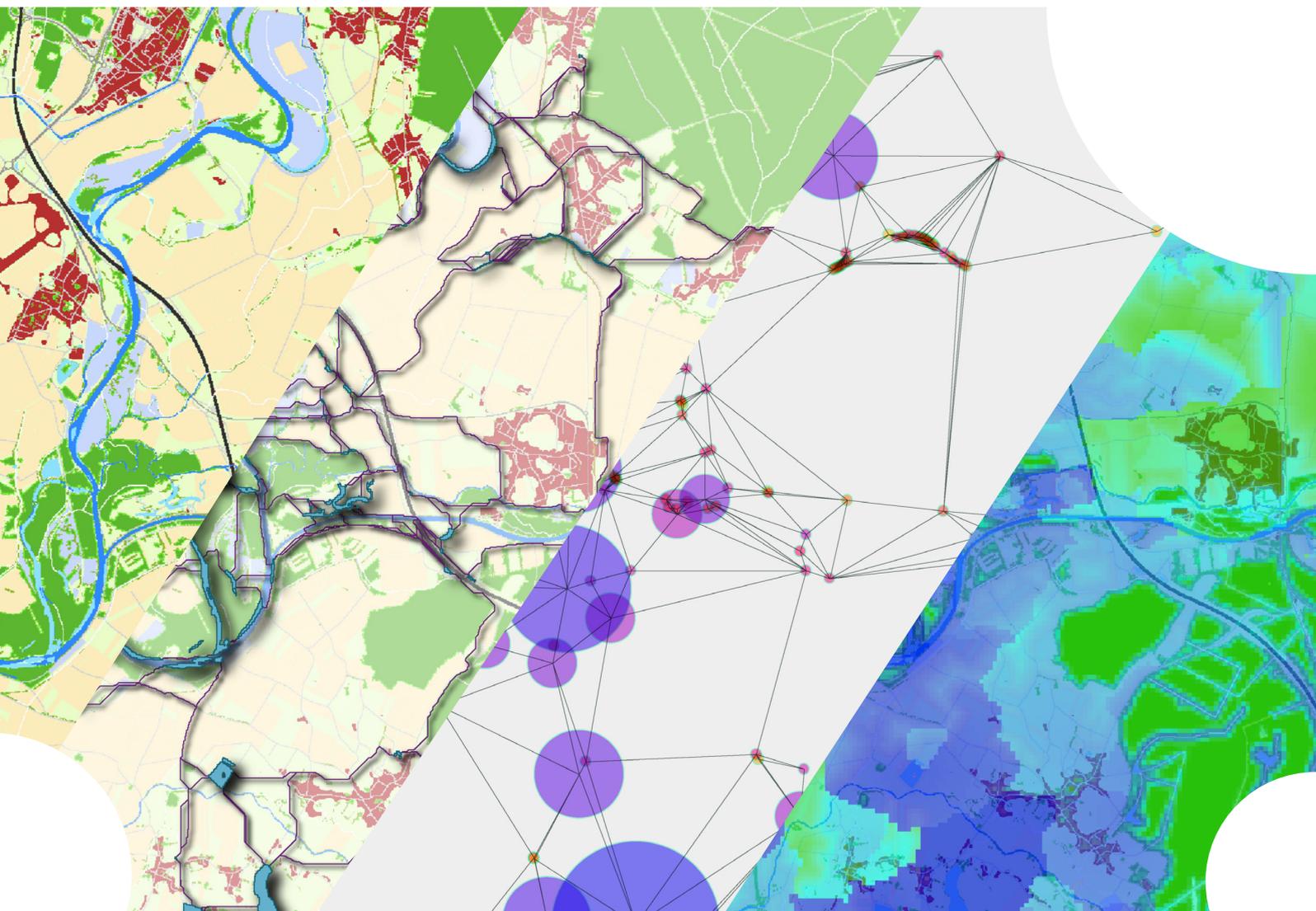


# Graphab

## 12 NOUVELLES RÉALISATIONS À DÉCOUVRIR



Collectif Graphab



**UNIVERSITÉ**  
**MARIE & LOUIS**  
**PASTEUR**

**ThéMA**  
UMR 6049 Théoriser & Modéliser pour Aménager



Conception du livret :

Gilles Vuidel<sup>a</sup>

Anaïs Moreau<sup>a</sup>

Xavier Girardet<sup>a</sup>

Août 2025

<sup>a</sup>Laboratoire ThéMA

UFR Lettres SHS, 32 rue Mégevand

25030 Besançon 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

---

AVANT-PROPOS ..... 4

## Diagnostic de réseau écologique

- 5 Priorisation des secteurs de restauration et de création de mares grâce à la cartographie des continuités écologiques pour le secteur d'importance régionale du Mas D'azil (Ariège, France)
- 7 Évaluation du PLUi de Vallée Sud-Grand Paris pour le maintien et l'extension des réseaux écologiques : apport du logiciel Graphab
- 12 De la modélisation scientifique aux représentations : comment rendre accessibles et opérationnelles les cartographies des corridors écologiques pour l'aide à la décision des élus, gestionnaires et acteurs du territoire
- 15 Cartovégétation, un outil d'aide à la décision pour la planification urbaine locale

## Diagnostic et indicateurs multi-espèces

- 18 Retour d'expérience de la modélisation des réseaux écologiques à EDF : exemple d'une étude sur l'insertion de sites dans les trames vertes régionales
- 21 Application de la modélisation de réseaux d'habitat multi-espèces focales dans la cartographie du réseau écologique en Wallonie
- 24 La contribution potentielle des lots immobiliers aux trames vertes urbaines

## Évaluation des impacts d'aménagement sur la connectivité

- 27 Évaluation des continuités écologiques et application de la séquence ERC avec l'outil MitiConnect
- 30 Approches multi-espèces pour une infrastructure linéaire de transport et identification des liens prioritaires à maintenir

## Lien entre connectivité et réponses biologiques

- 33 Effets de la connectivité sur la biodiversité des sites de captage d'eau potable
- 36 Contribution des bassins d'orage routiers à la connectivité paysagère : étude de cas sur le Crapaud vert (*Bufo viridis*)
- 39 Enjeux de connectivité de la trame de prairies humides sur le territoire du Grand Pilat

# AVANT-PROPOS

Jean-Christophe Foltête

UMR 6049 ThéMA, Université  
Marie et Louis Pasteur - CNRS

Douze ans après le lancement de la première version de Graphab, des journées d'échanges autour de l'usage de ce logiciel se sont tenues en mai 2024 à Besançon. Ces journées offrent une passerelle entre les utilisateurs du monde professionnel investis dans les questions de biodiversité et de conservation, et les concepteurs du logiciel. À partir d'une série de présentations d'applications opérationnelles, les participants ont pu partager leurs expériences avec Graphab, discuter des choix et des problèmes rencontrés, échanger avec l'équipe d'universitaires qui conçoit et développe cet outil.

Les cas d'études présentés se situent dans des régions variées, de Liège à Montpellier, et se différencient aussi par leur couverture géographique, du site local à la région. Ils abordent un large éventail d'approches, focalisés précisément sur des espèces cibles (comme par exemple le Crapaud vert), ou au contraire synthétisant la connectivité d'espèces multiples. Du diagnostic de réseau écologique à l'évaluation d'impact environnemental d'aménagement, ces applications montrent toute la palette d'utilisation qui avait été imaginée au lancement de Graphab. Elles couvrent même des domaines que nous pensions réservés au monde académique, à savoir le couplage des graphes avec des données biologiques de terrain. Et enfin elles illustrent quelques tendances actuelles, notamment l'importance accrue de l'écologie urbaine et l'intégration des modèles de connectivité dans des approches plus larges comme la séquence Éviter – Réduire – Compenser.

Pour l'équipe qui travaille sur cet outil depuis son origine et qui contribue à la formation professionnelle, il est très satisfaisant de constater que les concepts théoriques et la méthodologie universitaire conduisent à de véritables usages pratiques et opérationnels. Puissent les applications relatées dans ce livret être utiles aux futurs utilisateurs de Graphab ! En attendant les prochaines journées d'échanges, nous espérons que vous trouverez dans cet outil un appui à la réalisation de vos projets.



## 1

# Priorisation des secteurs de restauration et de création de mares grâce à la cartographie des continuités écologiques pour le secteur d'importance régionale du Mas D'Azil (Ariège, France)

Matthias LEE<sup>a</sup>

a Chargé de mission TVB et continuité écologique  
ANA-Conservatoire d'Espaces Naturels Ariège

## Problématique

Afin d'enrayer la dynamique de disparition des mares en France, un Programme Régional d'Actions (PRAM) est porté par le Conservatoire d'Espace Naturel d'Occitanie dans le but de structurer les initiatives favorables à leur préservation. À l'échelle régionale, le secteur compris entre les communes du Mas d'Azil, de Lescure et de Montesquieu-Avantès ressort comme territoire d'intervention prioritaire d'après le document stratégique du PRAM, étant donné la densité de mares présente, du contexte géologique et la biodiversité présente associée à ces milieux.

L'ANA-CEN Ariège a donc engagé sur ce territoire un travail de cartographie du réseau de mare, afin de localiser les actions de préservation et de restauration de ces milieux les plus efficaces compte tenu de leur distribution spatiale et des éléments paysagers qui les séparent. La fragmentation des habitats et l'isolement des populations de faibles effectifs qu'elle engendre augmente le risque de disparition locale de biodiversité. Le maintien ou la restauration des continuités écologiques entre les mares du secteur a pour but d'augmenter la résilience des espèces face aux aléas susceptibles de causer leur disparition.

Cette étude vise donc à optimiser la pertinence écologique des actions de l'ANA-CEN Ariège compte tenu de la structure des réseaux écologiques, tout comme le temps d'animation nécessaire et les fonds mobilisés dans le secteur pour les travaux de restauration des mares. Elle a été menée en amont du travail d'animation territoriale en cours depuis l'automne 2023 auprès des propriétaires et des usagers des mares prioritaires identifiées par cette analyse cartographique.

## Zone d'étude

L'aire d'étude s'étend sur 147 km<sup>2</sup>, et couvre 14 communes ariégeoises au paysage collinéen forestier et prairial. Elle est située au nord-ouest du département, dans le secteur

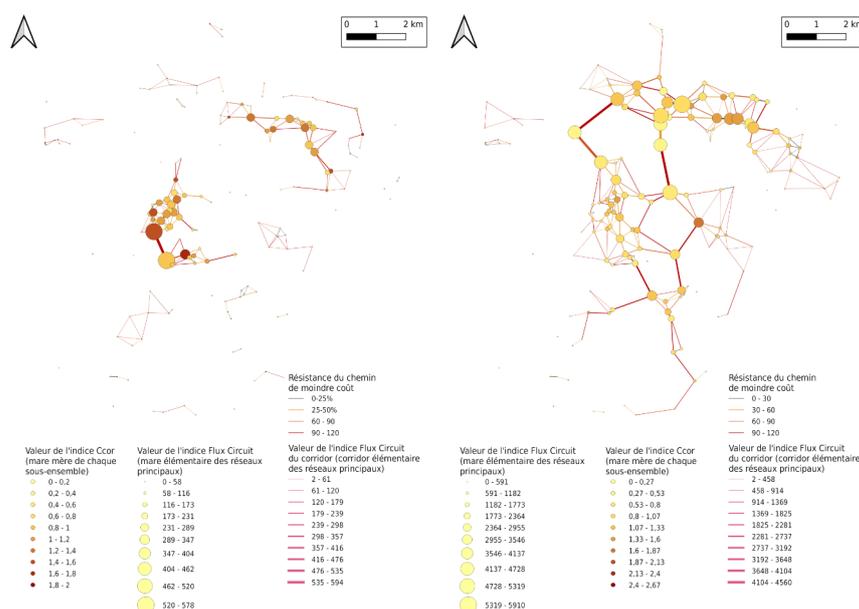


Figure 1 : Vue topologique du réseau de mares pour la sous-trame des milieux ouverts (à g.) et pour la sous-trame des milieux boisés (à d.) permettant de visualiser la configuration spatiale et le morcellement du réseau, en vue d'identifier les corridors et les mares clefs à préserver en priorité.

du Mas d'Azil dont le contexte géologique karstique est mis en exergue par sa célèbre grotte. Les couches calcaires affleurantes du Plantaurel et du Séronais constituent un terrain favorable aux mares sur sol alcalin qui hébergent une faune et une flore particulièrement notable pour le territoire. L'activité d'élevage qui y est exercée a par ailleurs entretenu de longue date ces habitats utilisés pour l'abreuvement du bétail. Une actualisation de l'inventaire des mares datant du début des années 2000 a été réalisé afin de connaître précisément celles qui subsistaient en 2022, et d'ajouter celles qui ont été créées entre temps. Au total, 178 mares ont été confirmées après une visite terrain ou par vue aérienne, tandis que 99 autres ne sont plus présentes.

## Données utilisées

En complément de l'inventaire actualisé des mares du secteur, l'occupation du sol a été élaborée en utilisant la

# Graphab : 12 nouvelles réalisations à découvrir

couche OCSGE disponible pour le département, complétée par les terres arables déclarées dans le RPG 2020, les routes et cours d'eau issus de la BD topo IGN, et la photo-interprétation précise des haies du secteur réalisé par l'ANA-CEN à cette occasion.

Les valeurs de coût sur lesquelles est fondée la carte de résistance sont basées sur les « fiches Trames Vertes et Bleues » qui proposent une synthèse bibliographique des caractéristiques de déplacements des espèces modèles lors de la dispersion.

## Paramètres utilisés dans Graphab

La carte d'occupation du sol utilisée avait une résolution de 10 mètres. Les chemins de moindre-coût ont été calculés selon 8-connexité. La carte de résistance de la sous-trame des milieux ouverts présente des pixels de résistance s'étalant de 1 à 120. Un jeu de lien complet a été calculé. Seuls les chemins de moindre coûts seuillés à 120 ont été considérés comme fonctionnels. Le même principe a été appliqué pour la sous-trame des milieux boisés, avec des pixels de résistance de 1 à 200, et des chemins de moindre-coût seuillés à 200. Les indices Flux Circuit et Corrélation de Connectivité ont permis de hiérarchiser les mares existantes du réseau à restaurer en priorité. L'indice de Harary a permis de localiser les créations de mares le long de l'arbre couvrant minimum qui permettent de connecter le plus efficacement les différents sous-réseaux identifiés par l'analyse.

## Résultats

On obtient grâce à cette analyse quatre grands types d'informations : la structure générale des réseaux de mares, les mares prioritaires d'après les indices de connectivité, les corridors à préserver ou renforcer, et les emplacements de mares à créer. Sur les 316 mares actuellement présentes sur la zone d'étude, 24 mares ressortent comme d'importance majeure d'après la valeur des indices de connectivité calculés, avec trois d'entre elles communes aux milieux boisés et ouverts. Trois corridors modélisés aux coûts proches de la valeur seuil ont été identifiés comme à renforcer.

Concernant la structure générale des réseaux, les conclusions diffèrent selon la sous-trame considérée (figure 1) : on obtient un grand réseau cohérent pour les espèces de milieux boisés, accompagné de trois réseaux satellites au sud et à l'est. Des données de présence de Triton marbré existent tout le long du réseau principal, mais aucune donnée ne se trouve au sein des réseaux satellites.

