau de prairies dans lesquels les pratiques agricoles peuvent être modifiées, chaque nœud du graphe (îlot candidat à la conversion) est retiré itérativement. A chaque retrait, le taux de variation de la métrique globale PC (Probabilité de Connectivité) est calculé pour quantifier l'importance du nœud retiré dans la connectivité globale du réseau.

Deux scénarii ont ainsi été testés :

- un scénario « directif » : l'ensemble des nœuds du graphe sont candidats à la conversion, ils sont testés puis hiérarchisés (1021 nœuds testés);
- un scénario « participatif » : présélection des îlots candidats en fonction des critères révélés par les entretiens : suppression des îlots à contraintes (non mécanisables, pente, cailloux, hydromorphie) et prise en compte du potentiel des agriculteurs à lutter contre les campagnols terrestres (154 nœuds testés).

## Résultats

Le réseau de prairies sur la commune de Briffons est dense et l'évolution de la connectivité globale après conversion de certains îlots entre le scénario directif et participatif est différente. Dans le scénario « directif », le retrait de sept îlots entraîne une diminution forte de la connectivité globale (-50 %) tandis que pour le scénario « participatif » l'évolution est plus faible car le nombre d'îlots candidats à la conversion est réduit et couvre moins d'espace (-13 %) (Figure 3).

L'approche de la problématique par les graphes apporte de nouvelles perspectives d'organisation de la lutte collective à l'échelle du paysage. Cependant cette approche demande d'être couplée à une approche plus locale basée sur des enquêtes en exploitation agricole et une connaissance fine des dynamiques de populations de campagnols terrestres, apportant du réalisme au modèle. Cette approche montre qu'en intégrant stratégiquement le travail du sol (labour/décompactage), on peut rendre l'habitat moins favorable à la diffusion des campagnols terrestres.

Les méthodes de lutte à l'échelle du paysage doivent se combiner aux autres méthodes de lutte à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation agricole (piégeage des taupes, alternance fauche/pâturage, gestion des refus, mesures en faveur des prédateurs, etc.) tout cela dans une démarche de lutte collective, précoce, raisonnée et animée dans le temps.



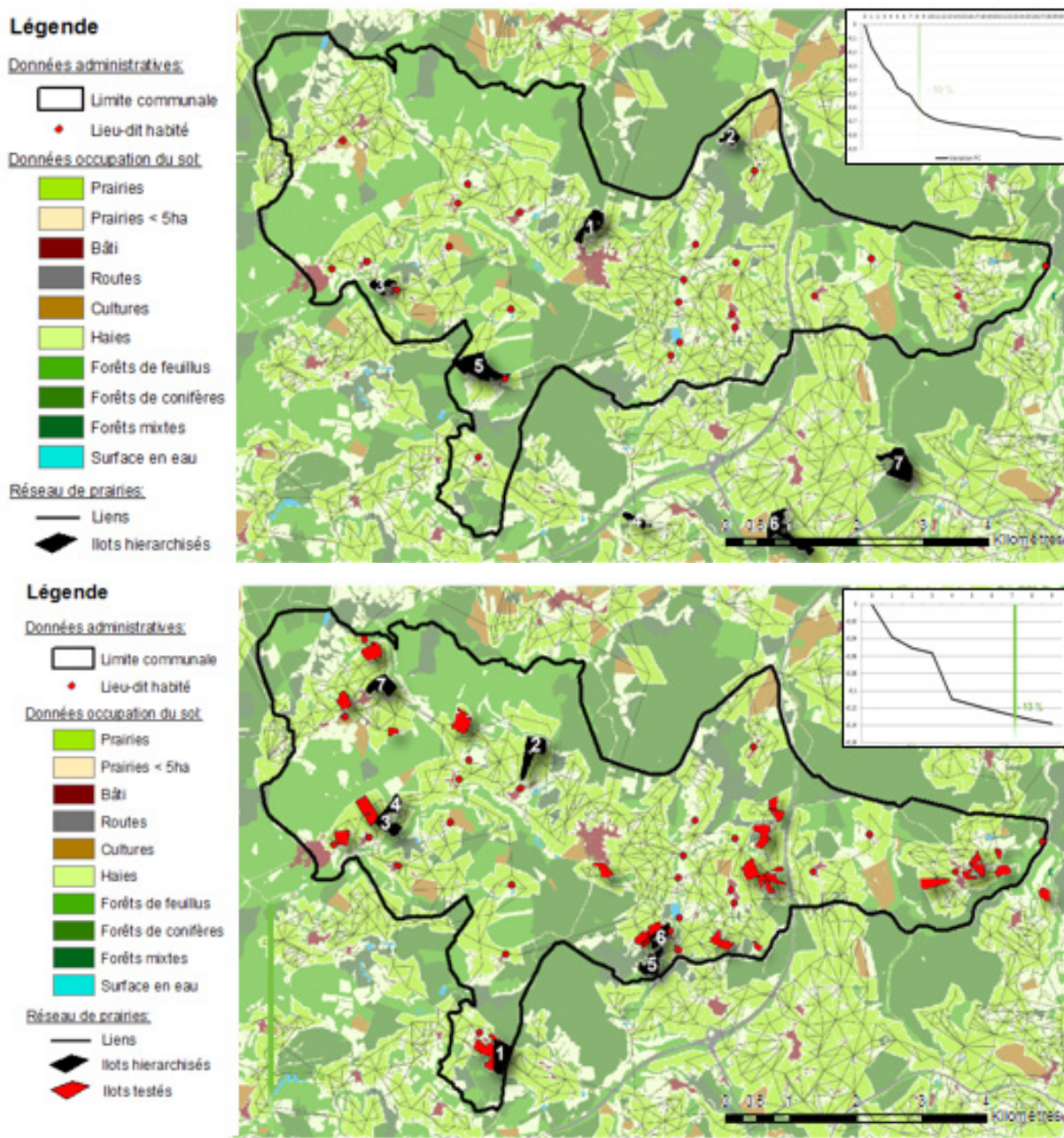


Figure 3: Hiérarchisation des îlots et évolution de la métrique globale PC dans le scénario « directif » (ci-dessus) et participatif » (ci-dessous)

Il faut également tenir compte des blocages réglementaires qui pourraient compromettre la mise en œuvre d'actions (réglementation sur le retournement des prairies) ainsi que des atteintes que les actions pourraient porter à la biodiversité locale.

La limite de cette approche reste dans la portée locale des dispositifs de terrain quand l'approche régionale vise une modification globale du réseau de prairies.

a VetAgroSup, UMR Territoires - Campus agronomique de Clermont-Ferrand, 89 avenue de l'Europe, 63370 Lempdes  
b UMR 6049 ThéMA, 32 rue Megevand 25030 Besançon cedex, CNRS-Université Bourgogne Franche-Comté

\* [elodie.perrot@vetagro-sup.fr](mailto:elodie.perrot@vetagro-sup.fr)





# 11

## Evaluation de l'impact potentiel d'une infrastructure sur la connectivité des mares

Xavier Girardet <sup>a\*</sup>  
Céline Clauzel <sup>b\*</sup>

### Problématique

Depuis décembre 2011, la région Bourgogne-Franche-Comté est traversée par la LGV Rhin-Rhône, supposée agir comme une barrière vis-à-vis des déplacements des animaux. Les amphibiens sont particulièrement affectés par cette fragmentation paysagère en raison de l'importance des déplacements dans leur cycle de vie. La plupart de ces espèces occupent en effet un habitat terrestre et un habitat aquatique. Les mouvements quotidiens et les migrations saisonnières à travers le paysage permettent de

connecter ces deux habitats. En outre, ces espèces sont souvent structurées en plusieurs sous-populations séparées par une matrice paysagère plus ou moins favorable. Les événements de dispersion permettent aux individus de coloniser de nouveaux plans d'eau. Une synthèse bibliographique sur la dispersion des amphibiens (Smith, et Green, 2005) a montré que la dispersion médiane était inférieure à 400 m mais que 7 % des individus observés pouvaient atteindre 10 km.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact potentiel de la LGV Rhin-Rhône sur la connectivité des réseaux de mares afin d'identifier les secteurs

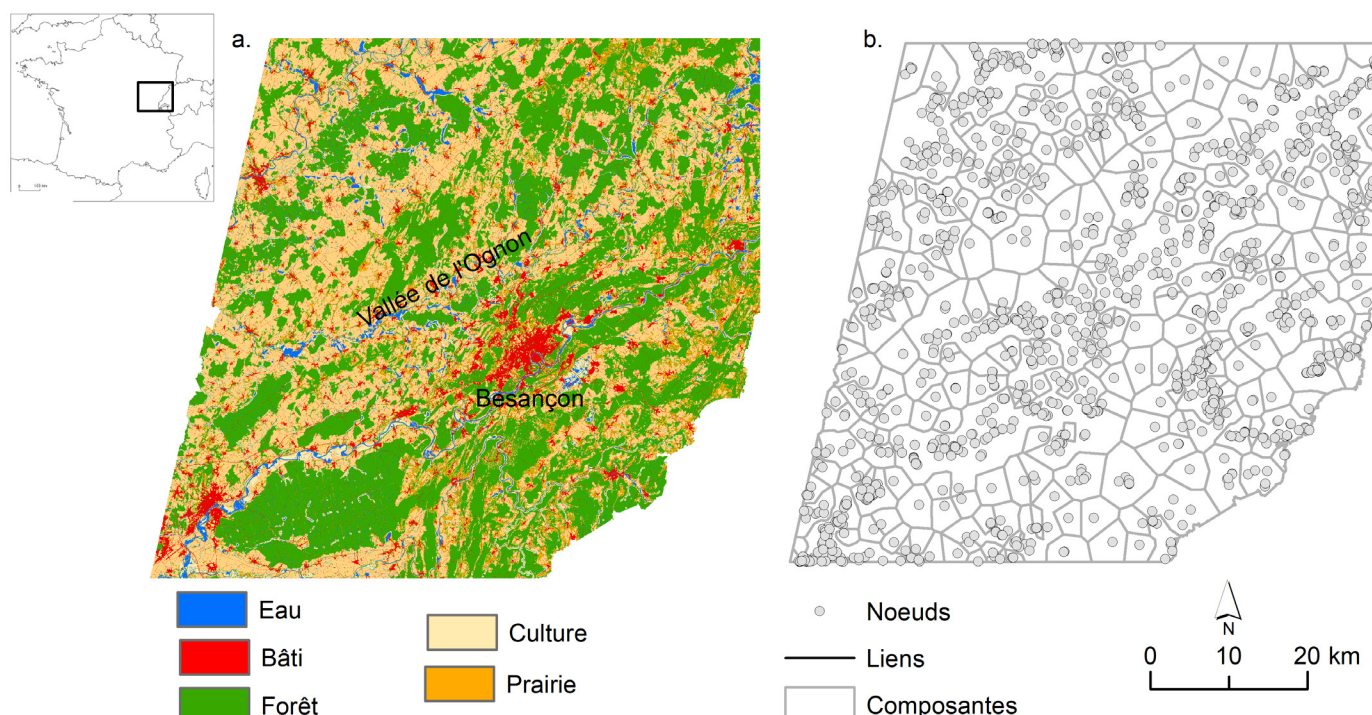


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude (a.) et réseau écologique des mares (b.)