La sous-trame des milieux ouverts est nettement fragmentée en 11 réseaux, les trois principaux étant ceux du Mas d'Azil – où la présence du Pelodyte ponctué est connue - et celui de Clermont-Camarade au cœur de la zone d'étude. Fait intéressant, on ne dispose jusqu'à présent d'aucune donnée de présence de Pelodyte ponctué dans ce réseau central. On retrouve l'espèce dans le

Trame des milieux ouverts : Pelodyte ponctué  
Trame des milieux boisés : Triton marbré

Occupation du sol	Code biodispersal	Trame des milieux ouverts : Pelodyte ponctué		Trame des milieux boisés : Triton marbré	
		Distance (max 1200 m)	Coût d'un pixel	Distance (max 2000 m)	Coût d'un pixel
Mare	13 et 14	habitat source	-	habitat source	-
Corridor commun					
Fruticée et ligneux éparses	10	1 200 m	1	2 000 m	1
Haie	12	1 200 m	1	2 000 m	1
Surface en eau	6	1 200 m	1	2 000 m	1
Cours d'eau	15	1 200 m	1	2 000 m	1
Corridor ouvert, Barrière boisé					
Prairie	4	1 200 m	1	100 m	20
Corridor boisé, Barrière ouvert					
Forêt de feuillus	8	100 m	12	2 000 m	1
Forêt de conifères	1	100 m	12	2 000 m	1
Forêt mixte	7	100 m	12	2 000 m	1
Barrière commune					
Route	16	50 m	24	50 m	40
Bati	9	10 m	120	10 m	200
Sol nu	5	10 m	120	10 m	200
Matériaux minéraux	2	10 m	120	10 m	200
Cultures	11	10 m	120	10 m	200



Seuil : 120 pts



Seuil : 200 pts

Tableau 1 : Synthèse des coûts associés aux différentes typologies d'habitats de la cartographie d'occupation du sol, d'où découlent les cartes de résistance utilisées pour l'analyse des deux sous-trames étudiées.

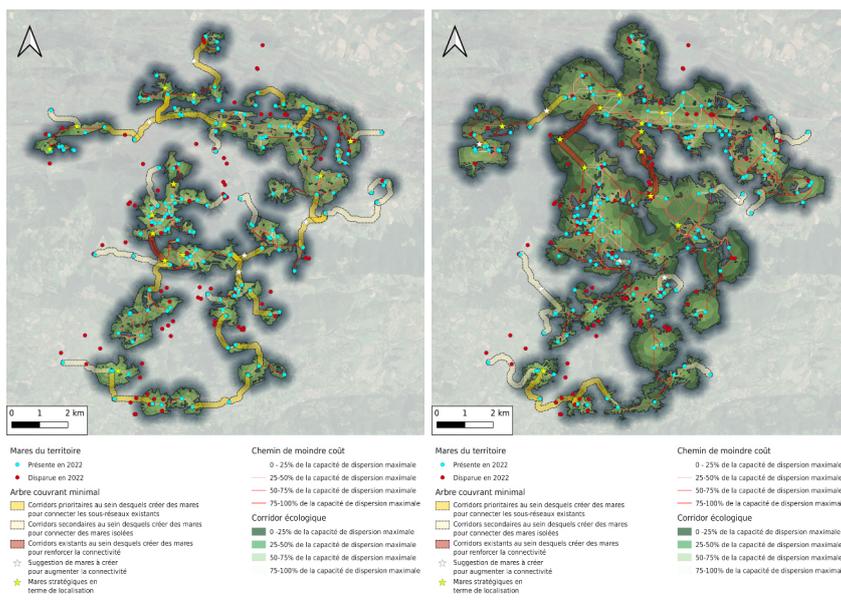


Figure 2 : Vue réaliste du réseau de mares pour la sous-trame des milieux ouverts (à g.) et pour la sous-trame des milieux boisés (à d.), avec les chemins de moindre coût, les enveloppes d'aires de dispersion obtenus avec la fonction « corridor », ainsi que les axes de restaurations à privilégier obtenus grâce à l'arbre couvrant minimal.

réseau de Cabos, au sud-ouest. La discontinuité écologique entre les réseaux pourrait donc être une cause majeure de la présence de ces espèces. On peut alors identifier les localisations de mares à recréer pour reconnecter les sous-réseaux dépourvus de triton marbré ou de pelodyte ponctué (figure 2). Le tracé des arbres couvrants minimums permet de dégager 15 axes principaux le long desquels creuser des mares pour former de nouveaux corridors ; 10 localisations précises y ont été mises en lumière par le module « ajout de tache » de Graphab.

## 2

# Évaluation du PLUi de Vallée Sud-Grand Paris pour le maintien et l'extension des réseaux écologiques : apport du logiciel Graphab

Pierre Salmeron <sup>a</sup>  
a Sud Environnement

## Problématique

Un PLUi est un document de planification de l'urbanisation portant sur un territoire réunissant un ensemble de communes. Il détermine, sous forme de règles, les espaces où les constructions sont possibles ou non, leur fonction et leur forme, leur rapport à leur voisinage bâti, mais aussi leur rapport au réseau viaire et ferroviaire et en général à toutes les autres occupations du sol, dont l'eau. Ces règles sont inscrites dans l'espace et renvoient à une cartographie très précise qui établit un lien entre ces règles et des zones.

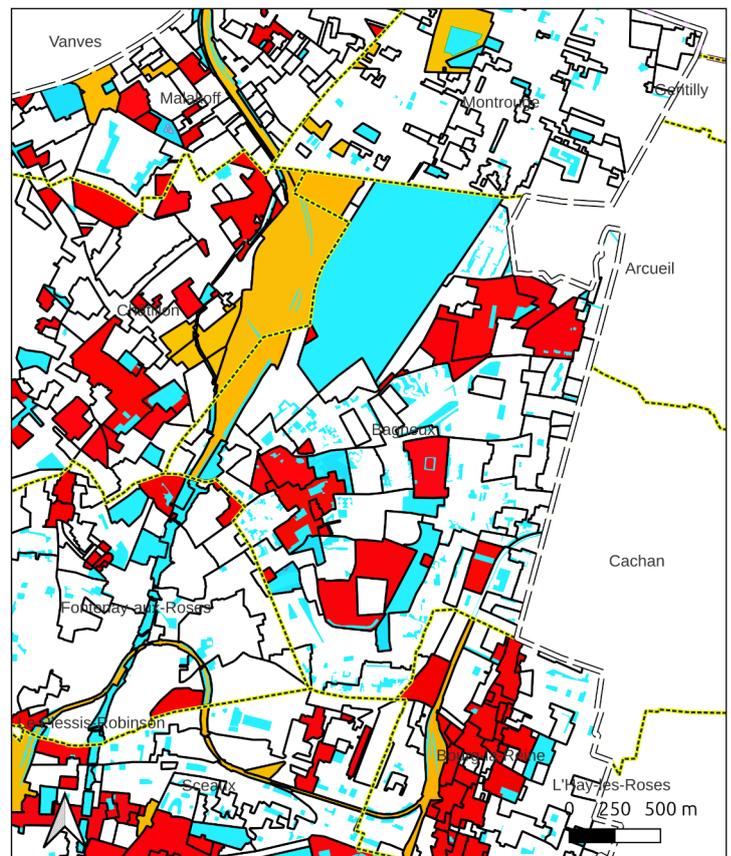
Parmi ces règles, celle utilisée pour déterminer la présence de la végétation est le Coefficient de biotope constitué en partie d'un Coefficient de pleine terre qui servira de base à l'évaluation de la surface des zones arborées qui pourraient subsister.

L'analyse des réseaux écologiques nous permettra de repérer les zones dont les règles doivent être modifiées (taux de pleine terre minimum) et celles éventuellement utilisables et intéressantes pour des projets de renaturation (Zones Préférentielles pour la Renaturation).

Nous avons choisi de ne pas discuter du découpage en zones qui est un résultat historique.

## Zone d'étude

Le Territoire de Vallée Sud-Grand Paris jouxte Paris au sud. Il est constitué de 11 communes, appartenant à la Métropole du Grand Paris. Plutôt que de l'entourer d'une zone tampon, nous avons choisi d'y joindre les territoires des communes adjacentes (10 communes, les communes dont la limite jouxtait un grand réservoir étant exclues). Il s'agit - outre les communes de Malakoff, Montrouge, Châtillon, Bagneux, Bourg-la-Reine, Fontenay-aux-Roses, Sceaux, Clamart, Le Plessis-Robinson, Châtenay-Malabry, Antony - de Vanves à l'Ouest et de celles de la Vallée de la Bièvre, au Sud dans l'Essonne : Bièvres, Verrières-le-Buisson, Massy, Wissous, et à l'Est dans le Val-de-Marne : Fresnes,



### Part de pleine terre et espaces protégés

-  Emprise Vallée Sud et 10 communes adjacentes
-  Emprise Vallée Sud
-  Limites des communes
-  Eau
-  Limites des zones du PLUi
-  Zone du PLUi sans part de pleine terre fixée
-  Zone du PLUi avec part de surface pleine terre par rapport à celle de végétation haute <1
-  Espaces du PLUi protégés patrimoine et zones N

Figure 1 : Zones du PLUi avec surface de pleine terre non fixée ou inférieure à celle de la végétation haute.

# Graphab : 12 nouvelles réalisations à découvrir

l'Hay-les-Roses, Arcueil, Cachan, Gentilly.

Si le paysage du territoire élargi est en grande partie urbain, il comprend cependant des forêts, des parcs dont un grand parc, un grand cimetière parisien mais aussi des zones rurales. Le réseau des voies y est très dense et le paysage fort morcelé. L'artificialisation ne cesse de s'étendre jusqu'à présent.

## Données utilisées

IGN

La BD ORTHO en fausses couleurs infrarouge de 2021 à 15cm pour toutes les communes citées,

La BD TOPO pour ce qui concerne le réseau des eaux de surface éventuellement corrigé à partir des photographies aériennes,

La BD TOPO « thème transport » pour le tracé des voies en fonction de leur importance,

Les photographies aériennes ont été traitées avec les applications Orféo Tool Box (OTB).

APUR (Agence Parisienne d'Urbanisme)

La carte des îlots physiques des communes de l'espace à analyser, qui sont éventuellement corrigées (ou même établies pour la commune de Verrières), à partir des images aériennes. Ces cartes ont servi à construire une carte de l'emprise des réseaux routiers et ferrés sans utiliser de zone tampon de part et d'autre du tracé des voies établi par l'IGN (l'utilisation d'une zone tampon ignore l'existence des parkings).

Territoire de Vallée Sud-Grand Paris

Son projet de PLUi qui comprend des textes et des plans au format pdf que nous avons dû géolocaliser.

## Méthode

Pour la modélisation des réseaux écologiques nous avons retenu des groupes d'espèces qui fréquentent les espaces

### Préservation des continuités écologiques

-  Emprise Vallée Sud et 10 communes adjacentes
-  Emprise Vallée Sud
-  Limites des communes
-  Eau
-  Limites des zones du PLUi
-  Zone du PLUi sans part de pleine terre fixée
-  Zone du PLUi avec part de surface pleine terre par rapport à celle de végétation haute <1
-  Espaces protégés patrimoine zones N
-  Zone du PLUi dont la part de pleine terre est à modifier pour préserver les continuités écologiques de la mésange
-  Mésange, nœuds du graphe (métatache), vue réaliste
-  Mésange, liens du graphe, période de nourrissage, vue réaliste
-  Mésange, liens du graphe période de dispersion, vue réaliste (largeur selon la métrique BC)

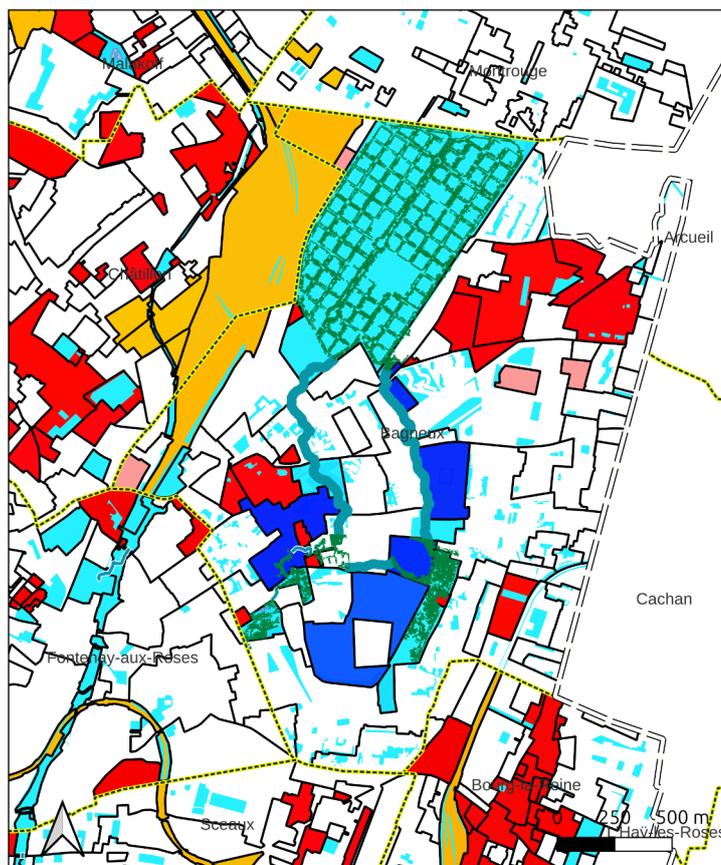


Figure 2 : Préservation des continuités écologiques de la mésange - zones dont les règles sont à modifier (domaine de compétence du Territoire)

### Paramètres utilisés dans Graphab

Groupe d'espèces	Mésange		Hérisson
Type de mouvement	Quotidien	Dispersion	Quotidien
Connexité	4		
Surface minimale des taches	0.5 ha	0.5 ha, métatache de 3 ha	0.3 ha
Distance maximale (en mètre)	32000		
Distance (en mètre)	300	2000	4000
Probabilité de mouvement	Médiane : 0.5 - Maximale : 0.05		
Topologie	Complet		
Impédance	Coût		
Valeur des coûts	Voir tableau spécifique		
Graphe élagué	Oui		

Tableau 1 : Paramètres utilisés dans Graphab

### Tableau des coûts pour les groupes d'espèces types Mésange et Hérisson

Numéro de la couche raster	Nature du paysage	Mésange	Hérisson
1	Végétation haute	1	1
2	Végétation basse	3.2	10
3	Ombre	32	100
4	Autre	10	32
5	Eau	1000	1000
6	Voirie 5	10	32
7	Voirie 4	32	100
8	Voirie 3	100	320
9	Voirie 2	320	1000
10	Voirie 1	1000	3200
11	Voie ferrée	320	1000
12	Bâtiments	1000	3200

Tableau 2 : Liste des valeurs de résistance. Les coûts ont été ajustés pour que les présences inférées correspondent aux observations faites.

## Graphab : 12 nouvelles réalisations à découvrir

arborés.

La mésange représente le groupe d'espèces des passereaux et le hérisson, celui des petits mammifères.

Les réseaux écologiques sont modélisés avant la mise en œuvre du PLUi, à partir de la carte de paysage établie au préalable pour 2021, numérisée à une résolution spatiale de 1 m.

La cartographie des zones du PLUi où le taux de pleine terre est non déterminé ou insuffisant pour maintenir la végétation haute, complétée par la cartographie des réseaux écologiques, où les liens importants des graphes sont mis en évidence par la variation de leur largeur en se référant à la métrique BC, conduit à distinguer, après mise en évidence des espaces protégés pour des raisons paysagères ou patrimoniales (EPP) :

— les zones du PLUi où les continuités seront fragilisées ou

coupées en se référant aux liens des graphes et aux réservoirs, et du même coup les zones dont les règles doivent être modifiées,

— et les zones du PLUi incluant des espaces où des projets d'amélioration des continuités existantes et de renaturation pourraient être menés,

— les zones d'amélioration incluent des réservoirs et ou des liens des graphes,

— les zones de renaturation couvrent des parties des liens du jeu de liens adjacentes aux corridors.

Les zones où le pourcentage de pleine terre fixé dans le projet de PLUi n'est pas inférieur à 45% ne sont *a priori* pas concernées (référence proposée pour une démarche ERC).

Cette méthode qui permet de repérer les zones où des projets de renaturation pourraient être insérés, rend nécessaire l'utilisation de la version 3 de Graphab (version

### Continuités écologiques à développer

-  Emprise Vallée Sud et 10 communes adjacentes
-  Limites des communes
-  Emprise Vallée Sud
-  Eau
-  Limites des zones du PLUi
-  Espaces du PLUi protégés patrimoine et zones N
-  Zone du PLUi sans part de pleine terre fixée
-  Zone du PLUi avec part de surface pleine terre par rapport à celle de végétation haute <1
-  Zone du PLUi avec réservoirs ou liens à conforter, améliorer
-  Zone du PLUi proposée pour la création de projets de réservoirs
-  Mésange, composantes du graphe, période de dispersion
-  Mésange, nœuds du graphe (métatache), vue réaliste
-  Mésange, liens du graphe période de dispersion, vue réaliste (largeur variant selon la métrique BC)
-  Mésange, liens du graphe, vue réaliste, période du nourrissage
-  Mésange, corridors du graphe, période de dispersion
-  Mésange, jeu de liens de la métatache,

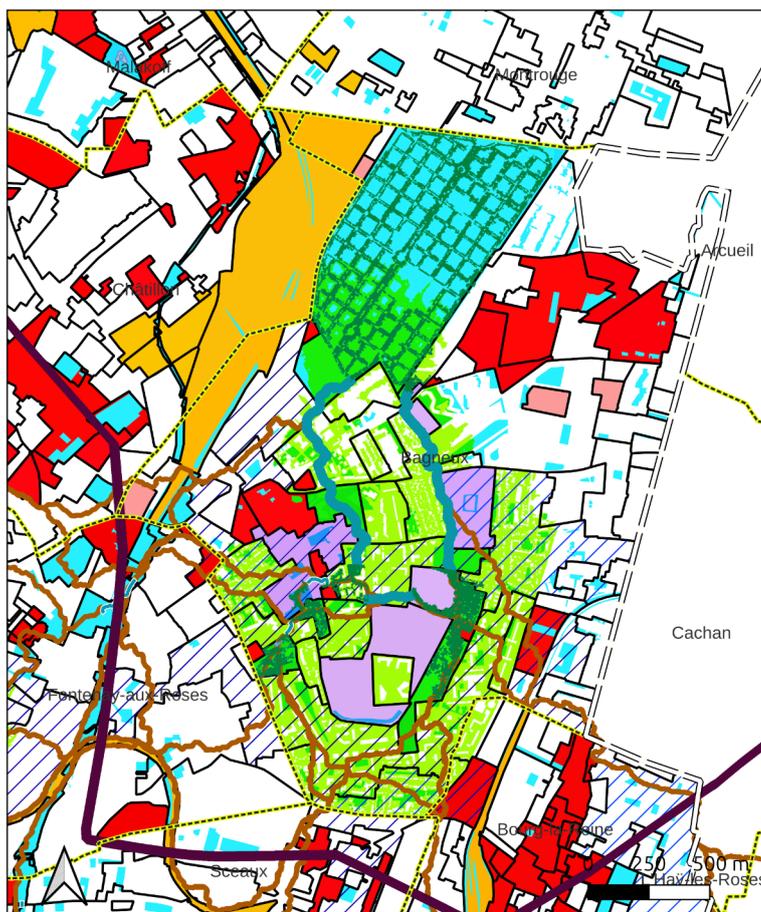


Figure 3 : Développement des continuités écologiques pour la mésange - zones où réaliser des projets d'amélioration ou de renaturation (domaine de compétence de la commune)

où les corridors se réfèrent aux graphes et non plus aux jeux de liens).

### Résultats

*Sur le choix des zones du PLUi pour le développement d'espaces de préservation et de renaturation.*

Pour les passereaux (mésange) en période de nourrissage, les zones désignées pour des propositions d'espaces à préserver (par modification des règles) et de possibles espaces de renaturation sont plutôt proches des réservoirs et situées dans une grande partie centrale et le Sud du Territoire .

Pour les passereaux (mésange) en période de dispersion, les zones désignées pour des espaces à préserver et de possibles espaces à renaturer concernent une grande part des communes du territoire (9 sur 11).

Pour les petits mammifères (hérisson), les zones désignées pour des propositions d'espaces à préserver et de possibles espaces de renaturation se situent dans une grande moitié sud du territoire.

Plus on s'approche des grands réservoirs et plus les règles de protection de la biodiversité doivent être fortes, en

conséquence les communes du Territoire ne devraient pas, pour préserver la santé de tous, avoir des ambitions égales en matière de densification.

### Exemples

Les exemples de cartes retracent la démarche suivie et montrent, sur la commune de Bagneux, pour la période de dispersion de la mésange,

— les zones où le taux de pleine terre fixé est insuffisant pour le maintien de la surface de la végétation haute,

— les zones du PLUi incluant des réservoirs et des liens probables (qui, pour les plus importants, sont mis en évidence par la métrique BC ) ; ces zones dont les règles doivent être modifiées pour préserver les continuités écologiques, sont repérables du fait de leur superposition aux zones (dont sont exclus les EPP) où le taux de pleine terre fixé est insuffisant ou non déterminé,

— les zones du PLUi où développer les continuités écologiques réunissent les zones de préservation (vues comme zones d'amélioration) et les zones d'extension où créer des projets de renaturation (zones dans lesquelles les liens du jeu de liens sont adjacents aux corridors).

## 3

# De la modélisation scientifique aux représentations : comment rendre accessibles et opérationnelles les cartographies des corridors écologiques pour l'aide à la décision des élus, gestionnaires et acteurs du territoire

Laura Henckel <sup>a</sup> Théo Bisard-Duch <sup>a</sup>  
Xavier Girardet <sup>b</sup> Franck Grossiord <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Agence Régionale de la Biodiversité Bourgogne-Franche-Comté

<sup>b</sup> UMR 6049 ThéMA, Université de Franche-Comté - CNRS

## Problématique

Issue du Grenelle de l'environnement de 2007, la Trame Verte et Bleue (TVB) a été formalisée dans la loi française comme un outil pour enrayer l'effondrement de la biodiversité, notamment du fait de l'artificialisation et de la fragmentation des habitats. Véritable projet d'aménagement des territoires, elle vise à s'appuyer sur les connaissances écologiques des espèces et des habitats pour créer ou restaurer des continuités écologiques à l'échelle des territoires pour permettre aux populations animales et végétales de se déplacer au sein des paysages et d'accomplir toutes les étapes de leur cycle de vie (repos, alimentation, reproduction, dispersion, ...) (Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires, 2017).

Afin d'orienter les projets d'aménagement, de restauration et préservation des habitats, une étape préalable indispensable est la mobilisation des connaissances en vue de produire un état des lieux cartographique précis et exploitable des corridors écologiques existants ou potentiels. Si cette étape a longtemps reposé sur du dire d'expert, de nouvelles méthodes et outils sont aujourd'hui disponibles pour modéliser et cartographier ces réseaux en s'appuyant sur une méthodologie plus rigoureuse et scientifique. Mais rendre intelligible et parlant ces travaux de modélisation demeure un défi lorsque l'on vise à favoriser le transfert de connaissances et fournir des supports permettant aux experts, gestionnaires et décideurs de dialoguer ensemble sur une base commune solide et opérationnelle. L'objectif de cette étude est donc de proposer un cadre méthodologique pour la production de cartographies des corridors écologiques reposant sur la démarche scientifique tout en répondant aux attentes des acteurs de l'aménagement des territoires.

## Zone d'étude

La méthodologie proposée a pour but d'être applicable à l'ensemble des territoires de la région (échelle des intercommunalités). L'objectif est de tendre vers plus

d'uniformité dans les cartographies des territoires afin de faciliter les échanges, la mise en commun des informations et permettre les comparaisons. À terme la perspective serait de produire une cartographie globale

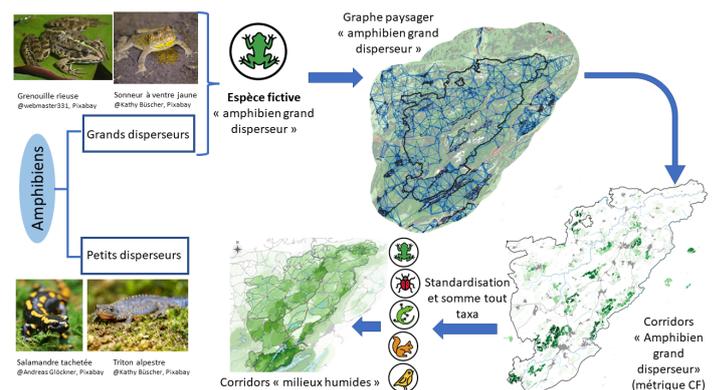


Figure 1 : Approche méthodologique utilisée pour la modélisation des corridors écologiques par sous-trame paysagère

des réseaux écologiques à l'échelle régionale.

Pour la phase de test, nous avons cependant restreint la zone d'étude au territoire du Parc Naturel Régional (PNR) du Doubs Horloger. Le PNR est situé dans le Haut Doubs à l'est de la Franche-Comté, longeant la frontière suisse. Mis en place en 2021, ce PNR d'une superficie de plus de 1000 km<sup>2</sup> couvre 94 communes, des vallées du Dessoubre aux plateaux du nord-est du massif jurassien. Bénéficiant d'un climat montagnard, les paysages agropastoraux dominent et sont notamment dédiés au pâturage bovin.

## Données utilisées

La carte d'occupation du sol sur le territoire du PNR a été composée à partir des données de l'Occupation du sol à grande échelle (OCS GE), de la BD TOPO de l'IGN, et de données d'inventaires des milieux naturels produites par

## Paramètres utilisés dans Graphab

Connexité	4 (prairie et forêt), 8 (milieux humides)
Surface minimale des taches	1 ha (forêt), 0.5 ha (prairie), 0 ha (milieux humides)
Type de mouvement	Quotidien
Distance en m	De 1000 à 5000 m selon les espèces fictives
Probabilité de mouvement	Médiane : 0.5 mammifères et oiseaux / Maximale : 0.05 reptiles et amphibiens
Topologie	Planaire non-seuillés
Impédance	Coût
Valeur des coûts	Echelle de 1 (habitat) à 10000 (éléments fragmentants)
Graphe élagué	Oui

Tableau 1 : Paramètres utilisés dans Graphab

le Conservatoire d'Espaces Naturels (CEN) Franche-Comté. Pour la zone tampon autour du PNR à cheval sur la France et la Suisse, nous avons utilisé les données produites par Copernicus, disponibles à l'échelle européenne au format raster (résolution de 10m) : Corine Land Cover (CLC+ Backbone), ainsi que des couches spécifiques à haute résolution pour les forêts, les cours d'eau et zones humides et les prairies. Les éléments fragmentants (routes et surfaces hydrographiques) ont été rajoutés à ces couches à partir de la BD TOPO côté français et de SwissTLM3D (SWISSTopo) côté suisse.

### Méthode

Trois cartes d'occupation du sol ont été construites correspondant aux sous-trames milieux forestiers, milieux humides, et milieux cultivés et prairiaux. Pour chacune des sous-trames, une liste d'espèces a été établie au sein de cinq grands groupes taxonomiques (amphibiens, oiseaux, mammifères, reptiles et insectes). Pour chaque espèce, les valeurs de résistance par milieu ainsi que les distances de dispersion sont issues de précédentes études menées dans la région, établies sur la base de la bibliographie et du dire d'experts (Chausse, 2022; Laubin & Pichard, 2020; Poirel, 2021). Au sein de chaque groupe taxonomique, des sous-groupes petits et grands disperseurs ont été définis et ont servi de base à la création d'espèces fictives représentatives de chaque sous-groupe. Ces espèces fictives ont été définies en conservant pour chaque occupation du sol la valeur de résistance la plus contraignante des espèces constituant le sous-groupe ainsi que la médiane de leur distance de dispersion (ex : espèce fictive « amphibien petit disperseur »).

Pour chaque espèce fictive, les graphes de connectivité ont été réalisés sous Graphab 2.8.6 (Foltête et al., 2012, 2021). Les corridors ont ensuite été calculés en format vecteur. La métrique CF a été calculée sur les différents jeux de liens et reliée aux corridors par jointure selon l'identifiant. Le

calcul du CF va ainsi permettre de hiérarchiser les corridors les plus importants et de faire ressortir les cœurs de corridors. Les corridors ainsi obtenus ont été rastérisés et standardisés pour faire varier l'indice CF entre 0 et 1. Cela permet d'obtenir un raster global par sous-trame par la somme des corridors de chaque espèce fictive (Fig.1).

### Paramètres utilisés dans Graphab

Le tableau 1 liste les principaux paramètres utilisés dans Graphab. Pour le détail de la méthodologie et des paramètres utilisés, se référer à Bizard-Duch, 2024.

### Résultats

Les cartes finales visent à représenter les corridors de manière hiérarchisée en faisant ressortir les cœurs de corridors, c'est-à-dire les zones de corridors les plus favorables pour un grand nombre d'espèces. Pour ajouter du contraste à la carte, une discrétisation a été effectuée en quatre classes de modérée à forte. Cette discrétisation pourra dépendre de la distribution des données. Dans notre cas un découpage en progression arithmétique a été retenu.

Pour la cartographie des milieux humides (Fig.2), les zones d'habitats apparaissent en bleu clair. La cartographie laisse apparaître un fort effet fragmentant des routes. Certaines zones humides entourées de routes principales semblent ainsi isolées du reste du réseau.

Ce même constat se retrouve pour la sous-trame prairie (Fig.3 b). La zone centrale entourée de routes principales se retrouve assez nettement isolée du reste réseau.

Finalement il apparaît que l'effet fragmentant des routes semble moins important pour la sous-trame forêts (Fig.3 a), le PNR restant dans son ensemble une zone très boisée.

La méthodologie proposée permet ainsi une représentation synthétique claire par sous-trame paysagère, représentative des exigences écologiques des différents groupes taxonomiques présents dans ces habitats. Elle permet à la fois de hiérarchiser les corridors selon leur importance et d'obtenir une vue synthétique pour un ensemble d'espèces, de manière pondérée ou non. Suivant la même procédure, des cartes globales toutes sous-trames confondues peuvent également être produites par addition des rasters standardisés par sous-trame, permettant ainsi de localiser les zones les plus importantes pour la connectivité des habitats tous milieux confondus. Ce choix de représentation permet une interprétation facilitée et opérationnelle reposant sur des méthodes validées scientifiquement. Les cartes ainsi produites pourront constituer un outil d'aide à la décision pour les élus et les gestionnaires en complément des observations de terrain.