les plus affectés par l'effet barrière de l'infrastructure. Notre hypothèse est que la LGV a non seulement un impact local par la disparition des plans d'eau sur son tracé, mais également un impact plus éloigné en raison de la disparition de connexions entre les plans d'eau.

### Zone d'étude

La zone d'étude (4310 km<sup>2</sup>) couvre une partie de la région Bourgogne-Franche-Comté (principalement l'est). Le paysage y est à dominante rurale, dominé par les forêts et les cultures. Quatre vallées (la Saône, l'Ognon, le Doubs et la Loue) et un réseau d'étangs forestiers sont présents sur la zone. Au nord-est, un espace naturel sensible (ENS) de 53 km<sup>2</sup> a été défini par la LPO et le Conseil Général du Doubs. Cette zone est considérée comme « fragile » avec une haute valeur environnementale et des mesures spécifiques sont prévues pour préserver la qualité des milieux.

### Données utilisées

A partir de la connaissance de la biologie de l'espèce, une carte d'occupation du sol a été créée en combinant plusieurs sources de données (BD TOPO, BD Zones Humides, RPG) et numérisée à une résolution spatiale de 10 m. Cette carte permet de distinguer l'habitat

### Paramètres utilisés dans Graphab

|                            |                     |
|----------------------------|---------------------|
| Connexité                  | 8                   |
| Taille minimale des taches | 0 ha                |
| Distance                   | 2 500m              |
| Type de distance           | Dispersion          |
| Probabilité de mouvement   | 0,05                |
| Impédance                  | Coût                |
| Echelle des coûts          | 1, 5, 10, 100, 1000 |
| Topologie                  | Planaire            |

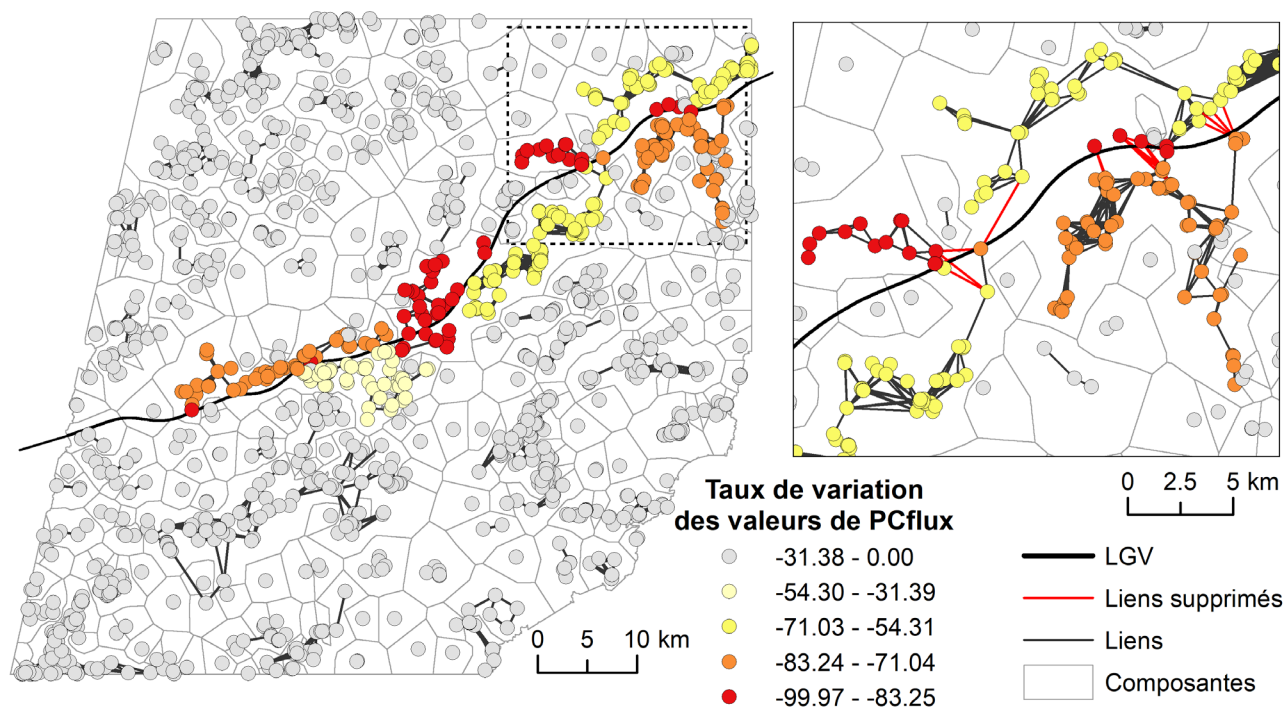


Figure 2 : Impact potentiel de la LGV sur la connectivité locale

optimal, les éléments à caractère neutre, ceux qui sont utilisés pendant les déplacements et enfin ceux qui constituent des barrières. Ainsi, la classe hydrographie doit être représentée en priorité par rapport à la classe routes, pour ne pas rendre discontinu un élément fondamental dans le mode de vie des amphibiens. Afin d'évaluer l'impact de la LGV, deux cartes d'occupation du sol ont été réalisées : l'une sans la LGV représentant l'état initial du paysage ; l'autre incluant le tracé de la LGV ajouté par-dessus toutes les autres catégories d'occupation du sol.

## Méthode

L'analyse consiste à modéliser le réseau écologique des mares à partir des deux cartes d'occupation du sol : l'une sans le tracé de la LGV représentant l'état « initial » du réseau et l'autre incluant la LGV représentant le réseau écologique modifié par l'ajout d'un élément « barrière » dans le paysage. La métrique locale *PCFlux* est calculée sur chaque tache d'habitat avant et après l'implantation de la LGV. Le calcul du taux de variation du *PCFlux* permet de hiérarchiser les taches d'habitat en fonction de la perte potentielle de connectivité engendrée par la LGV. La cartographie des résultats révèle les secteurs les plus affectés par la LGV, ainsi que l'étendue de la perturbation.

## Résultats

Le graphe modélisant le réseau écologique des mares comprend 1464 nœuds allant de 0,01 à 86 ha et 2624 liens (Figure 1). Le réseau est très fragmenté avec 264 composantes dont la plus importante est située dans la vallée de l'Ognon dominée par les zones humides et les prairies. L'analyse diachronique des valeurs de connectivité avant et après l'implémentation de la LGV montre que celle-ci a un effet limité sur la connectivité régionale (-1.36 %) en raison d'un degré initial de fragmentation élevé. En revanche, le tracé de la LGV traversant la vallée de l'Ognon, un secteur riche en zone humide, un impact local important est attendu. La LGV entraîne ainsi la disparition de 61 liens et une diminution de la connectivité locale dans 339 taches d'habitat (23 %) principalement localisées en vallée de l'Ognon (Figure 2). La diminution de la valeur de *PCFlux* sur ces taches atteint en moyenne -71 %, avec un maximum de -99 %.

Il est intéressant de noter que ces taches ne sont pas forcément à proximité immédiate de la ligne mais peuvent être situées à plus de 12 km. Cette variabilité spatiale est directement liée à la configuration du paysage et l'état initial de la connectivité dans le réseau. En effet, toutes les taches impactées sont situées dans des composantes traversées par la LGV. La distance de perturbation dépend ainsi en grande partie de la taille de

la composante, la fragmentation d'une large composante se traduisant par un impact plus étendu. Ces résultats confirment l'importance d'élargir l'emprise des études d'impact afin de prendre en compte l'effet longue-distance des infrastructures sur la connectivité.

---

a UMR 6049 ThéMA, 32 rue Megevand 25030 Besançon cedex, CNRS-Université Bourgogne Franche-Comté

\* [xavier.girardet@univ-fcomte.fr](mailto:xavier.girardet@univ-fcomte.fr)

b UMR 7533 CNRS, LADYSS ; Université Paris Diderot.

\* [celine.clauzel@univ-paris-diderot.fr](mailto:celine.clauzel@univ-paris-diderot.fr)

---



# 12

## Prise en compte des réseaux écologiques dans le choix du tracé d'une infrastructure de transport

Xavier Girardet <sup>a\*</sup>

### Problématique

La LGV reliant Dole à Lyon fait partie de l'étoile ferroviaire à trois branches, programmée par Réseau Ferré de France dans le cadre de la LGV Rhin-Rhône. Ce projet a récemment été abandonné, mais il avait été soumis à concertation publique et proposait neuf fuseaux de passages dans la plaine de la Bresse (Figure 1). Chaque fuseau est composé de deux tronçons principaux, un tronçon nord et un tronçon sud, se rejoignant au sud-est de Louhans. Chaque tronçon se décline en trois alternatives, un passage à l'ouest, un au centre et un dernier à l'est. Les tronçons situés à l'est ont la particularité de doubler les autoroutes A39 au nord de Bourg-en-Bresse et A40 au sud. Si au nord, tous les fuseaux relient la branche est de la LGV Rhin-Rhône au nord de Dole, dans la partie sud les fuseaux ouest et centre rejoignent la LGV sud-est, et le fuseau est se connecte au futur contournement ferroviaire de l'agglomération lyonnaise.

L'objectif de cette étude est de comparer toutes les possibilités de tracé de cette infrastructure, sous l'angle de leurs impacts sur la connectivité des habitats à l'échelle régionale, par le biais d'une approche par profil d'espèces.

### Zone d'étude

La zone d'étude établie couvre l'ensemble de la vallée de la Saône à l'ouest, de Dijon à Villefranche-sur-Saône. À l'est, elle comprend la partie sud de l'arc jurassien de Besançon à Ambérieu. La caractéristique principale de la zone d'étude est la présence à l'est du massif forestier du Jura et du Revermont, à l'ouest des coteaux boisés du Maconnais et des forêts des Hautes Côtes au sud-ouest de Dijon. Le centre de la zone d'étude correspond à la plaine de la Bresse dont le paysage est fortement marqué par le bocage très présent et un milieu boisé très fragmenté.

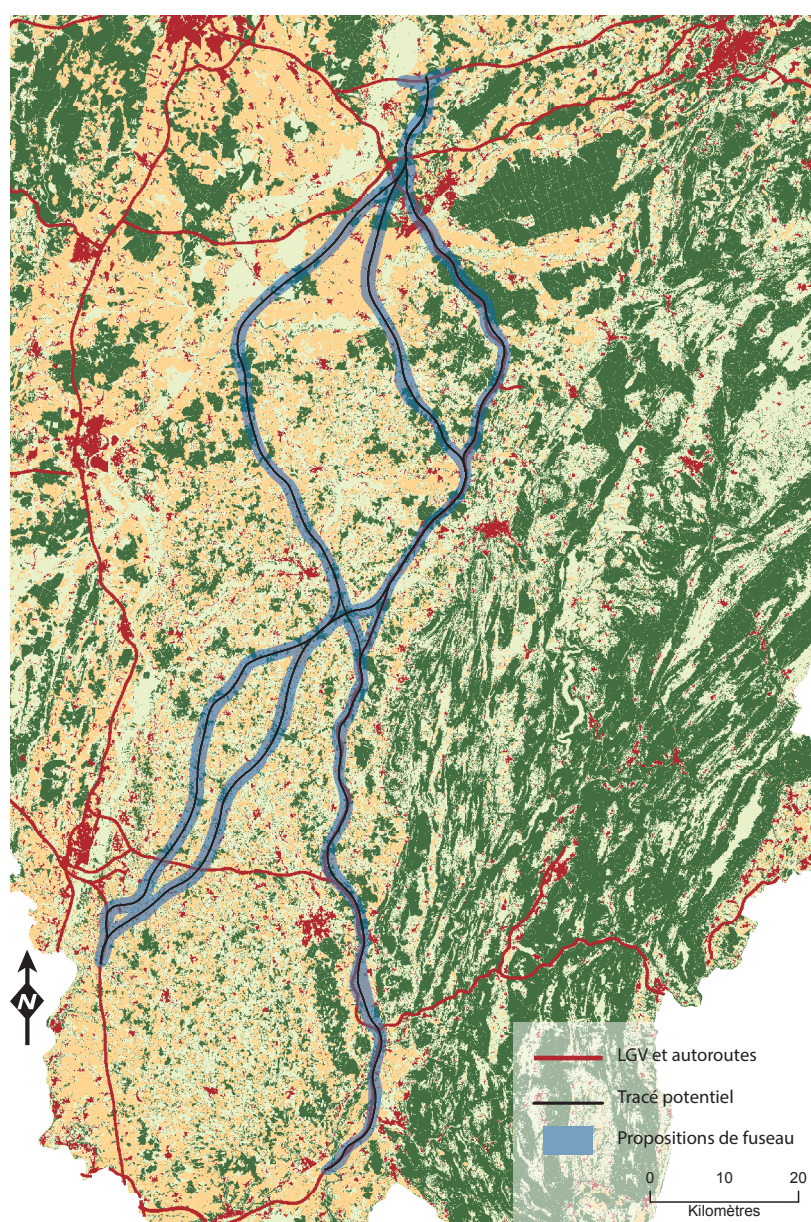


Figure 1. Fuseaux et tracés de la branche sud de la LGV Rhin-Rhône

### Paramètres utilisés dans Graphab

|                            |                       |          |
|----------------------------|-----------------------|----------|
| Connexité                  | 4                     |          |
| Taille minimale des taches | 1 ha                  | 100 ha   |
| Distance                   | 1 000 m               | 10 000 m |
| Type de distance           | Dispersion            |          |
| Probabilité de mouvement   | 0,05                  |          |
| Impédance                  | Coût                  |          |
| Echelle des coûts          | 1, 10, 50, 100, 1 000 |          |
| Topologie                  | Planaire              |          |

hiérarchiser l'ensemble des scénarios, un indicateur unique est nécessaire. Ici, la métrique PC, caractérisant la connectivité à l'échelle du graphe entier, est calculée pour chacun des deux profils qui présentent potentiellement un impact (profils 1 et 2), et pour chacun des scénarios, dont l'état initial.

Le taux de variation de la métrique de connectivité est ensuite calculé pour chaque scénario et pour chaque profil en fonction de sa valeur à l'état initial. Ces taux de variation sont représentés sous la forme d'un nuage de points en fonction des deux profils d'espèces analysés (Figure 2). Le nombre de taches et de liens étant plus important pour le profil 1 que pour le profil 2, l'impact des différents tracés est globalement plus important.

### Résultats

Il est alors possible de hiérarchiser chaque tracé en fonction de son impact sur l'ensemble du graphe pour les deux profils d'espèces (Figure 4). Le tracé le moins impactant est le tracé est-ouest, alors que le tracé centre-est est le scénario présentant l'impact le plus important.

Le scénario est-est, qui double les autoroutes A39 et A40, est le scénario privilégié dans le projet de RFF. Ici, ce scénario est le cinquième scénario le plus impactant. Le jumelage n'est donc pas systématiquement une réponse

### Données utilisées

Un tracé a été défini pour chaque fuseau. Chaque tracé est identifié par sa localisation au nord (O- ; C- ; E-) puis au sud (-O ; -C ; -E). À titre d'exemple, le tracé ouest-centre est désigné par les lettres OC. Chaque tracé a été intégré à une carte d'occupation du sol détaillée à 10 m de résolution spatiale.

Nous avons opté pour une modélisation par « profil d'espèces », selon la même démarche que Minor et Lookingbill (2010). À partir des taches d'habitat forestier, deux profils ont été établis en fonction de la taille minimale des taches et de la distance de dispersion. Le premier profil correspond aux petits mammifères dont la taille minimale des taches est de 1 ha et dont la distance de dispersion est de 1 km, et le deuxième profil (mammifères moyens) correspond à 100 ha et 10 km.

### Méthode

Deux graphes ont été construits en fonction de ces deux profils d'espèces forestières (Figure 3). Les valeurs de résistance attribuées à chaque catégorie de la carte d'occupation du sol sont décrites dans le tableau 1. Afin de considérer toutes les grandes infrastructures de transport existantes infranchissables, tous les liens croisant ces infrastructures sont retirés des deux graphes.

Un graphe par profil et par scénario est construit à partir d'une carte d'occupation du sol qui lui est propre. En plus des deux graphes initiaux, 18 graphes paysagers sont donc construits. Pour chacun des graphes, tous les liens coupés par un tracé sont supprimés. Pour