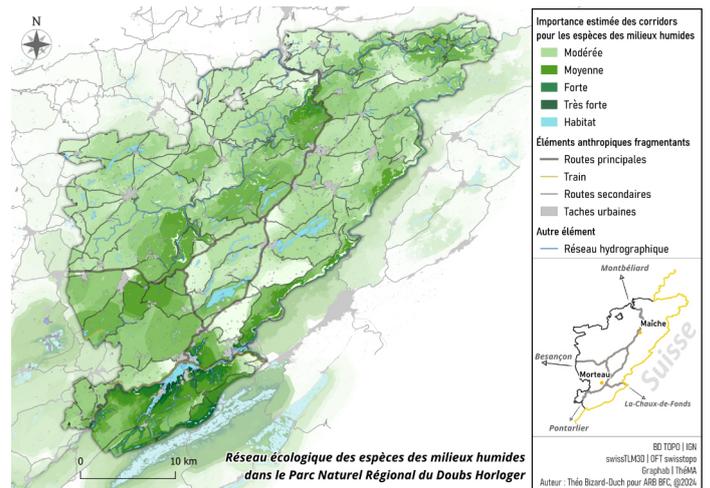


Figure 2 : Cartographie des corridors écologiques pour la sous-trame « milieux humides »

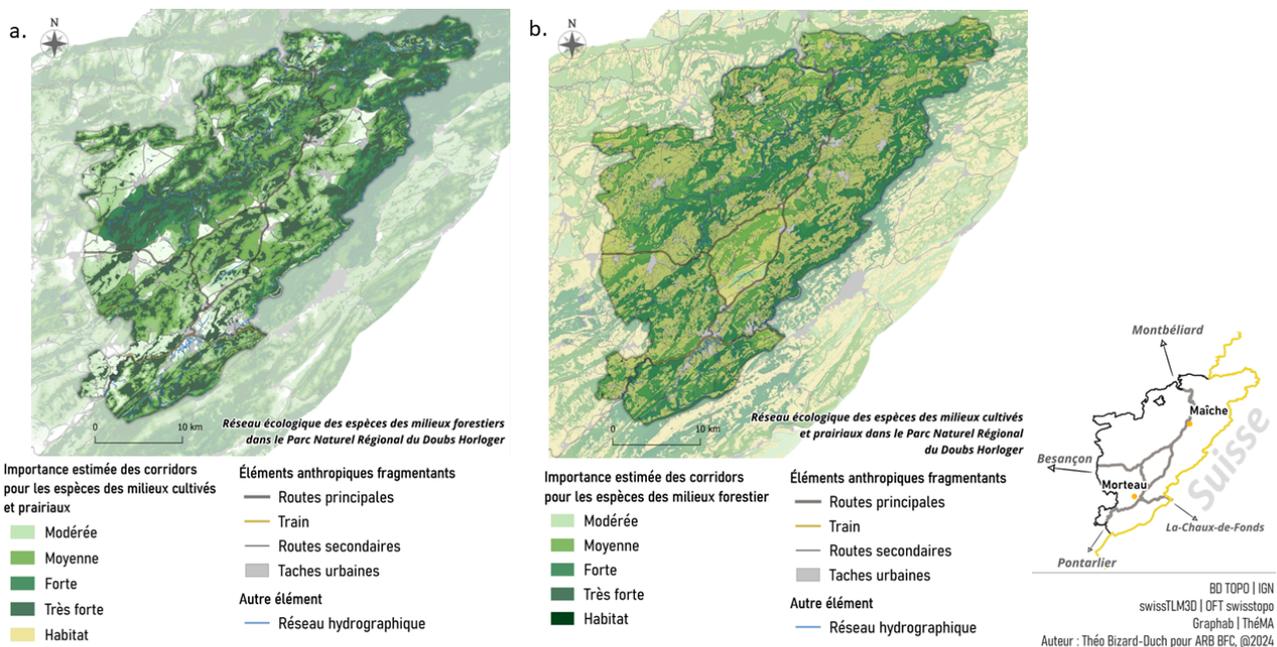


Figure 3 : Cartographie des corridors écologiques des sous-trames « milieu forestier » et « milieu prairial »

## Bibliographie

Bizard-Duch, T. (2024). Mode de représentation cartographique des réseaux écologiques à destination des acteurs du territoire : comment rendre plus pertinentes les cartographies d'aide à la décision pour les différents acteurs ?

Chausse, E. (2022). Analyse des continuités écologiques étroitement liées au vignoble jurassien : de la modélisation à la préservation des habitats et des espèces.

Foltête, J.-C., Clauzel, C., & Vuidel, G. (2012). A software tool dedicated to the modelling of landscape networks. *Environmental Modelling & Software*, 38, 316–327. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.07.002>

Foltête, J.-C., Vuidel, G., Savary, P., Clauzel, C., Sahraoui, Y., Girardet, X., & Bourgeois, M. (2021). Graphab: An application for modeling and managing ecological habitat networks. *Software Impacts*, 8, 100065. <https://doi.org/10.1016/j.simpa.2021.100065>

Laubin, A., & Pichard, A. (2020). Identification des continuités écologiques et des enjeux relatifs au patrimoine naturel du territoire de la communauté de communes Loue-Lison.

Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires. (2017, January 26). Trame verte et bleue. <https://www.ecologie.gouv.fr/Trame-Verte-et-Bleue>.

Poirel, F. (2021). Analyse des continuités écologiques des habitats associés au vignoble jurassien.

## 4

# Cartovégétation, un outil d'aide à la décision pour la planification urbaine locale

Boissonnade Thomas <sup>a</sup> Fleury Mélodie <sup>b</sup>  
 Jourdan Sophie <sup>b</sup> Le Manchec Antoine <sup>b</sup>  
 Nenner Irène <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Environnement 92  
<sup>b</sup> FNE IDF

## Problématique

L'artificialisation des sols exerce une pression extrêmement forte sur les écosystèmes. L'urbanisation notamment, fragmente le paysage et réduit la superficie des habitats naturels. Cette fragmentation des écosystèmes bouleverse leur équilibre et les met dangereusement en péril. C'est d'autant plus le cas en Île-de-France, dont l'artificialisation dans les zones les plus densément peuplées peut s'élever à 90%. Pourtant, il faudrait au moins 45% d'espaces naturels pour atteindre une forme de stabilité environnementale (Szulczewska, B. et al., 2014). L'effondrement de la biodiversité est d'ailleurs plus important en Île-de-France qu'ailleurs et le maintien de la connectivité entre les espaces naturels restants est indispensable à la survie de tous les vivants. L'atteinte de l'objectif Zéro Artificialisation Nette (ZAN) importe également de pouvoir identifier les zones à protéger et celles qui seraient intéressantes à renaturer pour la biodiversité.

La planification urbaine locale ne protège pas suffisamment les espaces naturels et notamment les continuités écologiques. L'une des explications tient au fait que les cartes habituellement utilisées dans la planification urbaine, les Modes d'Occupation des Sols (MOS) notamment, ne sont pas suffisamment précises pour identifier tous les espaces naturels en zone dense. Ainsi, de nombreux espaces ne sont pas identifiés et considérés comme artificialisés. Les cartes de la trame verte qui sont réalisées avec ces données sont donc lacunaires. Elles sont également souvent réalisées à une échelle assez large et ne peuvent pas être traduites de manière opérationnelle à l'échelle locale.

Cartovégétation est un outil d'aide à la décision qui fournit des données suffisamment précises (1m<sup>2</sup>) pour identifier les espaces végétalisés, la trame verte ainsi que les zones à protéger et à restaurer, et propose un accompagnement des acteurs à la mise en œuvre de la trame verte..

## Zone d'étude

L'outil a vocation à être disponible dans toute l'Île-de-France (12 011 km<sup>2</sup>). La région comporte 1 267 communes et 12 317 279 habitants. La densité de population moyenne

de la région est de 1 025 hab/km<sup>2</sup> et elle monte à 9 000 hab/km<sup>2</sup> en zone dense.

En petite couronne la végétation est extrêmement morcelée, majoritairement sous forme de parcs, jardins et arbres en ville indispensables à la connectivité. Quelques grands bois et forêts s'épanouissent autour de Paris, notamment avec les forêts de Rambouillet et de Fontainebleau. Les landes sont rares dans la région et les espaces prairiaux concentrés en Seine-et-Marne et dans les Yvelines.

Les deux territoires pilotes pour le déploiement de cet outil sont Grand Paris Seine Ouest (92) et Arcueil (94). Les deux sont en zone dense, avec une fragmentation importante. Seul le second, caractéristique de la zone dense avec une absence de réservoirs de biodiversité sera présenté.

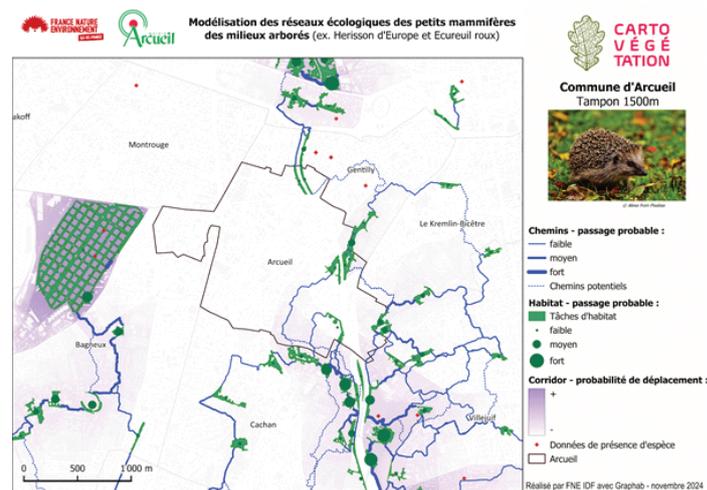


Figure 1 : Graphe modélisant le réseau écologique des micro-mammifères des milieux arborés

## Données utilisées

Pour réaliser les modélisations, une carte des paysages est produite à partir de la donnée COS IA (IGN), produite grâce au modèle FLAIR (apprentissage avec réseau de

## Graphab : 12 nouvelles réalisations à découvrir

neurones). Une donnée qui est ensuite enrichie pour obtenir des précisions sur la végétation basse et sur les éléments qui structurent et fragmentent le paysage. Les prairies permanentes sont obtenues grâce au RPG ainsi qu'à l'OSO (CESBIO). Les réseaux hydrographiques, les voiries et les bâtiments sont issus de la BD Topo de l'IGN.

Plusieurs classes de végétation permettent de différencier les trois strates de végétation et les prairies permanentes sont différenciées des cultures. 3 classes de routes permettent de différencier les routes en fonction de leur importance. Des traitements spécifiques ont permis de conserver les passages croisant les grands axes. Deux versions des cartes des paysages sont produites : une pour les espèces terrestres avec toutes les voiries apparentes, une autre avec la canopée par-dessus les voiries pour les espèces volantes.

### Méthode

L'étude porte sur la sous trame arborée et la sous trame milieux ouverts afin de déterminer la trame verte. Dans chaque sous trame, 3 profils écologiques (virtuels) ont été définis pour représenter les espèces de la sous-trame. Les profils représentent différents modes (volants et terrestres) et capacités (faible à forte) de déplacements : mammifères des milieux arborés, lépidoptères des milieux ouverts, micro-mammifères et passereaux des milieux arborés et ouverts. Ces profils d'espèces peuvent être complétés par d'autres pour s'adapter aux spécificités de certains territoires. Ces profils ont été choisis par un comité d'experts en considérant la liste des espèces déterminantes TVB nationale et celle retenue par le SRCE. Dans l'exemple d'Arcueil sont étudiés les micro-mammifères des milieux

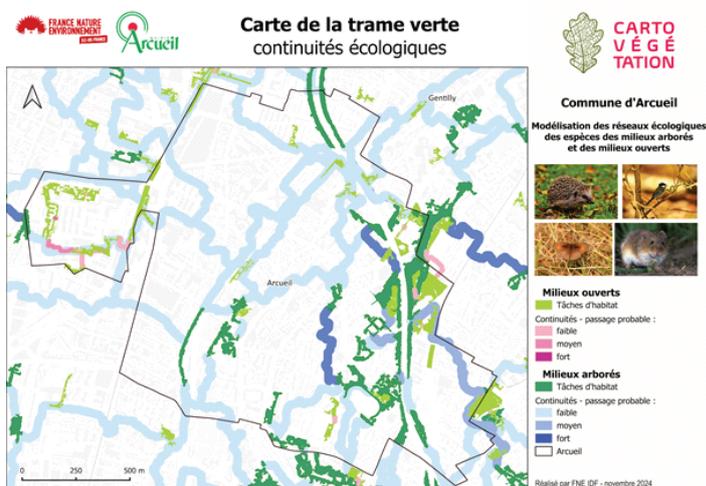


Figure 2 : Continuités écologiques de la trame verte d'Arcueil

ouverts et arborés, les passereaux des milieux arborés et les lépidoptères des milieux ouverts.

La connectivité à l'échelle des taches, des liens ainsi que les corridors sont modélisés pour chaque groupe d'espèces. Afin de simuler d'éventuelles opérations de réduction de la fragmentation, un nouveau jeu de lien est réalisé avec une distance augmentée de 30%. Ces liens sont appelés liens potentiels par opposition aux liens de moindre coût appelés liens probables. La métrique BC est utilisée pour qualifier les liens et habitats, et les corridors permettent d'évaluer une probabilité de passage. Les cartes de sous-trame et de trame sont réalisées par unions de ces résultats pour l'ensemble des groupes d'espèces. Pour

### Paramètres utilisés dans Graphab

	Arboré			Ouvert		
	Micro-mammifères	Mammifères	Passereaux	Micro-mammifères	Lépidoptères	Passereaux
Connexité	4					
Surface minimale des taches	3ha et 0.5ha milieu urbain	5ha	Dispersion : 3.5 et nourrissage : 0,3	0.15ha	3ha	1ha
Type de mouvement	Dispersion	Dispersion	Nourrissage et dispersion	Dispersion	Dispersion	Nourrissage et dispersion
Distance (en mètre)	4000	6000	Dispersion : 2000 et nourrissage : 300	160	1000	Dispersion : 2400 et nourrissage : 1000
Probabilité de mouvement	Maximale : 0.05					
Topologie	Complet					
Impédance	Coût					
Valeur des coûts	1, 10, 100, 1000, 10000					
Graphe élagué	Oui					

Tableau 1 : Paramètres utilisés dans Graphab

contribuer à la planification urbaine, les chemins de moindre coût sont représentés avec l'application d'un buffer.

L'identification des zones à enjeux se déroule en deux parties. Dans un premier temps, sont identifiées les zones à protéger : les habitats et les espaces végétalisés présents dans les continuités. Une priorisation est réalisée en utilisant l'indice dPC pour les habitats et l'indice BC pour les liens. Les zones à renaturer sont obtenues grâce à la fonction d'ajout de tache, ainsi qu'à une interprétation des cartes avec les composantes et les zones carencées.

## Paramètres utilisés dans Graphab

Les profils écologiques ont été déterminés par recherche bibliographique et à dire d'expert dans certains cas. Dans les zones urbaines, certains groupes d'espèces modifient leurs comportements, ainsi ces recherches ont permis d'affiner les paramètres pour tenir compte de leur adaptation aux milieux densément urbanisés. La période de dispersion est étudiée pour toutes les espèces, pour les passereaux la période de nourrissage est également étudiée. Les calculs sur des petits territoires sont réalisés à partir de graphes complets, mais lorsque des territoires plus importants sont couverts, les calculs peuvent être réalisés en planaire.

Pour analyser la connectivité des territoires, la métrique BC est utilisée pour qualifier les taches, liens et corridors. Le dPC est utilisé pour identifier les taches susceptibles d'entraîner une perte très importante pour le réseau. Et la métrique EC est utilisée pour la fonction d'ajout de taches.