### Profil : 100 ha - 10 km

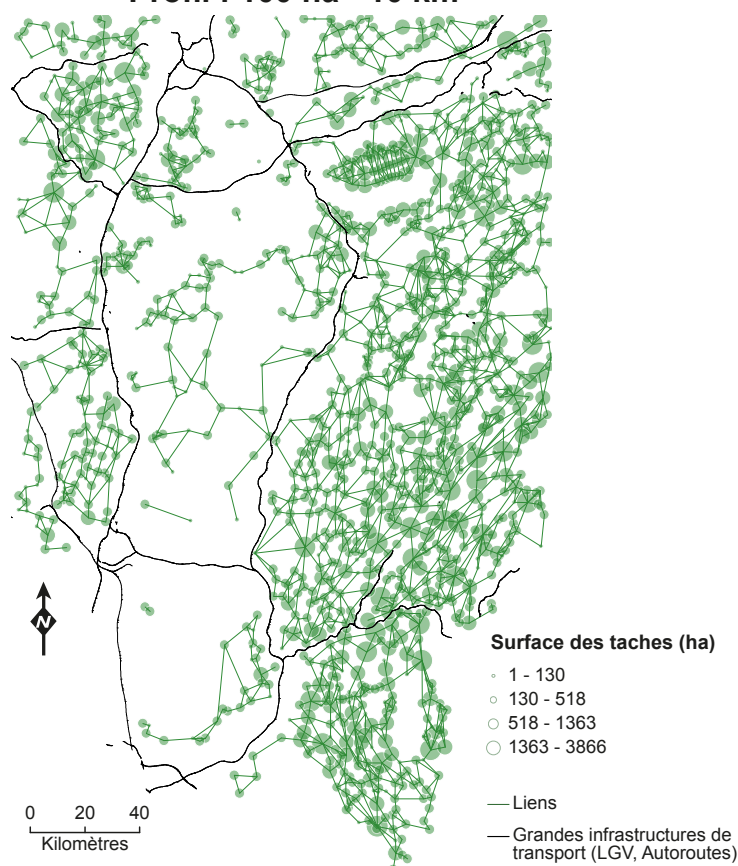
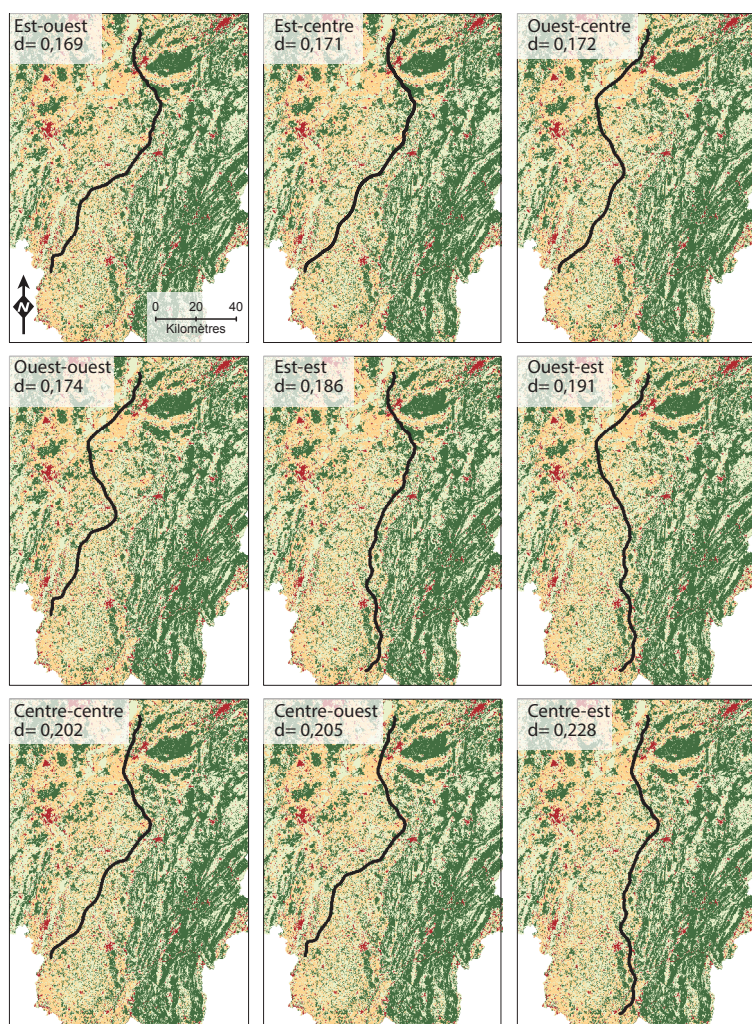


Figure 2. Exemple de graphes de l'habitat forestier pour un des trois profils d'espèce autour de la branche sud de la LGV Rhin-Rhône





à l'atténuation des impacts d'une future infrastructure sur la connectivité de l'habitat forestier.

L'étude menée sur la branche sud de la LGV Rhin-Rhône nous a permis d'illustrer l'application des méthodes utilisées jusqu'ici pour localiser des points précis (passage à faune, aménagement d'une mare par exemple) à un contexte où la question est plus générale : comment comparer les impacts potentiels de fuseaux d'infrastructures ? Comme le terrain d'étude comporte initialement l'autoroute A39, qui suit globalement le même axe que la branche sud de la LGV, le débat sur le jumelage des infrastructures apparaît en filigrane des résultats obtenus. Ceux-ci montrent que le doublement total d'une infrastructure de transport ne permet pas toujours de limiter l'impact sur les réseaux écologiques.

Ainsi, intégrer les réseaux écologiques dans le processus décisionnel pour évaluer chaque scénario de passage permettrait d'atténuer, en amont de la construction, les impacts d'une infrastructure à venir. Il resterait toutefois à généraliser l'analyse en intégrant plusieurs types d'habitats dans la même démarche. Dans le cas présent, la question du réseau d'étangs serait ainsi à aborder parallèlement à celle des milieux forestiers.

a UMR 6049 ThéMA, 32 rue Megevand 25030 Besançon cedex, CNRS-Université Bourgogne Franche-Comté

\* [xavier.girardet@univ-fcomte.fr](mailto:xavier.girardet@univ-fcomte.fr)

Figure 3. Classement des 9 scénarios de passage de l'infrastructure. La distance  $d$  à l'état initial permet de hiérarchiser chaque scénario du moins impactant au plus impactant (de gauche à droite et de haut en bas)

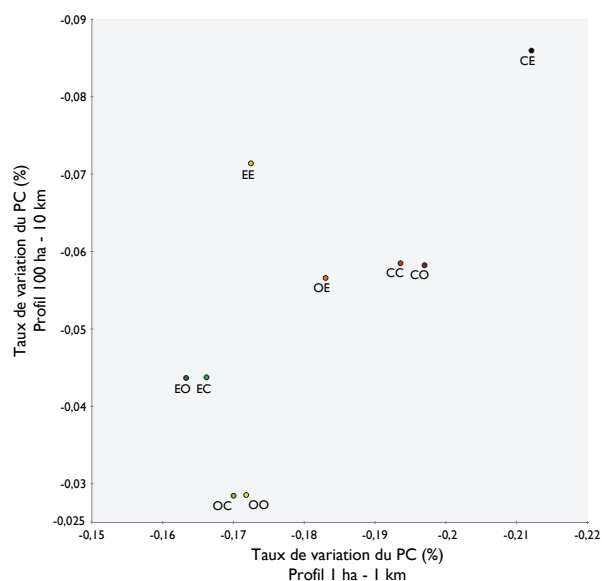


Figure 4. Comparaison des impacts potentiels des tracés pour deux profils d'espèces



# 13 La définition des zones de collisions entre un réseau routier et des réseaux écologiques : application au Val d'Oise

Florian Brémaud <sup>a\*</sup>  
Céline Clauzel <sup>b</sup>

## Problématique

Le développement des infrastructures de transport, accompagnant l'expansion urbaine, a pour conséquence la destruction de milieux naturels et l'augmentation de la fragmentation écologique. Cette fragmentation se traduit par une diminution de la superficie d'habitat naturel et une augmentation de l'isolement des taches d'habitat, provoquant des difficultés pour certaines espèces à accomplir leur cycle de vie. Ces espèces, contraintes à traverser plus régulièrement les infrastructures de transport, sont soumises à un risque accru de collision avec les véhicules.

Cela est particulièrement le cas en Île-de-France, un territoire fortement urbanisé et cloisonné par de grands axes de circulation, et abritant cependant des populations importantes d'ongulés sauvages. Le coût des collisions en France est évalué à 115 millions d'euros avec 23 000 collisions annuelles. Sur la région francilienne, les collisions sont estimées à un millier par an provoquant plusieurs décès. Il apparaît important de mieux connaître les zones de passages de la faune et donc potentiellement celles des collisions, afin de les intégrer dans les politiques d'aménagement.

Notre étude a pour objectif de modéliser les réseaux écologiques du chevreuil et d'identifier les zones potentielles de collision d'un département francilien : le Val d'Oise (95). Contrairement à la plupart des travaux utilisant les graphes paysagers, qui prennent en compte une unique infrastructure ou un réseau routier simplifié contenant par exemple uniquement les autoroutes, l'étude porte ici sur l'ensemble du réseau routier d'un département, des routes communales aux autoroutes. Nous avons suivi une approche combinée entre la modélisation via l'outil Graphab et l'utilisation des données des départements, sous la forme de relevés partiels de collisions et d'avis d'experts locaux de la faune.

## Zone d'étude

Le département du Val d'Oise (95) est situé au nord-ouest de l'Île-de-France aux franges de l'agglomération parisienne (Figure 1). La vallée de la Seine couvre une grande partie du Sud du département.

Celui-ci est traversé du Nord au Sud par la vallée urbanisée de l'Oise, contenant la ville nouvelle de Cergy-Pontoise, et qui délimite deux grands ensembles paysagers. À l'est, la Plaine de France, composée de plaines agricoles et de massifs forestiers, est traversée d'est en ouest par la francilienne (N104), et est bordée à l'est par de grandes infrastructures (Autoroute A1, LGV-Nord, Aéroport Roissy). À l'ouest, le Vexin, plateau agricole avec de grands openfields, contient quelques vallées et massifs forestiers. Il est traversé par une quatre-voies sur l'axe sud-est/nord-ouest Paris-Rouen (A15 et RD14).

Le Val d'Oise présente donc une structure paysagère intéressante avec une diversité d'occupation du sol et une fragmentation routière très présente, allant d'un maillage dense proche de l'agglomération parisienne à quelques grands axes structurants en périphérie.

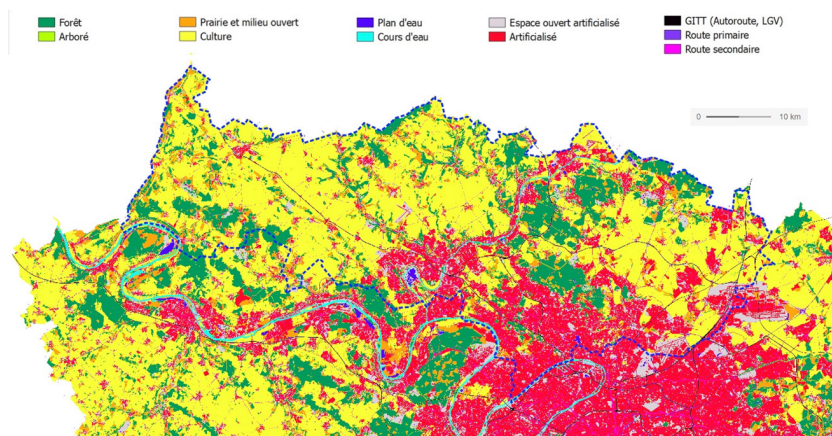


Figure 1 : Carte d'occupation du sol du département du Val d'Oise (95)

## Données utilisées

La carte d'occupation du sol a été construite à une résolution de 10 mètres (cf. Figure 1) à partir du Mode d'Occupation du Sol de l'IAU complété par la base Ecoline pour les éléments paysagers linéaires (haies) ou ponctuels (bosquets, mares) et par la BD-TOPO de l'IGN pour les infrastructures de transport. L'étude portant sur la fragmentation paysagère liée aux routes, celles-ci ont été superposées à l'occupation du sol par ordre croissant d'importance.

Les caractéristiques écologiques du Chevreuil sont issues de la littérature scientifique (Mimet *et al.*, 2016) et ont été adaptées aux spécificités de l'Île-de-France en s'appuyant sur la connaissance des experts locaux (Fédération de chasse, PNR). Ainsi la surface minimum d'habitat quotidien a été abaissée de 170 ha à 30 ha pour refléter l'adaptation des individus aux habitats contraints franciliens. Les distances de déplacement quotidien (2400 m) et de dispersion (8200 m) issues de la littérature ont été jugées conformes par les experts.

Pour comparer les résultats obtenus avec la réalité de terrain, nous avons notamment utilisé des données de collision grande faune de la Fédération de chasse (2006 à 2011) et de la Direction des routes (2014 à 2016).

## Paramètres utilisés dans Graphab

Deux types de réseaux écologiques ont été modélisés afin d'identifier les collisions potentielles au cours des déplacements journaliers (réseau d'alimentation avec déplacements quotidiens) et des déplacements annuels (réseau de viabilité des populations liés aux événements de dispersion).

|                            |                   |            |
|----------------------------|-------------------|------------|
| Connexité                  | 4                 |            |
| Taille minimale des taches | 30 ha             | 576 ha     |
| Distance                   | 2 400 m           | 8 200 m    |
| Type de distance           | Quotidien         | Dispersion |
| Probabilité de mouvement   | 0,05              |            |
| Impédance                  | Coût              |            |
| Echelle des coûts          | 1, 10, 100, 1 000 |            |
| Topologie                  | Complexe          |            |

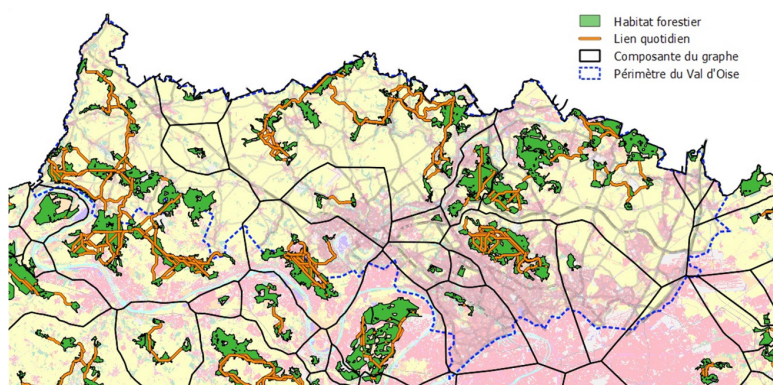


Figure 2 : Réseau quotidien d'alimentation (vue réaliste)

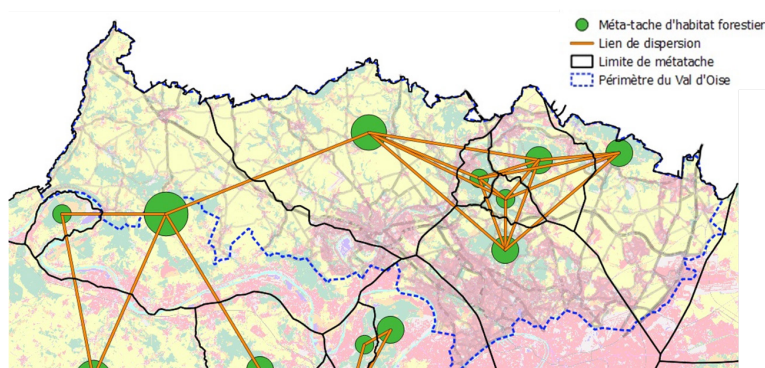


Figure 3 : Réseau de viabilité des populations (vue topologique)

## Méthode

Une fois le graphe construit, la métrique BC (*Betweenness Centrality*) est calculée sur chaque lien pour en estimer la connectivité. Cette métrique calcule la connectivité comme un nombre de parcours passant par un lien donné et permet donc de mettre en évidence la notion de centralité et de « passage obligé ». Elle est donc adaptée à cette étude car elle identifie les corridors potentiels.

Nous considérons qu'une forte connectivité sur un lien donné correspond à une forte probabilité de franchissement. Le seuil des meilleurs 25 % a été retenu pour identifier les liens à plus forte connectivité. L'intersection de ces liens avec le réseau routier du département permet d'identifier les points potentiels de collision. Ces points ont ensuite été regroupés pour former des zones potentielles de collision en fonction de leurs proximités géographiques et des unités paysagères du département.

Une carte de synthèse a été éditée pour visualiser ces zones, constituant ainsi un support pratique pour confronter les résultats obtenus aux experts du département et adapter les paramètres du modèle le cas échéant.



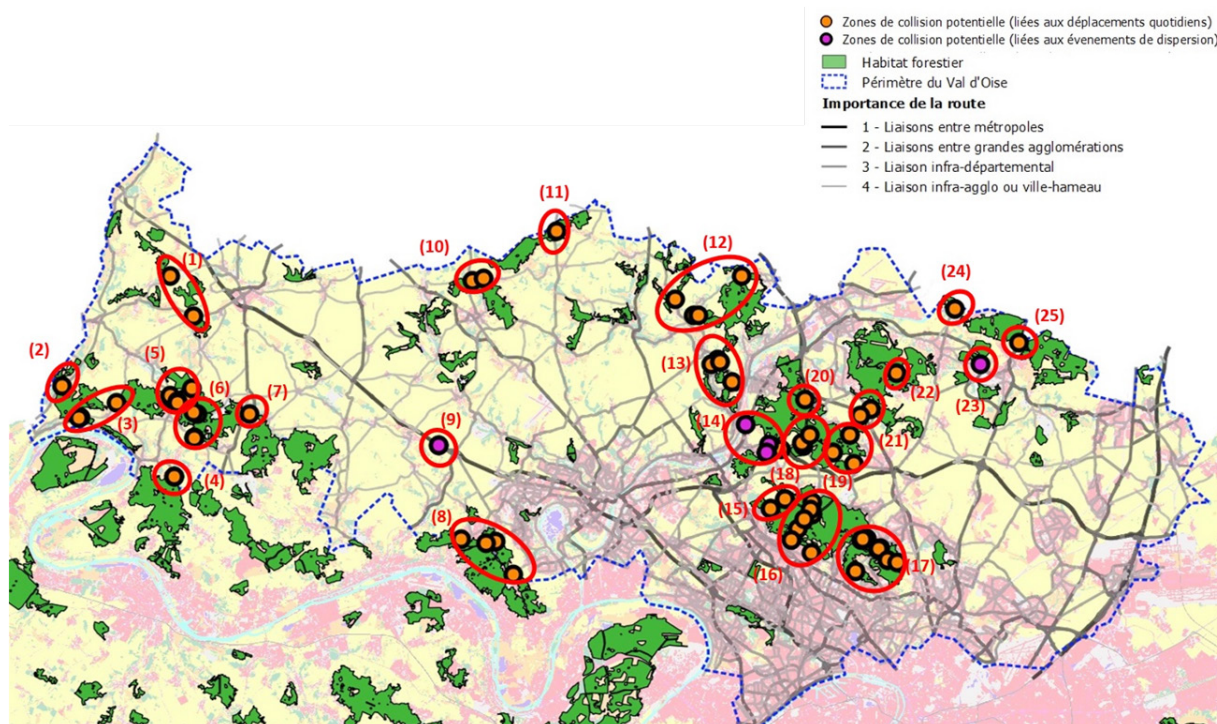


Figure 4 : Zones potentielles de collisions

## Résultats

La carte du réseau quotidien d'alimentation facilite l'échange avec les experts car on y distingue clairement les sous-ensembles de tâches fortement interconnectées, les possibilités de déplacements selon les grands ensembles paysagers, ainsi que l'influence des différentes infrastructures (Figure 2). Pour le réseau de viabilité des populations, chaque métatache représente l'ensemble des tâches reliées entre elles par des liens quotidiens (Figure 3).

L'emplacement des zones potentielles de collisions a été validé par les experts et couvre globalement les points de collision identifiés par le département (Figure 4). Elles contiennent des zones liées soit aux déplacements quotidiens, situés principalement à l'intérieur ou aux abords des massifs forestiers, soit aux événements de dispersion situés sur des trajets entre massifs.

L'étude des résultats doit être interprétée. Certaines liaisons vers l'Eure ou l'Oise peuvent manquer car les continuités extrarégionales n'ont pu être intégrées. A l'inverse, certains liens sont obsolètes du fait de l'absence d'information sur l'engrillagement des parcelles. La réussite de l'étude dépend également des caractéristiques paysagères du département, qui a bien fonctionné pour le Val d'Oise du fait d'un paysage hétérogène. La validation des résultats est plus complexe pour la Seine-et-Marne qui comprend de vastes étendues de cultures en openfield. Par ailleurs, il aurait été intéressant d'obtenir des données de présence-absence géolocalisées afin de pondérer les tâches d'habitats, permettant ainsi de préciser les mesures de connectivité des liens. L'étude

actuelle pourrait être poursuivie par une analyse multi-espèces (oiseaux de milieux ouverts, amphibiens). Enfin, une autre analyse peut consister en la hiérarchisation de points de franchissement réaménageables pour améliorer la connectivité du réseau écologique, par exemple via la végétalisation d'un franchissement existant, en suivant la méthodologie mise en œuvre dans l'étude n°9.

a Consultant Biodiversité - ARP-Astrance, Développement et Innovation, 9 rue de Capri, 75009 Paris

\* [fbremaud@arp-astrance.com](mailto:fbremaud@arp-astrance.com)

b UMR 7533 CNRS, LADYSS ; Université Paris Diderot.