## Résultats

Les résultats obtenus montrent une forte fragmentation des réseaux écologiques en zone densément artificialisée, avec un effet accru pour les espèces terrestres. Les recherches bibliographiques et les tests ont permis de montrer l'adaptation des espèces aux milieux urbains. Les micro-mammifères par exemple, dont le domaine vital est d'environ 3 ha en milieux moins anthropisés peuvent se contenter d'habitats beaucoup plus petits en milieu dense (0,5 ha voire moins), des résultats corrélés avec des informations issues d'inventaires et des retours de terrain. Les territoires avec des grands espaces végétalisés bénéficient logiquement d'une plus grande connectivité des réseaux. Néanmoins les alignements d'arbres, parcs et jardins sont absolument indispensables dans les milieux les plus denses. La disparition de ces milieux entraîne une dégradation importante de la trame verte. On observe également que de nombreux habitats sont particulièrement vulnérables face à l'urbanisation en cours.



Figure 3 : Espaces à protéger pour la trame verte, quartier Doumer, Arcueil

La principale difficulté est l'utilisation des modélisations en tant que document graphique pour la planification urbaine. Les liens modélisés sont des linéaires insuffisants pour protéger efficacement les continuités. A l'inverse, les corridors modélisés couvrent parfois l'ensemble d'une commune, une surface trop grande pour y affecter un dispositif de protection urbanistique. C'est pour cela que nous avons choisi d'utiliser cette approche par zones à enjeux, afin de protéger tous les habitats et d'identifier ceux qui doivent être surveillés avec plus d'attention pour qu'ils soient protégés au moyen des dispositifs du Plan Local d'Urbanisme (PLU) le plus adapté : classement en espace boisé classé (L. 113-1 et suivants c. urb) ou en site ou secteur à protéger pour les continuités écologiques (L. 151-23 c. urb). Le choix d'ajouter une zone tampon autour des liens a également permis de matérialiser les couloirs de déplacement pour pouvoir protéger voire renaturer tous les espaces qui se trouvent dans ces zones.

Malgré cela, les échanges avec les services d'urbanisme ne sont pas toujours concluants (réticences à sanctuariser des espaces où d'éventuels projets pourraient naître, nécessité de disposer de données précises, réticences des élus et services de l'intercommunalité, calendrier urbanistique contraignant, etc.). La réalisation de cartes par quartier, clé en main, a facilité l'appropriation des données par les services et la protection des espaces naturels dans le PLU. Nous souhaitons affiner cette méthode pour que les cartes puissent être facilement utilisables par ces services tout en protégeant efficacement la biodiversité de l'urbanisation.

## 5

# Retour d'expérience de la modélisation des réseaux écologiques à EDF : exemple d'une étude sur l'insertion de sites dans les trames vertes régionales

Laure Santoni <sup>a</sup>

<sup>a</sup> EDF R&D - Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement – 6, quai Watier – 78401 Chatou cedex

## Problématique

La biodiversité constitue une préoccupation majeure pour EDF, entreprise qui s'est dotée depuis 2006 d'une politique interne et s'est engagée dans la Stratégie Nationale pour la Biodiversité 2030. Cet engagement se traduit par diverses actions comme le déploiement de mesures volontaires sur les sites de production ou à proximité, pour préserver les milieux naturels et/ou contribuer aux objectifs de politique publique territoriale en matière de biodiversité. Avec plus de 40 000 hectares de foncier, aménagés ou non, EDF s'inscrit dans la lutte contre la fragmentation du paysage en prenant en compte les continuités écologiques dans sa stratégie foncière. Au-delà des actions réglementaires liées à de nouveaux projets avec la mise en œuvre de la séquence Éviter-Réduire-Compenser, la Division Thermique Expertise Appui industriel Multi métier d'EDF a souhaité une approche territoriale de l'insertion de ses sites de production dans les trames vertes régionales. En 2020, le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement de la R&D d'EDF a ainsi été missionné pour analyser trois sites d'EDF situés dans la région Grand Est afin d'évaluer leur connectivité, leur place et leur importance dans le réseau écologique à l'aide du logiciel Graphab.

## Zone d'étude

Les 3 sites EDF (en rouge sur la figure 1) se situent dans la vallée de la Moselle. Ces sites sont d'anciens centres de production thermique arrêtés définitivement et en cours de démantèlement. Leur superficie est respectivement de 55 ha pour le site 1, 295 ha pour le site 2 et 170 ha pour le site 3. Afin d'étudier l'insertion des sites dans le réseau écologique, nous avons étendu la zone d'étude à un rayon de 5 km autour de chaque site. Pour tenir compte de la matrice paysagère entre les trois sites, les zones ont ensuite été regroupées pour former la zone d'étude d'environ 1 000 km<sup>2</sup>.

## Données utilisées

Pour la réalisation de la cartographie d'occupation du sol, nous avons eu recours à la carte d'occupation des sols produite par le Centre d'Expertise Scientifique sur l'occupation des sols (CES OSO - millésime de 2018), composante du pôle national THEIA. Pour la représentation des milieux humides, nous avons ajouté les « zones de

perméabilités humides et alluviales », cartographiées en 2015 par la DREAL. Nous avons complété la carte du paysage avec les éléments linéaires, tels que les cours d'eau et les infrastructures de transport, issus de la BD TOPO de l'IGN de 2018. Enfin, nous avons utilisé des cartographies d'habitats réalisées par des bureaux d'études sur le foncier des sites EDF en 2018.

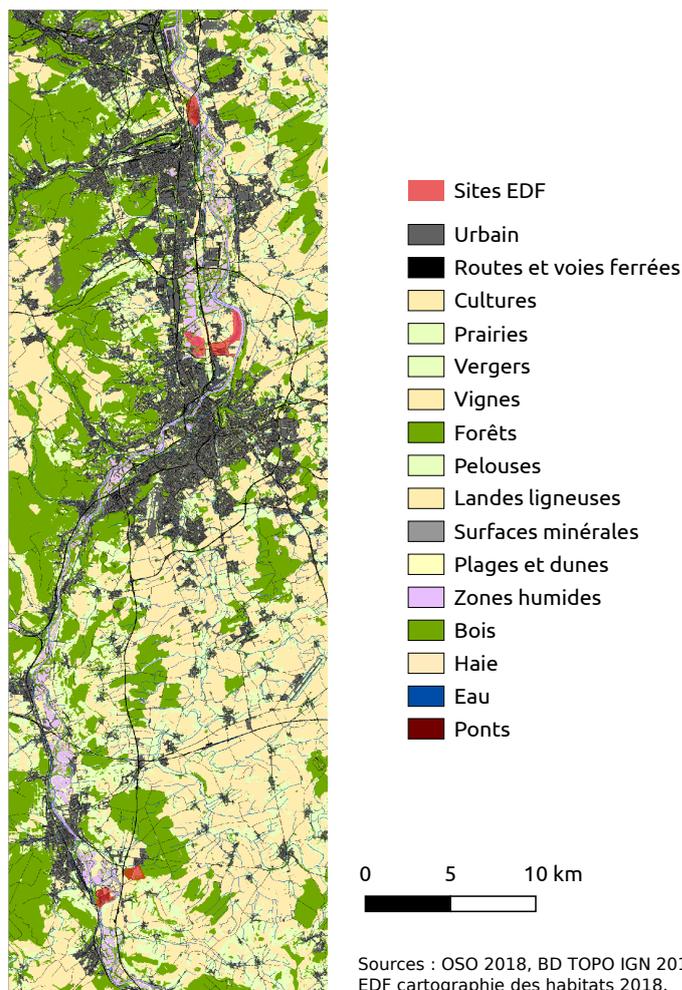


Figure 1 : Exemple de modélisation de la connectivité pour les rhopalocères (dispersion de 300 mètres)

Sources : OSO 2018, BD TOPO IGN 2018, EDF cartographie des habitats 2018.

## Graphab : 12 nouvelles réalisations à découvrir

Une fois ces différentes sources compilées, la cartographie d'occupation du sol a été transformée en une couche raster de 10 m de résolution spatiale (figure 1).

### Méthode

Nous avons fait le choix de raisonner par sous-trames et par guildes d'espèces pour que la démarche soit cohérente avec le Schéma de Cohérence Ecologique de la région Grand Est. Ainsi, nous avons retenu trois sous-trames (forestière, ouverte et humide) et quatre guildes :

1. Catégorie A, niveau d'exigence le plus faible : espèces plus ou moins ubiquistes, ou à grand rayon de dispersion et/ou ayant de bonnes capacités de franchissement
2. Catégorie B, niveau d'exigence moyen : espèces spécialisées ou à rayon de dispersion moyen et/ou ayant des capacités de franchissement moyennes. Cette guilde recouvrant le plus d'espèces, nous l'avons divisée en 2 sous-catégories, notamment pour distinguer l'avifaune.
3. Catégorie C, niveau d'exigence le plus fort : espèces spécialisées ou à faible rayon de dispersion et/ou ayant des capacités de franchissement faibles.

Pour chaque guilde, ont été estimés sur la base d'une revue de la littérature :

- la distance de dispersion maximale ;

- l'habitat principal (nœuds du graphe) ;

- le domaine vital ;

- les coûts de friction par type d'occupation du sol, c'est-à-dire la plus ou moins grande difficulté à traverser chaque type de milieu. L'habitat préférentiel et les autres catégories favorisant les déplacements ont la valeur de résistance minimale. A l'inverse, les éléments les plus difficiles à traverser ont une valeur maximale fixée ici à 10 000 (tableau 1).

La connectivité globale de la zone d'étude a été évaluée avec la métrique globale Probabilité de Connectivité (Saura et al., 2007). Pour évaluer l'importance des sites EDF pour la connectivité de chaque guilde, nous avons choisi l'Indice de Centralité Intermédiaire (Bodin et al., 2010).

### Résultats

La représentation cartographique des résultats de modélisation est adaptée pour réaliser un diagnostic des continuités écologiques à l'échelle d'un territoire, en mettant en évidence les secteurs à enjeux en termes d'habitats et de déplacements des espèces. Ce diagnostic permet d'évaluer globalement la position de site(s) industriel(s) par rapport aux enjeux de connectivité et les besoins de restauration ou de préservation de celle-ci. Elle permet d'envisager un certain nombre de mesures sur site pour maintenir et/ou améliorer leur contribution à la connectivité

**Paramètres utilisés dans Graphab**

Sous-trame	Guilde	Connexité	Taille min habitat en ha	Type de mouvement	Distance en m	Probabilité de mouvement	Topologie	Impédance	Valeur des coûts	Graphe élagué
Ouvverte	A Oiseaux des milieux ouverts	8	10	Dispersion	15000	0.05	Planaire	Coût	1/10/100/1000/10000	Oui
	B1 Petits et moyens mammifères		5		15000					
	B2 Papillons des milieux herbacés		0		10000					
	C Orthoptères des plaines et plateaux		0		5000					
Forestière	A Grands mammifères	8	200	Dispersion	50000	0.05	Planaire	Coût	1/10/100/1000/10000	Oui
	B1 Mammifères moyens ubiquistes		50		30000					
	B2 Oiseaux forestiers		1		30000					
	C Chiroptères forestiers		0.5		5000					
Humide	A Amphibiens ubiquistes	8	0	Dispersion	15000	0.05	Planaire	Coût	1/10/100/1000/10000	Oui
	B1 Oiseaux des zones humides		1		15000					
	B2 Odonates et papillons		0		10000					
	C Reptiles des zones humides et des boisements alluviaux		0		5000					

Tableau 1 : Paramètres utilisés dans Graphab

et à l'accueil des espèces. Étant donné les milieux présents dans l'environnement des sites d'étude, le site 1 participe principalement à la sous-trame ouverte, le site 2 à la sous-trame humide et le site 3 à la sous-trame forestière.

L'évaluation de la connectivité globale de la zone d'étude (figure 2) montre que la sous-trame forestière apparaît comme la mieux connectée sur le territoire d'étude pour les guildes B2 (oiseaux forestiers) et C (chiroptères forestiers). La sous-trame ouverte est relativement bien connectée pour la guildes B2 (papillons des milieux herbacés). La sous-trame humide est, relativement, la moins bien connectée quelle que soit la guildes.

Ce type de résultats fournit des éléments d'aide à la décision sur l'importance des milieux à préserver. À titre d'exemple, la connectivité de la sous-trame humide étant faible, on pourrait envisager des mesures qui permettraient de l'améliorer par la restauration de mares par exemple.

La figure 3 montre les graphes en vue réaliste pour la trame forestière et la guildes des grands mammifères tels que le chevreuil ou le sanglier (distance de dispersion de plusieurs dizaines de kilomètres et bonne capacité de franchissement des obstacles).

La représentation des nœuds et des liens du graphe (en vert sur la figure 3A) montre ainsi que deux sites (1 et 3) contribuent au réseau écologique des mammifères forestiers. Le site 2 apparaît, quant à lui, complètement déconnecté.

L'indice de Centralité Intermédiaire donne une indication sur la part de la connectivité soutenue par des sites à l'échelle du territoire (figure 3B). En mesurant la connectivité comme un nombre de parcours passant par un lien ou un nœud donné, cette métrique permet de mettre en évidence la notion de « passage obligé ». La représentation graphique de cet indice en trois classes d'importance (faible, moyenne et forte) montre que les corridors passant par les sites 1 et 3 ont une faible importance dans le réseau écologique de la guildes des grands mammifères forestiers.

Selon la stratégie foncière de l'entreprise, ce type de résultats permet d'aider au choix de l'emplacement de nouveaux aménagements en évitant le tracé des corridors et des mesures de restauration écologique *in situ* pour accroître la connectivité dans leur secteur. Des mesures de restauration écologique, comme la plantation d'arbres, favoriseraient ainsi la reconnexion du site 2.