# 14 Mesurer et spatialiser les impacts des formes de croissance urbaine sur les réseaux écologiques pour guider des politiques d'aménagement et de conservation

Marc Bourgeois <sup>a\*</sup>

## Problématique

Face à l'impossibilité d'endiguer le processus de croissance urbaine, une des préoccupations majeures dans le champ de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire consiste à rechercher le meilleur compromis entre le développement résidentiel et le maintien de la fonctionnalité des réseaux écologiques. Cette question s'intègre désormais dans la mise en place de politiques d'aménagement du territoire soucieuses de la préservation de la biodiversité. Toutefois, la littérature scientifique montre que les relations entre la forme urbaine et les processus écologiques sont complexes (Bierwagen, 2007; Czamanski *et al.*, 2008; Tannier *et al.*, 2012; Tratalos *et al.*, 2007). Fort de ce constat, le travail de recherche présenté ici, issu de la thèse de Bourgeois (2015) cherche à évaluer l'impact potentiel des formes d'urbanisation sur la connectivité des réseaux écologiques des espèces animales. Pour cela, cinq scénarios

d'urbanisation réalistes sont simulés à l'échelle de l'Aire Urbaine de Besançon. Parallèlement, les réseaux écologiques de seize groupes d'espèces différents sont modélisés sous forme de graphes paysagers à l'aide du logiciel Graphab (Foltête *et al.*, 2012). En mesurant la connectivité des réseaux écologiques de chaque groupe d'espèces, avant et après simulation de l'urbanisation, il est possible de déterminer, pour l'ensemble de la zone d'étude, quels seraient les scénarios d'urbanisation les plus favorables au maintien des réseaux écologiques des espèces ciblées. Ces résultats sont également déclinés à une échelle plus locale (commune, quartier, parcelle) afin de spatialiser ces impacts pour guider des politiques d'aménagement et de conservation.

## Présentation zone d'étude

La zone d'étude s'étend sur une partie de trois départements de la région Bourgogne-Franche-Comté : le Doubs, la Haute-Saône et le Jura. La zone, de forme carrée, comprend la ville de Besançon (117 000 habitants) et son Aire Urbaine (317 000 habitants) pour une surface totale de 3600 km<sup>2</sup> (Figure 1). Les altitudes s'élèvent depuis les plaines de Haute-Saône au Nord-Ouest (200 m) jusqu'aux premiers plateaux et moyennes montagnes du Jura (1000 m). Exceptée la ville de Besançon, la densité de population de la zone est faible avec 57 habitants par km<sup>2</sup>. En revanche, les espaces naturels et agricoles sont bien représentés avec 48% de zones forestières, 25% de prairies et 16% de cultures. Ces espaces sont généralement plutôt bien connectés dans les zones rurales. Ils sont cependant menacés par une forte urbanisation des zones périurbaines de Besançon (26,5 % d'augmentation de la population entre 1999 et 2008).

## Données utilisées

La simulation de nouvelles zones de développement résidentiel et des réseaux écologiques nécessite la création d'une carte précise d'occupation du sol. La carte d'occupation du sol a nécessité trois différents types de bases

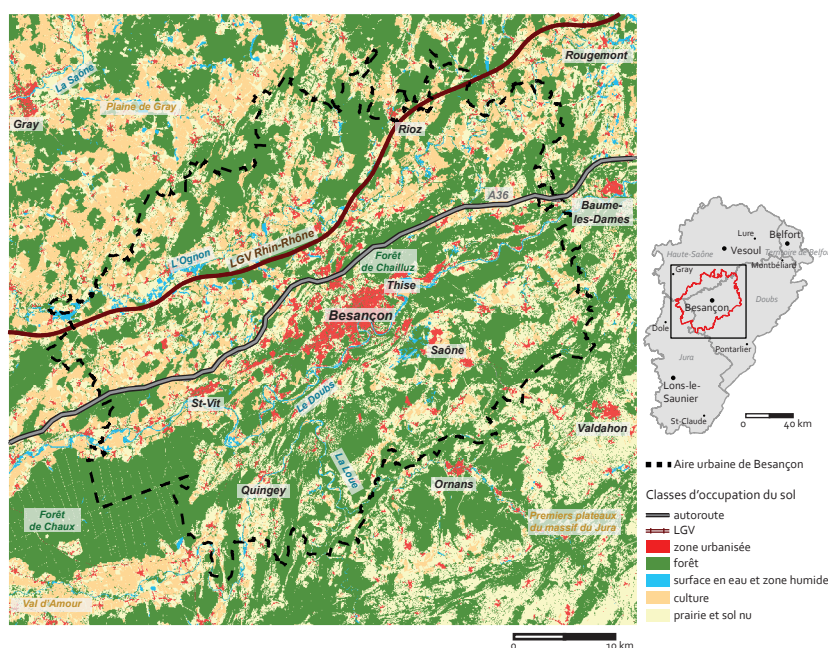


Figure 1 : Présentation de la zone d'étude

de données vecteur : la BD Topo de l'IGN (2009), la BD Zones humides de la DREAL (2009) ainsi que le Registre Parcellaire Graphique (2010). Ces bases de données ont été converties en une couche raster à 10 mètres de résolution. Cette résolution représente un bon compromis entre les temps de calcul informatique et la bonne représentation des éléments linéaires tels que les haies, le réseau hydrographique et le réseau routier. Les zones urbaines (bâtiments, parkings...) ont subi un processus de dilatation-érosion de 50 m et ont été agrégées en une seule classe nommée « zones urbanisées ». Les lisières, haies et cœurs de forêts ont été obtenues à l'aide d'un traitement morphologique des zones forestières réalisé avec l'outil Guidos MSPA (Vogt *et al.*, 2007). Les pixels n'étant attribués à aucune classe d'occupation du sol ont été attribués aux classes correspondantes par photo-interprétation.

## Méthode

La méthodologie générale de ce travail peut se décliner en trois grandes étapes : simulation des scénarios de développement résidentiel, modélisation des réseaux écologiques et évaluation des impacts écologiques de chaque scénario d'urbanisation.

Cinq scénarios de développement résidentiel, présentant des formes de croissance urbaine contrastées ont été simulés : ville compacte (S1), ville modérément compacte (S2), périurbain régulé (S3), étalement urbain (S4), Transit-Oriented Development (S5). Pour chacun de ces scénarios, le trafic potentiel, mesuré en nombre de véhicules/jour est simulé (voir Tannier *et al.* (2016) pour plus de détails).

Puisqu'il n'est pas possible de modéliser les réseaux écologiques de toutes les espèces de la zone d'étude, une approche multi-espèces a été retenue pour ce travail. Cette approche consiste à travailler sur un nombre réduit d'espèces, susceptibles de représenter correctement l'ensemble des espèces concernées

## Paramètres utilisés dans Graphab

|                            |                               |
|----------------------------|-------------------------------|
| Connexité                  | 8                             |
| Taille minimale des taches | De 0 ha à 1 000 ha            |
| Distance                   | De 100 m à 40 000 m           |
| Type de distance           | Dispersion                    |
| Probabilité de mouvement   | 0,05                          |
| Impédance                  | Coût                          |
| Echelle des coûts          | 1, 10, 50, 100, 1 000, 10 000 |
| Topologie                  | Planaire                      |

appartenant à un même type d'habitat. Elle tient compte de certaines caractéristiques fonctionnelles des espèces : la nature et la surface de leurs taches d'habitat (zones humides, espaces boisés par exemple), leur distance maximale de dispersion inter-générationnelle ainsi que leurs capacités à se déplacer dans la matrice paysagère (attribution de coûts différenciés à chaque classe d'occupation du sol). La sélection de ces espèces a été réalisée en plusieurs étapes à l'aide de différents filtres. Dans un premier temps, ont été sélectionnées les espèces déterminantes Trame Verte et Bleue au niveau national. Ces espèces, identifiées par des chercheurs du Museum

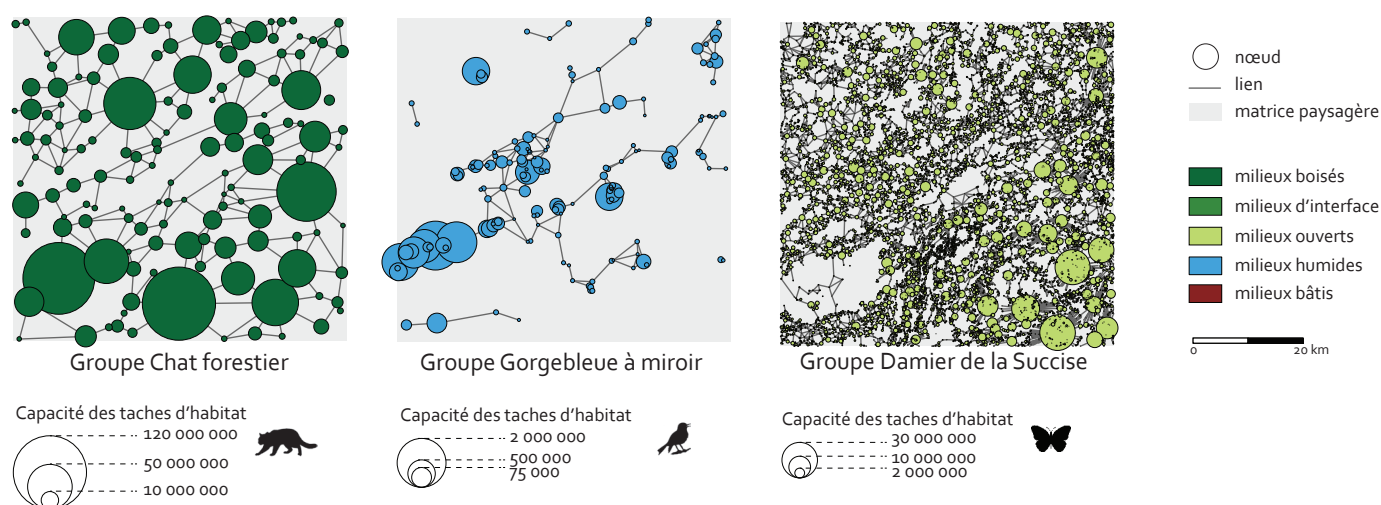


Figure 2 : Exemples de graphes paysagers modélisés pour trois groupes d'espèces aux traits écologiques différents