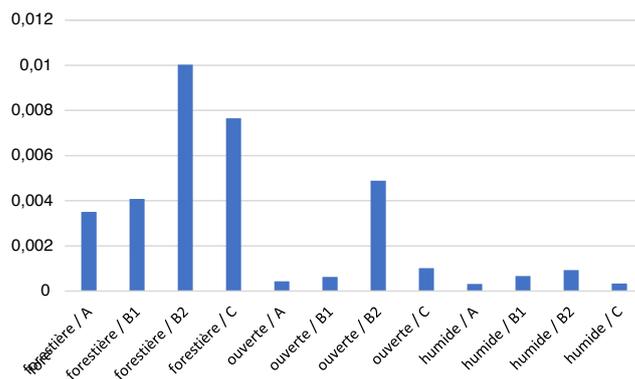


Figure 2 : Probabilité de connectivité des sous-tramés pour les différentes guildes d'espèces

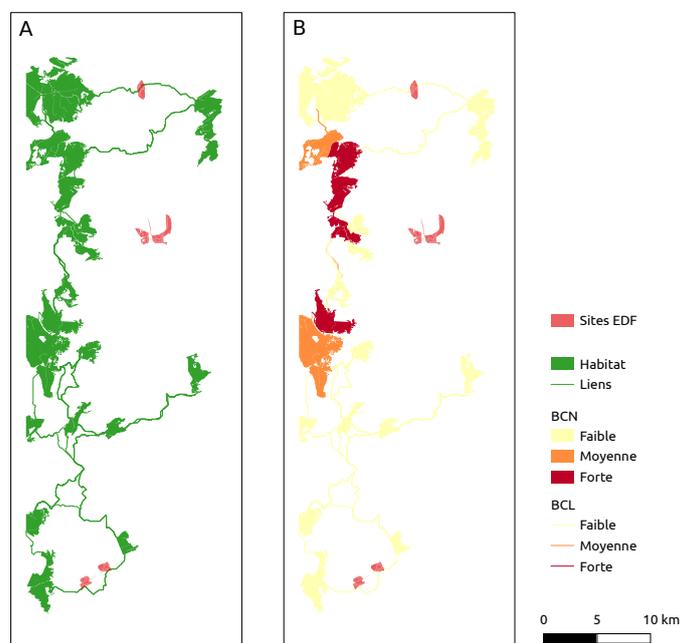


Figure 3 : Graphes paysagers pour l'étude des trois sites EDF (en rose) pour la sous-trame forestière et la guildes des espèces des grands mammifères (distance de dispersion de plusieurs dizaines de kilomètres et bonne capacité de franchissement des obstacles) : A) Représentation des nœuds et des liens du graphe en vue réaliste ; B) Représentation de l'Indice de Centralité intermédiaire en trois classes d'importance des nœuds et des liens du graphe en vue réaliste

## 6

## Application de la modélisation de réseaux d'habitat multi-espèces focales dans la cartographie du réseau écologique en Wallonie

Axel Bourdouxhe<sup>a</sup>  
Marc Dufrêne<sup>a</sup><sup>a</sup> Université de Liège, Gembloux Agro-Bio  
Tech, Biodiversity Ecosystems Landscapes**Problématique**

Dans les paysages fragmentés par l'activité humaine, les stratégies de conservation doivent impérativement préserver la connectivité entre les habitats pour maintenir les processus écologiques et soutenir la biodiversité. Cependant, les approches traditionnelles de cartographie des réseaux d'habitats se sont souvent centrées sur une seule espèce. Bien que ces espèces puissent parfois agir comme "parapluies" pour d'autres, cette approche néglige les besoins spécifiques d'un large éventail d'espèces, notamment celles ayant des exigences écologiques et des stratégies de déplacement différentes.

Pour pallier cette limitation, nous avons développé une approche multi-espèces visant à modéliser la connectivité pour plusieurs espèces en fonction de leur sensibilité à la fragmentation et de l'utilisation du paysage pour leurs déplacements. Cette méthode repose sur l'identification d'espèces focales sensibles à la fragmentation, dont les traits de vie permettent de représenter un ensemble d'espèces partageant des besoins de connectivité similaires. Les réseaux d'habitat créés pour chacune de ces espèces sont ensuite superposés pour former un réseau écologique global.

Cette approche soulève plusieurs questions de recherche essentielles auxquelles nous avons tenté de répondre : les réseaux basés sur ces espèces sensibles couvrent-ils adéquatement les besoins de connectivité d'espèces aux besoins de connectivité similaires ? ; le fait de modéliser des espèces ayant des traits de vie différents permet-il de révéler de nouvelles priorités de connectivité qui étaient auparavant ignorées ? ; comment gérer les conflits potentiels entre les besoins de connectivité de différentes espèces dans un même territoire, lorsque ces besoins se chevauchent ou divergent ?

**Zone d'étude**

L'étude est menée dans la région biogéographique de la Fagne-Famenne-Calestienne, en Belgique. Cette région se distingue par un paysage varié qui inclut des forêts feuillues, des pelouses calcaires, et des zones agricoles intensives qui fragmentent et isolent fortement les milieux (semi-) naturels. Les écosystèmes ciblés pour cette étude sont les pelouses calcaires et les forêts feuillues, qui se

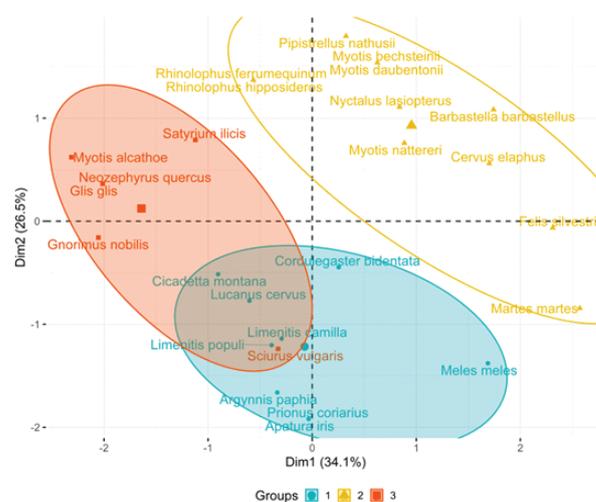


Figure 1 : Résultat de l'analyse multivariée regroupant les espèces des forêts feuillues sensibles à la fragmentation selon leurs besoins de connectivité.

disputent des zones marginales pour la conservation des habitats. Ces écosystèmes sont d'une importance cruciale pour la biodiversité, car ils abritent de nombreuses espèces végétales et animales, certaines étant menacées par la fragmentation des habitats.

**Données utilisées**

Les données biologiques utilisées proviennent de plusieurs sources, notamment Observations.be, Natagora, Natuurpunt, et des institutions publiques (SPW/DGARNE/DEMNA). Nous avons extrait les données de répartition des espèces, en ne conservant que les observations récentes (après le 31 décembre 1999) et validées, avec une marge d'erreur inférieure à 100 mètres. Pour la cartographie des habitats, des inventaires réalisés entre 2005 et 2020 ont été utilisés, utilisant la classification EUNIS. En complément, nous avons intégré des modélisations de végétation naturelle potentielle pour identifier les pelouses calcaires en dehors des inventaires existants. Enfin, les informations sur l'occupation du sol ont été tirées de la carte des écotopes de Wallonie (<https://maps.elie.ucl.ac.be/lifewatch/>)

## Paramètres utilisés dans Graphab

Connexité	Surface minimale des taches	Type de mouvement	Distance en m	Probabilité de mouvement	Topologie	Impédance	Valeur des coûts	Graphe élagué
8	1 ha à 26 ha selon l'espèce	Dispersion	100m à 11km selon l'espèce	Selon les données disponibles pour l'espèce	Planaire	Coût	1/10/100/1000	Oui

Tableau 1 : Paramètres utilisés dans Graphab

ecotopes\_wal.html), permettant de préciser notre modélisation des chemins de moindre coût. L'ensemble des données d'occupation du sol utilisées dans Graphab a été synthétisé sous la forme d'une grille d'hexagones de 1 ha.

## Méthode

Pour cartographier les réseaux d'habitat des deux écosystèmes choisis en utilisant le concept d'espèce focale sensible à la fragmentation, nous avons suivi un processus en quatre étapes :

1. Nous avons compilé une base de données contenant des traits de vie d'espèces liés à leur sensibilité à la fragmentation, ces traits ayant été évalués à partir des données d'occurrence disponibles et de la littérature scientifique. Les taxons suivants ont été considérés dans cette étude : amphibiens, oiseaux, reptiles, orthoptères, odonates, mammifères, lépidoptères et coléoptères.

2. Ces traits ont été utilisés dans une analyse multivariée pour chaque type d'écosystème afin de regrouper les espèces aux besoins similaires en termes de connectivité.

Cette analyse nous a permis de sélectionner trois espèces focales représentant chaque groupe.

3. Des analyses de connectivité ont été réalisées pour chaque espèce focale afin de modéliser les chemins de moindre coût (LCP, pour "Least Cost Path") et d'évaluer l'importance des fragments d'habitat et des LCP dans le maintien de la connectivité des écosystèmes. Pour cette modélisation, 21 catégories d'occupation du sol ont été considérées et le coût associé à chacune d'entre-elle a été assigné sur base de dires d'experts. Pour chaque espèce focale, un graphe seuillé sur la base de la capacité de dispersion de l'espèce a été créé en topologie planaire. Sur ce graphe, les valeurs de BC (Betweenness Centrality) de chaque lien et de chaque nœud ont été calculées. Les valeurs de BC ont ensuite été regroupées en 4 catégories de priorité selon la méthode des seuils naturels de Jenks. La priorité 1 a été attribuée à celle regroupant les valeurs les plus importantes de BC. Ceci, pour chaque graphe produit pour chaque espèce afin de pouvoir comparer les différents réseaux d'habitats.

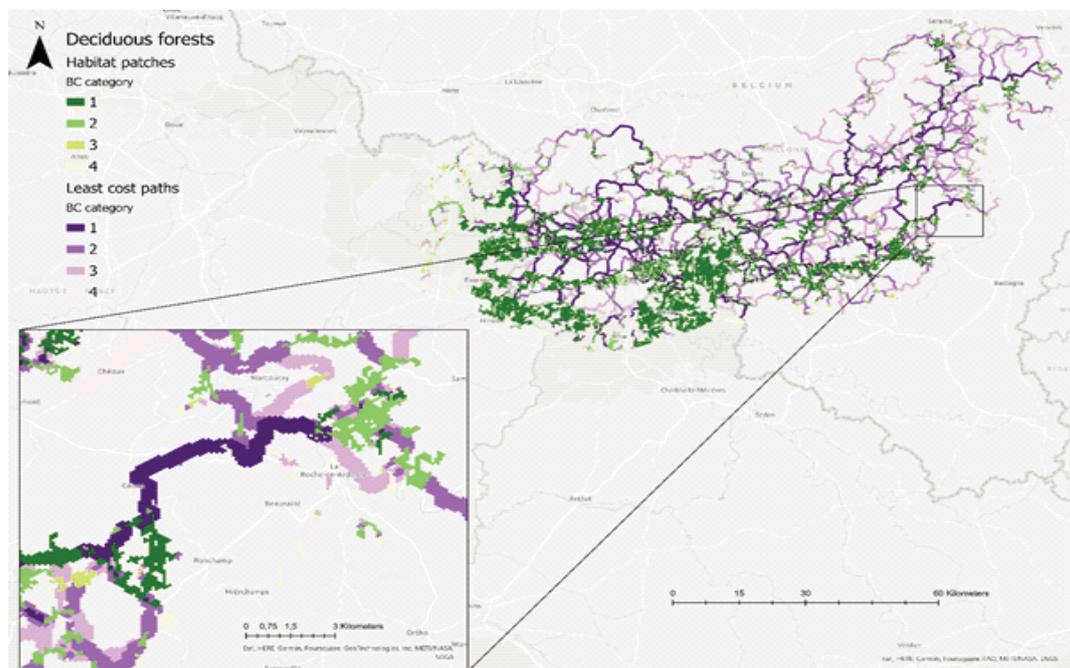


Figure 2 : Cartographie du réseau des forêts feuillues résultant de la superposition des réseaux d'habitat des 3 espèces focales (Murin de Natterer, Petit sylvain et Thècle du chêne).

4. Les réseaux thématiques ont été construits en superposant les réseaux des espèces focales. Nous avons comparé ces réseaux en analysant le chevauchement entre les LCP les plus prioritaires.

En plus de cela, nous avons choisi deux autres espèces appartenant au même groupe qu'une des espèces focales sélectionnées précédemment et avons cartographié leurs réseaux d'habitat. Nous avons ensuite comparé leurs réseaux d'habitat à ceux de l'espèce focale associée afin d'évaluer l'applicabilité de ce concept.

Enfin, nous avons analysé le chevauchement des LCP les plus importants pour la connectivité entre les réseaux de pelouses sèches et de forêts feuillues.

### Résultats

Les résultats montrent que les espèces ont été regroupées en trois clusters à l'aide de l'algorithme PAM pour chaque type d'écosystème. Pour les pelouses sèches, trois groupes distincts d'espèces de lépidoptères ont été identifiés : les espèces rares avec une large niche écologique telles que l'Hespérie des sanguisorbes (*Spialia sertorius*), les espèces à haute capacité de dispersion telles que la Mélitée du plantain (*Melitea cinxia*), et les espèces rares avec une enveloppe écologique spécifique telles que le Moiré sylvicole (*Erebia aethiops*). Pour les forêts feuillues, deux groupes d'espèces se chevauchent, et les espèces choisies comme représentatives sont le Murin de Natterer (*Myotis nattereri*, chiroptère), le Petit sylvain (*Limnitis camilla*, lépidoptère) et la Thècle du chêne (*Neozephyrus quercus*, lépidoptère) (Figure 1). Le Lucane cerf-volant (*Lucanus cervus*, coléoptère) et le Blaireau européen (*Meles meles*,

mustélide) ont été choisis pour modéliser leurs réseaux d'habitat et les comparer avec celui du Petit sylvain, autre espèce focale (Figure 2).

Un réseau d'habitat a été construit pour chaque espèce clé, et ces réseaux ont été fusionnés pour créer un réseau de pelouses sèches et un réseau de forêts feuillues. Lorsque des éléments de réseaux d'espèces focales se superposent, c'est la priorité la plus élevée sur la base des métriques de connectivité qui est gardée.

Des comparaisons des réseaux ont montré que 80 % des corridors pour le Lucane cerf-volant sont inclus dans le réseau du Petit sylvain, tandis que 75 % des corridors du Blaireau européen en sont exclus. Ces résultats montrent que l'analyse multivariée permet d'évaluer à quel point les besoins de connectivité des espèces se superposent ou non.

En comparant les réseaux des différentes espèces focales des forêts feuillues, il s'avère que 30 % des corridors de l'espèce à plus faible dispersion ne sont pas recouverts par les corridors de l'espèce à plus grande dispersion (Figure 3). Cela souligne l'intérêt d'appliquer une approche multi-espèces avec différents besoins de connectivité, et ce même à l'échelle régionale.

L'analyse du recouvrement des corridors les plus prioritaires des réseaux des pelouses sèches et des forêts feuillues montre un taux de recouvrement de 8 %. La priorisation des corridors à l'aide des métriques de connectivité permet d'identifier des enjeux propres à chaque écosystème et facilite donc la prise de décision quant à l'écosystème prioritaire.

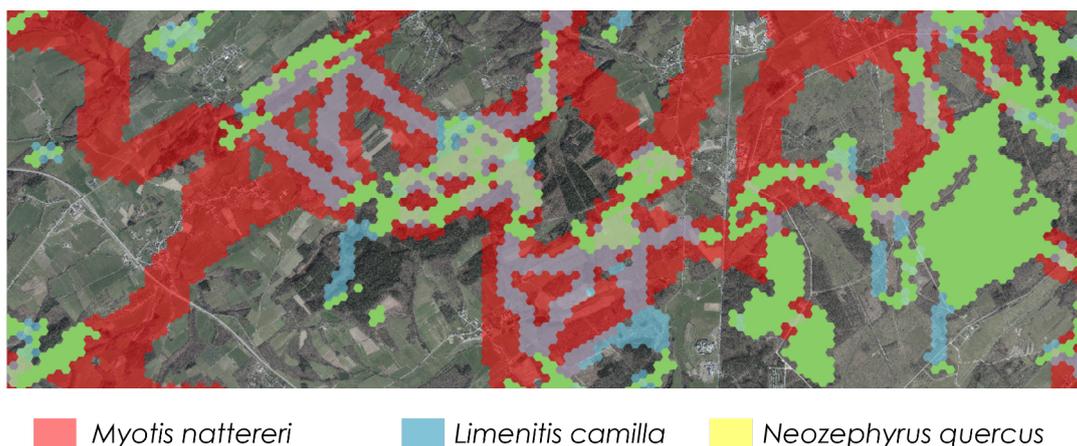


Figure 3 : Superposition des réseaux d'habitat des 3 espèces focales pour le réseau des forêts feuillues (Murin de Natterer (*Myotis nattereri*), Petit sylvain (*Limnitis camilla*) et Thècle du chêne (*Neozephyrus quercus*))

# 7 La contribution potentielle des lots immobiliers aux trames vertes urbaines

Tanguy Louis-Lucas<sup>a</sup>  
Hervé Moal<sup>a</sup>  
<sup>a</sup> ARP Astrance

## Problématique

Les menaces qui pèsent sur la biodiversité impliquent de mettre à profit l'ensemble des espaces qui pourraient lui être favorable. Ainsi, les espaces urbains et périurbains constituent un potentiel d'actions en plein développement et leur mobilisation est un enjeu majeur.

Les aires urbaines sont caractérisées par une forte proportion de surfaces imperméabilisées et donc une faible quantité d'espaces végétalisés. Ces derniers sont pour la plupart artificialisés (palette végétale horticole, gestion) et sont en partie imperméabilisés en raison des usages qui y sont associés. Par ailleurs, les villes sont sources de multiples pollutions environnementales (sonore, chimique, lumineuse...). Pourtant, les villes présentent des diversités faunistiques et floristiques remarquables (plus de 2800 espèces sauvages observées dans l'agglomération parisienne entre 2010 et 2020).

Pour améliorer la place de la biodiversité en ville, il est nécessaire à la fois d'augmenter le nombre d'espaces verts végétalisés mais également de planifier leur installation afin d'optimiser leur implantation pour reconnecter des habitats entre eux et améliorer la perméabilité de la ville, c'est-à-dire, de mettre en œuvre des trames écologiques urbaines fonctionnelles.

Dans ce contexte, ARP Astrance a construit un indicateur du potentiel de connectivité pour évaluer la fonctionnalité des trames écologiques urbaines. Cet indicateur, calculé à l'échelle communale, est utile pour prioriser et planifier des mesures favorables à la connectivité du paysage urbain par lots immobiliers.

## Zone d'étude

Notre travail a été réalisé sur l'Île de France. Il est le fruit d'un partenariat de recherche avec 5 collectivités

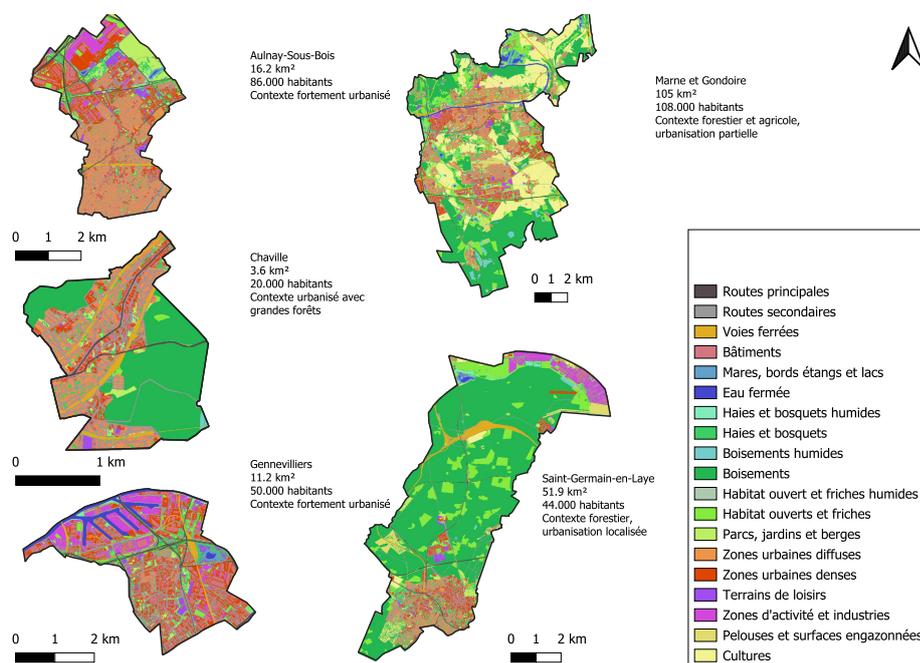


Figure 1 : Collectivités partenaires du projet

franciliennes (Aulnay-sous-Bois, Chaville, Gennevilliers, Marne et Gondoire et Saint-Germain-en-Laye) et une entreprise (CDC habitat Île-de-France). Ce partenariat est mené conjointement avec l'Agence régionale de la biodiversité d'Île-De-France et supervisé par un comité scientifique spécifique. Les communes partenaires ont des contextes écologiques très variés. En effet, les habitats (boisements, parcs et jardins et milieux ouverts) représentent 13 % du territoire de Gennevilliers, 49,6 % de Chaville, 17,6 % d'Aulnay-sous-Bois, 74,8 % de Saint-Germain-en-Laye et 43,1 % de Marne et Gondoire.

## Méthode

Cette étude reprend toutes les phases classiques d'une étude utilisant Graphab : la création d'une cartographie d'occupation du sol, l'identification d'espèces cibles et de leur capacité de déplacement, la modélisation et le calcul des métriques.

## Création de la carte d'occupation du sol

Nous avons réalisé une carte d'occupation du sol à l'échelle de l'Île-de-France en agrégeant plusieurs données :

- Le MOS de l'Institut Paris Region détail l'occupation du sol de la région Ile-de-France en 81 postes. Celui-ci est régulièrement mis à jour. Nous avons utilisé la version de 2021.

- La BD TOPO de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). La BD TOPO décrit les éléments du territoire français et notamment les infrastructures telles que les routes et les chemins de fers. Cette base de données est mise à jour trimestriellement.

- Small Woody Features, est une couche des petits éléments forestiers produit en 2021 à l'échelle de l'Europe par Copernicus et le Land Monitoring Service.

- L'OSO produit par les équipes du Cesbio, de l'UMR Ispa, dynafor, CNRM UMR Tetis, IGN-matis, Costel et Sertit en 2020. Nous utilisons cette donnée pour les éléments en dehors de l'Île-de-France zone tampon de 5 km) car celle-ci est produit à l'échelle de la France entière.

Les cartes d'occupation du sol pour chaque commune partenaire ont été réalisées avec une zone tampon de 5 kilomètres pour que les particularités du tracé administratif n'affectent pas les résultats de la modélisation.

## Identification d'espèce cible et distance de déplacement

Nous avons modélisé les déplacements des espèces communes de la biodiversité urbaine, c'est-à-dire des espèces généralistes qu'on retrouve dans les zones urbaines et périurbaines et qui sont relativement dépendantes des trames écologiques. Nous avons défini 5 types d'espèces différentes en fonction de leur distance de dispersion maximale (petite, moyenne, grande) et du mode de dispersion (terrestre ou volante) à travers trois sous trames (forestière, parcs et jardins, friches et milieux herbacés). Les espèces terrestres à grande capacité de dispersion ne sont pas incluses dans l'étude car elles ne fréquentent pas ou peu les milieux urbains. Ainsi, au total nous avons modélisé 15 guildes d'espèces virtuelles qui représentent plus de 100 espèces.

## Calculs des métriques et interpolation

Les métriques de flux (F) et centralité intermédiaire (BC) ont été calculées à l'échelle locale. Les différentes métriques ont été interpolées sur l'ensemble de la zone d'étude pour toutes les espèces virtuelles et les sous trames.

## Constitution de l'indicateur par lots immobiliers

Les différentes interpolations ont été normalisées et moyennées par sous trame. Ainsi, nous obtenons un indicateur de potentiel de connectivité par sous trame. La moyenne des trois sous trames génère l'indicateur de potentiel de connectivité (IPC). Enfin, on intègre

Catégories d'occupation du sol	Milieux boisés					Parcs et jardins					Friches et milieux herbacés				
	SPB1	SPB2	SPB3	SPB4	SPB5	SPJ1	SPJ2	SPJ3	SPJ4	SPJ5	SPH1	SPH2	SPH3	SPH4	SPH5
Boisements	1	1	1	1	1	100	100	100	100	100	500	500	500	100	100
Boisements humides	1	1	1	1	1	100	100	100	100	100	500	500	500	100	100
Eau fermée et hydrographie	1000	1000	1000	100	100	1000	1000	1000	100	100	1000	1000	1000	100	100
Mares, Bords étangs et de lacs	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Milieux ouverts et friches	100	100	100	100	10	100	100	100	10	10	1	1	1	1	1
Milieux ouverts et friches humides	100	100	100	100	10	100	100	100	100	10	1	1	1	1	1
Parcs et jardins	10	10	10	10	1	1	1	1	1	1	100	100	100	10	1
Haies et bosquets	1	1	1	1	1	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Haies et bosquets humides	1	1	1	1	1	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Pelouses	500	500	500	100	100	10	10	1	10	1	10	10	10	10	1
Cultures	1000	1000	1000	500	500	1000	1000	1000	500	500	1000	500	1000	500	500
Routes principales	1000	1000	1000	500	500	1000	1000	1000	500	500	1000	1000	1000	500	500
Routes secondaires	500	500	500	100	100	500	500	500	100	100	500	500	500	100	100
Voies ferrées	500	500	500	100	100	500	500	500	100	100	100	100	100	10	10
Zones urbaines peu denses	500	500	500	100	100	500	500	500	100	100	500	500	500	100	100
Zones urbaines denses	1000	1000	1000	500	500	1000	1000	1000	500	500	1000	1000	1000	500	500
Zones d'activités et industries	1000	1000	1000	500	500	1000	1000	1000	500	500	1000	1000	1000	500	500
Terrain de loisirs plein air	500	500	500	100	10	500	500	500	100	10	500	500	500	100	10
Bâtiments	10 000	10 000	10 000	10 000	1000	10 000	10 000	10 000	1000	1000	10 000	10 000	10 000	1000	1000

Tableau 1 : Matrice de friction utilisée pour l'étude

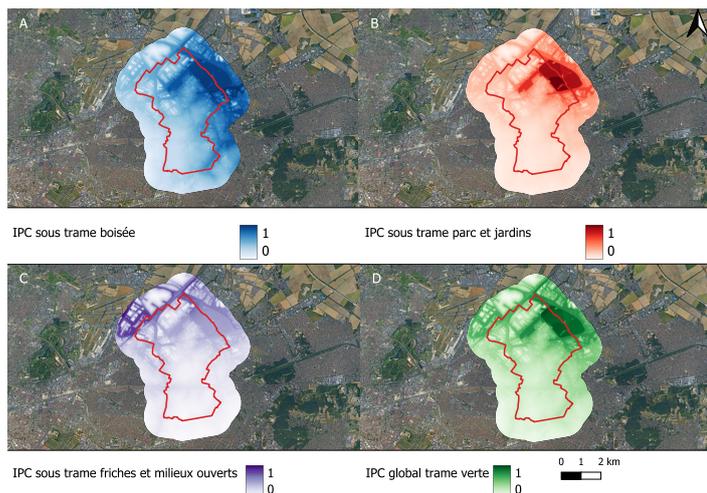


Figure 2 : IPC pour la sous trame boisée (A), parcs et jardins (B), friches et milieux ouverts (C) et IPC global (D) de la commune d’Aulnay-Sous-Bois.

uniquement aux lots immobiliers<sup>1</sup> les valeurs de l’IPC. Les lots sont alors classés en cinq quantiles en fonction de leur valeur d’IPC de A (valeurs de l’IPC les plus élevées) à E (valeurs les plus faibles).

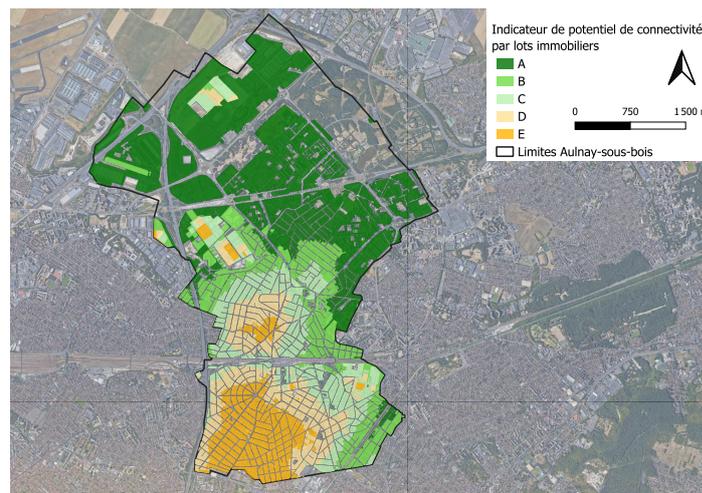


Figure 3 : Indicateur de potentiel de connectivité par lots immobilier

trames. D’après nos analyses, sur la commune d’Aulnay-sous-Bois, la sous-trame forestière représente un enjeu très important au nord-est de la commune et au sud-est en raison de la présence du Parc départemental du Sausset et de la proximité avec le Parc forestier de la Poudrerie.

L’IPC global, c’est-à-dire la moyenne arithmétique des indicateurs des trois sous-trames permet d’identifier les zones à enjeux de trame verte. Le Parc du Sausset apparaît comme la zone ayant le potentiel de connectivité le plus important. A l’inverse, le centre de la ville et la zone sud-ouest (principalement pavillonnaire) représente un enjeu de moindre importance pour la trame verte.

L’indicateur par lots immobiliers, transposition des valeurs de l’indice global aux lots immobiliers, permet aux collectivités de traduire en termes d’urbanisme les trames écologiques urbaines. En effet, il aide par exemple, à classer les lots immobiliers selon leur importance potentielle pour la connectivité. Avec les différents partenaires nous avons identifié plusieurs utilisations de cet indicateur :

- Prioriser l’action des communes sur les lots en fonction de leur note et de la politique de la ville
- Réviser des documents d’urbanisme (PLU, ...)
- Définir une stratégie biodiversité à l’échelle de la ville
- Évaluer l’impact d’un projet d’aménagement sur la connectivité
- Noter et classer des immeubles ou actifs

En 2024, pour approfondir notre travail, le partenariat a eu pour objectif de :

- Mesurer l’importance des lots immobiliers pour la connectivité des milieux humides,
- Croiser les enjeux mis en lumière par l’indicateur de connectivité par lots avec les pollutions lumineuse (trame noire) et sonore (trame blanche).

## Paramètres utilisés dans Graphab

Connexité	8
Surface minimale des taches	2000 m <sup>2</sup>
Type de mouvement	Dispersion
Sous trames étudiées	Boisée ; Parcs et jardins ; Friches et milieux herbacées
Distance en mètres	Boisée : 500 m, 1 km, 4 km, 2 km et 5 km ; Parcs et jardins : 200 m, 500 m, 1 km, 3 km, 5 km ; Friches et milieux herbacés : 500 m, 1,5 km, 2 km, 5 km.
Probabilité de mouvement	0,05
Topologie	Planaire
Impédance	Coût
Valeur des coûts	(Tableau 1)
Graphe élagué	Non

Tableau 2 : Paramètres utilisés dans Graphab

## Résultats

Pour chaque commune partenaire, nous obtenons donc une carte de l’indice de potentiel de connectivité (IPC) par sous trame. Ces cartes nous permettent d’identifier les corridors, et de procéder à une hiérarchisation des sous-

<sup>1</sup> Les lots immobiliers sont des entités du MOS 81 susceptibles de correspondre à des lots immobiliers (de 15 à 19, de 22 à 24, 26, de 28 à 36, de 43 à 53, de 58 à 72, 75, de 79 à 81).