National d'Histoire Naturelle (Sordello *et al.*, 2011) peuvent être des espèces protégées et/ou présentant un intérêt écologique pour leur conservation. A partir de ces espèces, nous avons choisi celles présentes dans la zone d'étude pour lesquelles nous disposions de suffisamment d'informations pour cartographier leur habitat et leurs déplacements potentiels dans un Système d'Information Géographique. Dans un deuxième temps, ces espèces ont été regroupées par milieux (milieux humides, milieux arborés...). Nous avons enfin regroupé les espèces possédant des traits de vie similaires pour obtenir au final seize groupes d'espèces représentatives de la zone d'étude. Cette sélection finale comporte par exemple un groupe d'espèces forestières à grande distance de dispersion, un groupe d'espèces de milieux ouverts à faible distance de dispersion etc.

Une carte d'occupation du sol, ainsi que la carte de coût qui lui est associée, est réalisée pour chaque groupe d'espèces à l'état initial de l'urbanisation. Chaque scénario d'urbanisation est ajouté à la carte d'occupation du sol, ce qui modifie également la carte de coûts associée. A partir de ces cartes d'occupation du sol et de coûts, six graphes paysagers sont modélisés pour chaque groupe d'espèces : un à l'état initial de l'urbanisation, puis un pour chaque scénario d'urbanisation (Figure 2). Pour chacun de ces graphes, une métrique de connectivité globale est calculée (PC) (Saura et Pascual-Hortal, 2007). Cette métrique est déclinée localement pour chacune des taches d'habitat ( $PC_{Flux}$ ) (Foltête *et al.*, 2014). Afin de pouvoir comparer les groupes d'espèces aux traits fonctionnels différents, nous avons eu recours à une interpolation de cette métrique à l'ensemble de la matrice paysagère. Chaque pixel de la carte d'occupation du sol se voit attribuer une valeur de connectivité, cette valeur diminuant lorsque l'on s'éloigne des taches d'habitat (Sahraoui *et al.*, 2017).

L'impact écologique de chaque scénario d'urbanisation est évalué de manière diachronique, pour chaque groupe d'espèces, par mesure du taux de variation de la connectivité (globale et locale) entre l'état initial et chaque scénario.

Certains paramètres utilisés dans Graphab sont communs à toutes les simulations. Les autres paramètres varient en fonction des groupes d'espèces retenus. Pour certains groupes, les cartes d'occupation du sol comportent des classes spécifiques (ex : lisières forestières ou ripisylves). Les taches d'habitat, la surface minimale des taches d'habitat et les coûts de

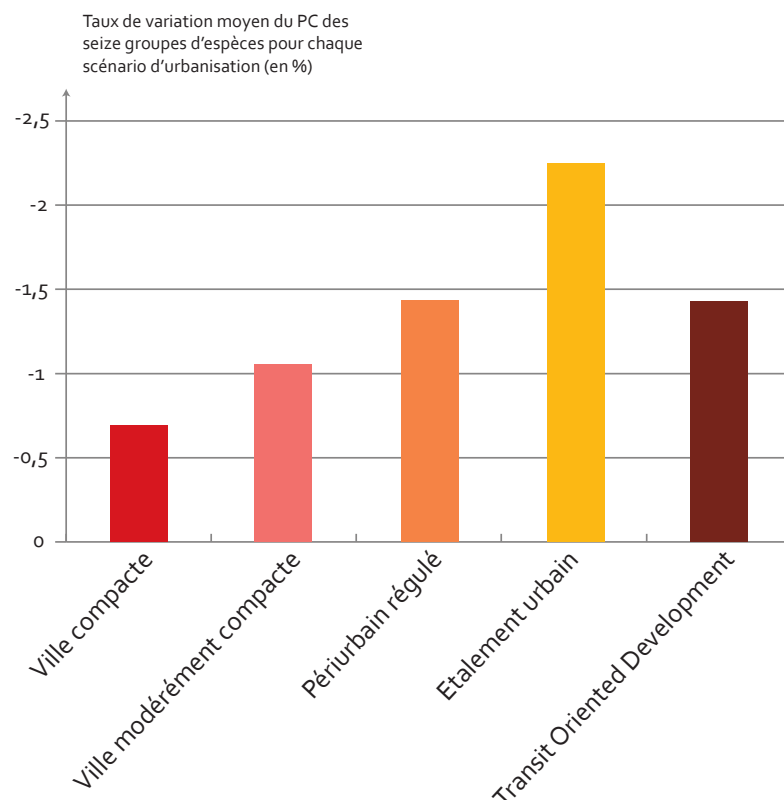


Figure 3 : Impact écologique moyen de chaque scénario d'urbanisation sur les seize groupes d'espèces sélectionnés

chaque classe d'occupation du sol varient également en fonction des espèces. Le coût attribué aux routes varie en fonction du nombre de véhicules/jour simulé pour chaque scénario d'urbanisation. Les graphes paysagers sont seuillés selon la distance de dispersion maximale du groupe d'espèces, convertie en unités de coûts. Les métriques de connectivité sont paramétrées à partir de cette même valeur, calculée à l'état initial. Les métriques choisies sont PC (globale) et  $PC_{Flux}$  (locale).

### Résultats

Les résultats obtenus montrent qu'à un niveau global, l'impact écologique de la croissance urbaine est plus important pour les scénarios favorisant l'étalement urbain (Figure 3). Inversement, la ville compacte semble être la forme urbaine maintenant le mieux la connectivité écologique pour les groupes d'espèces étudiés. A un niveau local, les formes de villes les plus denses sont celles qui présentent les impacts écologiques les moins importants pour la plupart des groupes d'espèces. D'une manière générale, les variations de connectivité restent faibles (diminution du PC de 1,38% en moyenne) mais permettent de différencier les scénarios et les groupes d'espèces entre eux.

Les changements de trafic observés entre chaque



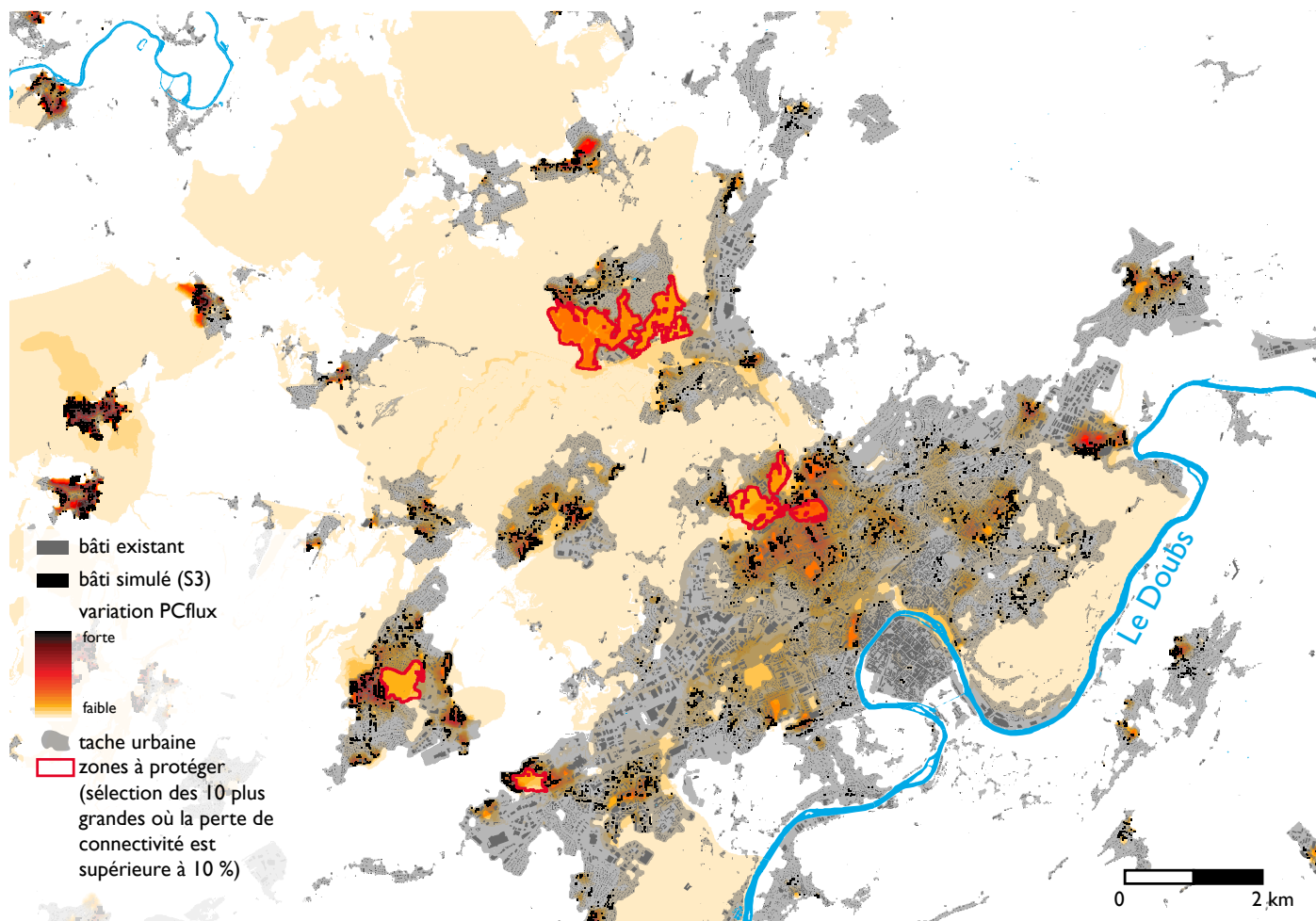


Figure 4 : Variations locales de connectivité pour le scénario « périurbain régulé », tous groupes d'espèces confondus

scénario sont un facteur déterminant pour la prise en compte de l'impact écologique. La simulation du développement résidentiel sans simulation de trafic montre des résultats moins différenciés pour chaque scénario. La simulation conjointe du développement résidentiel et des évolutions de trafic est donc essentielle pour prendre correctement en compte l'impact écologique de la croissance urbaine. Par exemple, nous avons montré que les espèces préférant les milieux boisés étaient généralement plus sensibles au trafic routier alors que les espèces préférant les milieux ouverts semblent plus sensibles au développement résidentiel.

En analysant de manière diachronique les résultats obtenus par le calcul des métriques locales de connectivité et de leur généralisation à l'ensemble de la matrice paysagère, les résultats montrent que les impacts les plus importants sont généralement localisés à proximité des zones urbanisées (Figure 4). Toutefois, pour certains scénarios (ville modérément compacte par exemple), d'importantes pertes de connectivité sont mesurées dans des espaces distants de l'urbanisation simulée. Il est donc difficile d'identifier *a priori* les zones qui seront particulièrement menacées par telle ou telle forme de croissance urbaine. La spatialisation de ces métriques de

connectivité permet toutefois d'identifier les réservoirs potentiels de biodiversité, en identifiant les *hotspots* de connectivité écologique. Cette méthode permet également de localiser les zones les plus menacées par tel ou tel scénario d'urbanisation et d'identifier des zonages potentiels de protection de la biodiversité (Figure 4).

a UMR 5600 CNRS, Environnement Ville Société (EVS) ; Université Lyon 3 Jean Moulin.

\* [marc.bourgeois@univ-lyon3.fr](mailto:marc.bourgeois@univ-lyon3.fr)

# Références bibliographiques

- Barbault R (2006) Loss of Biodiversity, Overview. *Encycl. Biodivers.* p 1–17
- Bennett AF (1999) Linkages in the landscape: the role of corridors and connectivity in wildlife conservation. IUCN, Gland, Suisse et Cambridge, Royaume-Unis, 254 p.
- Bierwagen BG (2007) Connectivity in urbanizing landscapes: The importance of habitat configuration, urban area size, and dispersal. *Urban Ecosystems* 10(1) 29–42
- Bourgeois M (2015) Impacts écologiques des formes d'urbanisation. Modélisations urbaines et paysagères. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 369 p.
- Cormier L, Lajarte ABD, Carcaud N (2010) La planification des trames vertes, du global au local: réalités et limites. *Cybergeo: European Journal of Geography* [en ligne](Document 504) <http://cybergeo.revues.org/index23187.html>
- Couval G, Michelin Y, Giraudoux P, Maire F, Truchetet D (2014) Changements agricoles de 1956 à 2010 et évolution des pullulations d'*Arvicola terrestris* : comparaison entre la Bourgogne, la Franche-Comté et les Alpes. *Fourrages* 220 303–310
- Czamanski D, Benenson I, Malkinson D, Marinov M, Roth R, Wittenberg L (2008) Urban Sprawl and Ecosystems — Can Nature Survive? *International Review of Environmental and Resource Economics* 2(4) 321–366
- Delzons O, Gourdain P, Siblet J-P, Touroult J, Hérard K, Poncet L (2012) L'IQE : un indicateur de qualité écologique multi-usages pour les sites aménagés ou à aménager. *Revue Ecologie (Terre Vie)* 67 105–119
- Ecoscop (2014) Schéma régional de cohérence écologique de l'Alsace. Tome 1 : La trame verte et bleue régionale. 432
- Fall A, Fortin M-J, Manseau M, O'Brien D (2007) Spatial graphs: principles and applications for habitat connectivity. *Ecosystems* 10(3) 448–461
- Foltête J-C, Clauzel C, Vuidel G (2012) A software tool dedicated to the modelling of landscape networks. *Environmental Modelling & Software* 38 316–327
- Foltête J-C, Girardet X, Clauzel C (2014) A methodological framework for the use of landscape graphs in land-use planning. *Landscape and Urban Planning* 124 140–150
- Foltête J-C, Giraudoux P (2012) A graph-based approach to investigating the influence of the landscape on population spread processes. *Ecol. Indic.*
- Foltête JC, Vuidel G (2017) Using landscape graphs to delineate ecologically functional areas. *Landscape Ecology* 32(2) 249–263
- Forman RTT (1995) Land mosaics: the ecology of landscapes and regions. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Unis, 632 p.
- Galpern P, Manseau M, Fall A (2011) Patch-based graphs of landscape connectivity: A guide to construction, analysis and application for conservation. *Biological Conservation* 144(1) 44–55
- Giraudoux P, Delattre P, Habert M, Quéré JP, Deblay S, Defaut R, Duhamel R, Moissenet MF, Salvi D, Truchetet D (1997) Population dynamics of fossorial water vole (*Arvicola terrestris sherman*): a land use and landscape perspective. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 66(606) 47–60
- Mimet A, Clauzel C, Foltête JC (2016) Locating wildlife crossings for multispecies connectivity across linear infrastructures. *Landscape Ecology* 31(9) 1955–1973
- Minor ES, Lookingbill TR (2010) A multiscale network analysis of protected-area connectivity for mammals in the United States. *Conservation Biology* 24(6) 1549–1558
- Noss RF, Harris L (1986) Nodes, networks, and MUMs: preserving diversity at all scales. *Environmental Management* 10(3) 299–309
- Opdam P, Steingröver E, Rooij S van (2006) Ecological networks: A spatial concept for multi-actor planning of sustainable landscapes. *Landscape and Urban Planning* 75(3–4) 322–332

- Pichenot J (2008) Contribution à la biologie de la conservation du Sonneur à ventre jaune (*Bombina variegata* L.) - Écologie spatiale et approche multi-échelles de la sélection de l'habitat en limite septentrionale de son aire de répartition. Université de Reims Champagne-Ardenne, 191 p.
- Rayfield B, Fortin M-J, Fall A (2011) Connectivity for conservation: a framework to classify network measures. *Ecology* 92(4) 847–858
- Rubino MC (2000) Biodiversity Finance. *International Affairs* 76 223–240
- Sahraoui Y, Foltête J-C, Clauzel C (2017) A multi-species approach for assessing the impact of land-cover changes on landscape connectivity. *Landscape Ecology* 32 1819–1835
- Saura S, Pascual-Hortal L (2007) A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: Comparison with existing indices and application to a case study. *Landscape and Urban Planning* 83(2–3) 91–103
- Schwoertzig E, Hector A, Kaempfer S, Trémolières M, Brolly S (2015) Comment concevoir des continuités écologiques en milieu urbain ? *Sciences Eaux et Territoires, hors série* 7
- Serret H (2014) Espaces verts d'entreprise en Ile-de-France: quels enjeux pour la diversité urbaine ? Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris, 251 p.
- Sindt A (2017) Modélisation et cartographie de la connectivité des habitats des Noctules (*Nyctalus noctula* et *Nyctalus leisleri*) dans la ville de Strasbourg. 57
- Smith MA, Green DM (2005) Dispersal and the metapopulation in amphibian and paradigm ecology are all amphibian conservation: populations metapopulations? *Ecography* 28(1) 110–128
- Sordello R, Comolet-Tirman J, De Massary JC, Dupont P, Haffner P, Rogeon G, Siblet JP, Touroult J, Trouvilliez J (2011) Trame verte et bleue - Critères nationaux de cohérence - Contribution à la définition du critère sur les espèces. 57 p.
- Tannier C, Bourgeois M, Houot H, Foltête JC (2016) Impact of urban developments on the functional connectivity of forested habitats: A joint contribution of advanced urban models and landscape graphs. *Land Use Policy* 52 76–91
- Tannier C, Foltête J-C, Girardet X (2012) Assessing the capacity of different urban forms to preserve the connectivity of ecological habitats. *Landscape and Urban Planning* 105(1–2) 128–139
- Taylor PD, Fahrig L, With KA (2006) Landscape connectivity: A return to the basics. In: Crooks KR, Sanjayan M (éd) *Connect. Conserv.* Cambridge University Press, Cambridge, p 29–43
- Tratalos J, Fuller R a., Warren PH, Davies RG, Gaston KJ (2007) Urban form, biodiversity potential and ecosystem services. *Landscape and Urban Planning* 83 308–317
- Trochet A, Moulherat S, Calvez O, Stevens V, Clobert J, Schmeller D (2014) A database of life-history traits of European amphibians. *Biodiversity Data Journal* 2 e4123
- Urban DL, Minor ES, Treml EA, Schick RS (2009) Graph models of habitat mosaics. *Ecology letters* 12(3) 260–73
- Verbeylen G, De Bruyn L, Adriaensen F, Matthysen E (2003) Does matrix resistance influence Red squirrel (*Sciurus vulgaris* L. 1758) distribution in an urban landscape? *Landscape Ecology* 18(8) 791–805
- Vitousek PM, Mooney H a, Lubchenco J, Melillo JM (1997) Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science* 277(5325) 494–499
- Vogt P, Riitters KH, Estreguil C, Kozak J, Wade TG, Wickham JD (2007) Mapping spatial patterns with morphological image processing. *Landscape Ecology* 22(2) 171–177
- Zetterberg A, Mörtberg UM, Balfors B (2010) Making graph theory operational for landscape ecological assessments, planning, and design. *Landscape and Urban Planning* 95(4) 181–191