# 8

## Évaluation des continuités écologiques et application de la séquence ERC avec l'outil MitiConnect

Simon Tarabon, Élise Tollet <sup>a</sup>

a Ubiquiste - Lyon

### Problématique

Les politiques environnementales, tant au niveau européen que national, se sont dotées de nouveaux outils et obligations réglementaires. La Trame verte et bleue (TVB) est un dispositif en faveur des écosystèmes ayant émergé dans les années 2010, qui vise à mettre en réseau les habitats des espèces et à identifier les continuités écologiques essentielles à la viabilité des populations. La séquence Éviter-Réduire-Compenser (ERC), renforcée par la loi de reconquête de la biodiversité, la nature et les paysages de 2016, est un autre outil réglementaire qui fixe un objectif d'absence de perte nette de biodiversité.

Néanmoins, malgré ces évolutions réglementaires, des avancées scientifiques et la généralisation d'outils comme Graphab, le triptyque ERC souffre de nombreuses limites d'ordre opérationnel.

Des difficultés subsistent quant à la reproductibilité des démarches d'évaluation malgré une prise de conscience généralisée et un effort collectif entre porteurs de projets et acteurs les accompagnant vers de meilleures pratiques.

MitiConnect<sup>1</sup>, né de ce constat, a été développé à partir de Graphab dans le cadre du Centre de ressources de la Trame verte et bleue. Il est le fruit de nombreux échanges entre les auteurs et un groupe de travail (GT) multidisciplinaire<sup>2</sup>. L'outil est conçu selon une logique matricielle, en intégrant la préparation des données d'entrée, puis facilitant la mise en œuvre de la séquence ERC. Son objectif principal est d'assurer une progression logique indispensable à la bonne démonstration de l'équivalence écologique pour la connectivité écologique.

<sup>1</sup> MitiConnect est un outil open-source (plugin QGIS).

<sup>2</sup> Le GT était composé de services de l'État, de missions régionales de l'autorité environnementale (MRAe), de chercheurs experts sur les continuités écologiques et sur la séquence ERC, de bureaux d'études et de maîtres d'ouvrage du Club Infrastructures Linéaires et Biodiversité (CILB). Ce GT s'est retrouvé à de nombreuses reprises entre 2021 et 2023.

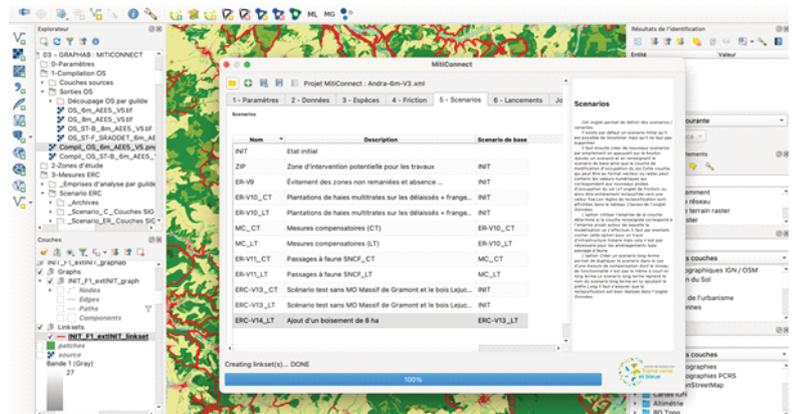


Figure 1 : Présentation de l'outil.

Nous présentons ici l'outil à partir d'un cas d'étude lié à un projet d'aménagement en région Grand Est. Les éléments du projet ne sont pas représentés dans cet article pour des questions de confidentialité et d'avancée des études.

### Zone d'étude

L'aire d'étude correspond à une zone d'un rayon de 30 km autour de la zone centrale du projet, définie en fonction des espèces cibles les plus dispersantes. Le périmètre d'intervention du projet s'étend sur près de 600 ha répartis sur plusieurs sites comprenant la construction ou la réhabilitation de bâtiments et d'infrastructures de transports (routiers et ferrés). Le territoire, à la topographie peu marquée, est principalement composé de plaines agricoles entrecoupées par trois grands cours d'eau, et des massifs boisés de plus ou moins grandes tailles mais abritant une diversité biologique remarquable. Les milieux ouverts parsèment aussi le territoire sous forme de prairies naturelles et pâturées avec un intérêt écologique particulier et une richesse à préserver, fragilisée par une faible connectivité entre les habitats. Le développement urbain est quant à lui limité à quelques grandes agglomérations peu étendues, et à un maillage de villages.

## Données utilisées

La carte d'occupation du sol a été construite par la compilation de plusieurs sources de données issues de l'OCS GE2 (Occupation du Sol à Grande Échelle en région Grand Est), d'inventaires départementaux ou régionaux (zones humides, mares, milieux thermophiles) et de données récoltées localement par le porteur de projet depuis une dizaine d'années. L'ensemble de ces données a été hiérarchisé et structuré en 27 classes « simplifiées » d'occupation du sol à une résolution de 5 m.

Compte tenu de la diversité des espèces concernées par les continuités écologiques et de l'échelle spatiale d'analyse, une approche par groupes fonctionnels d'espèces a été retenue. Plus de 1 400 espèces ont été répertoriées sur l'aire d'étude élargie. Par un exercice de synthèse, 11 guildes d'espèces ont été définies et regroupés en 3 sous-trames relatives aux milieux forestiers, prairiaux et bocagers.

Les réservoirs de biodiversité pour chaque sous-trame ont été identifiés à partir des classes de l'occupation du sol. Un critère de taille minimale des habitats a également été pris en compte et des coefficients de friction ont été attribués à chaque groupe d'espèces pour différentes classes d'occupation du sol.

## Méthode

Les réseaux écologiques des espèces cibles à l'état initial ont été évalués sur une étendue d'analyse correspondant à 1,5 fois la capacité maximale de dispersion de l'espèce centrée autour du projet.

Plusieurs scénarios ont ensuite été testés et comparés à partir de l'indice de Connectivité équivalente (EC) :

- Projet brut correspondant à la zone d'intervention la plus large en la considérant intégralement remaniée et défavorable pour les espèces. Il s'agit donc du scénario le plus pessimiste où les incidences sont les plus importantes,

- Mesures d'évitement correspondant à la zone d'intervention dont les emprises se limitent aux zones remaniées nécessaires à la réalisation du projet. Les zones remaniées n'accueillent à ce stade aucune mesure écologique et restent défavorable pour les espèces.

- Mesures de réduction correspondant à l'évitement et à la valorisation écologique de tous les espaces remaniés pour maximiser EC à partir de végétalisation sous forme de haies pluristrates avec bandes enherbées et de bosquets.

- Mesures compensatoires correspondant aux étapes précédentes et aux sites et au programme prévisionnel de travaux envisagés dans les études antérieures.

L'ensemble des données d'entrée par espèce et par scénarios ont été compilées et l'ensemble des simulations

### Paramètres utilisés dans Graphab

Sous-trame/ Guilde	Forestière F1	Forestière F2	Forestière F3	Ouverte - Bocagères B1	Ouverte - Bocagères B2	Ouverte - Prairiale P1	Ouverte - Prairiale P2
Connexité	8						
Taille min habitat (ha)	2	0.5	0.3	2	0.5	2	0.1
Type de mouvement	Dispersion						
Distance en m	10000	3000	1000	5000	3000	5000	500
Probabilité de mouvement	0.05						
Topologie	Planaire						
Impédance	Coût						
Valeur des coûts	1/10/100/500/1000						
Graphe élagué	Oui						

Tableau 1 : Paramètres utilisés dans Graphab

lancées à la chaîne à partir de MitiConnect. À chaque étape, le scénario précédent est pris en compte et une nouvelle occupation du sol compilée « par empilement ».

La dimension temporelle des aménagements paysagers et la notion d'impact intermédiaire ont été intégrées dans notre évaluation. Pour les mesures de réduction et de compensation relatifs aux boisements et aux haies pluristrates, différents coûts de friction ont été définis. Un boisement jeune est par exemple associé à court à terme à un milieu relativement ouvert, alors qu'il ne devra un véritable boisement à long terme.

## Résultats

La démarche mise en œuvre permet de montrer que l'équivalence écologique est atteinte pour l'ensemble de la biodiversité cible à long terme, lorsque l'ensemble des plantations deviendront fonctionnelles.

La démonstration de l'équivalence écologique doit toutefois être associée à des mesures d'accompagnement ou des recommandations spécifiques pour assurer que les bénéfices des mesures soient bien atteints. Les simulations se basent sur des catégories d'occupation du sol simplifiée permettant d'avoir une vision globale du fonctionnement des réseaux écologiques, mais sans prendre en compte tous les facteurs d'incertitudes sur la faisabilité et la réussite de mesures.

Ainsi, un ensemble de recommandations ont été émises : principes de plantations, d'aménagement d'ouvrages pour la petite faune, de gestion des nuisances (pollution lumineuse, utilisation de produits phytosanitaire, gestion et d'entretien des espaces verts, etc.).

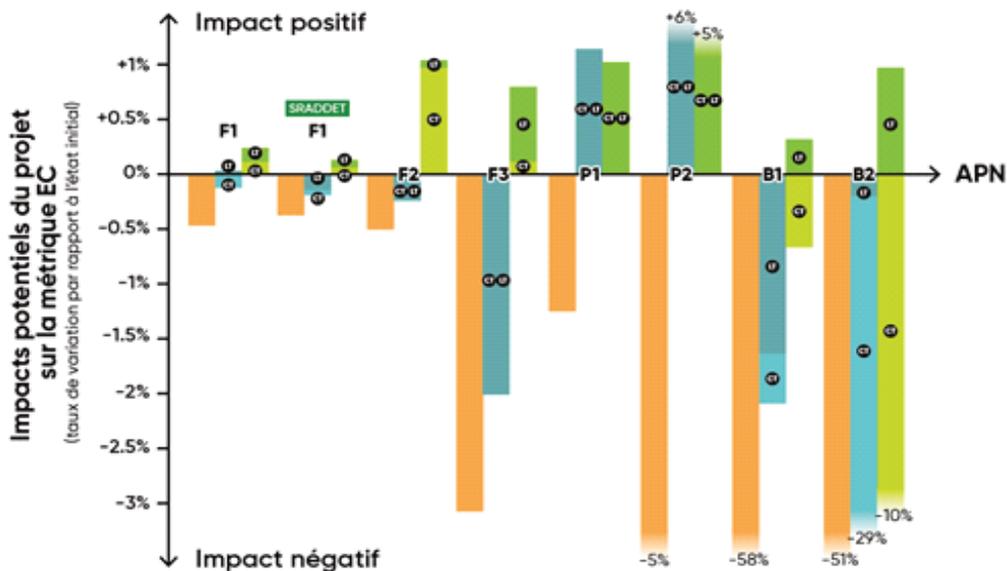


Figure 2 : Synthèse de l'évaluation de l'impact résiduel du projet et des mesures d'évitement et de réduction (en bleu), puis de compensation (en vert) sur la métrique EC pour l'ensemble des guildes d'espèces. Les pertes sont calculées par la différence entre les valeurs d'EC à l'état initial et issues des scénarios. Les impacts résiduels sont comparés à l'impact « brut » du projet sans mesures (en orange). Les impacts intermédiaires, à court terme, sont représentés en bleu clair (MR) ou vert clair (MC). Les guildes Fi se réfèrent aux milieux forestiers, Pi aux milieux ouverts, Bi aux milieux bocagers.

# 9

## Approches multi-espèces pour une infrastructure linéaire de transport et identification des liens prioritaires à maintenir

Céline MATHIEU <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Biotope

### Problématique

La Communauté européenne d'Alsace envisage de réaménager un tronçon de la RD1062 afin d'améliorer son tracé, incluant un contournement et l'aménagement d'une piste cyclable. Cette route départementale est un élément fragmentant principal du secteur car classée en catégorie 3 à trafic élevé (plus de 2000 voitures/heure pendant les heures de pointes). Ce projet, bien que bénéfique pour la mobilité et la sécurité des usagers, soulève des questions quant à son impact sur les réseaux écologiques locaux. En effet, la modification du tracé routier pourrait fragmenter les habitats naturels et perturber les corridors écologiques essentiels pour la faune locale.

Pour évaluer ces impacts, une approche multi-espèces a été adoptée afin de réaliser un diagnostic précis du réseau écologique du secteur concerné. Cette analyse vise à identifier les éléments de la trame verte et bleue atteints par ce tracé routier ainsi que les corridors écologiques prioritaires à restaurer pour maintenir la connectivité écologique et assurer la pérennité des espèces locales.

Les objectifs de ce projet sont pluriels : renforcer la sécurité des usagers, maintenir un itinéraire grand gabarit pour les véhicules, et développer des voies favorisant l'intermodalité. En outre, il est crucial de concilier ces objectifs avec la préservation de la biodiversité et la réduction de la fragmentation des habitats. La problématique centrale de cette étude est donc de déterminer comment le nouveau tracé de la RD1062 peut être aménagé de manière à minimiser les impacts négatifs sur les réseaux écologiques, tout en maximisant les bénéfices pour les usagers de la route. Il s'agit également d'identifier les mesures de compensation écologique nécessaires pour atténuer les effets du projet sur l'environnement.

### Zone d'étude

Le projet de déviation de la RD1062, initié par Mertzwiller dans les années 90 et repris par la Collectivité européenne d'Alsace (CeA), vise à réduire la congestion et les nuisances routières. La zone d'étude couvre Mertzwiller, Gundershoffen et Schweighouse-sur-Moder, dans le Bas-Rhin (67), région Grand Est. Elle inclut trois secteurs : Mertzwiller, principalement agricole et forestier avec des prairies permanentes et un centre urbain ; la piste cyclable et contre-allée forestière en zone boisée ; et la zone

d'activité de Schweighouse-sur-Moder, équipée en commerces et industries. Les enjeux de biodiversité sont importants avec 2 zonages Natura 2000 (1 ZPS et 1 ZSC), 18 zonages d'inventaires, 3 réservoirs de biodiversité et 2 corridors écologiques nationaux du SRCE (CN8 et CN9). L'analyse des continuités écologiques a été définie par une zone tampon de 12,5 km autour de l'aire d'étude rapprochée. Cette zone tampon correspond à 2,5 fois la distance de dispersion de l'espèce cible retenue pour la modélisation, ayant la plus grande capacité de dispersion.

### Données utilisées

La carte du paysage a été élaborée en croisant les données de l'OCS Grand Est (OCS GE2, 2019) et les inventaires de terrain de l'aire d'étude rapprochée. Pour intégrer les déplacements des espèces des milieux humides, des typologies ont été définies selon la distance aux surfaces en eau et la présence avérée ou supposée de zones humides. La présence est avérée si issue d'inventaires réglementaires, et supposée si issue des zones à dominantes humides (ZDH). Cette carte du paysage, enrichie par les zonages du patrimoine naturel, ainsi que par les trames vertes et bleues régionales (SRCE) et locales (SCoT, PLUi), a permis de caractériser les sous-trames d'habitats du secteur d'étude. L'identification des sous-trames a permis de retenir 19 espèces cibles et d'orienter les sources bibliographiques nécessaires à la caractérisation de leurs capacités de déplacement et des facteurs influants. Les espèces cibles présentant des critères similaires ont été regroupées en 11 espèces virtuelles comme les Amphibiens de milieux ouverts ou les Mammifères semi-aquatiques.

Les réservoirs de biodiversité pour chaque sous-trame ont été identifiés à partir des classes de l'occupation du sol. Un critère de taille minimale des habitats a également été pris en compte et des coefficients de friction ont été attribués à chaque groupe d'espèces pour différentes classes d'occupation du sol.

### Méthode

La méthode se décompose en deux grandes étapes : définir le réseau écologique et identifier les ruptures de continuités écologiques à restaurer pour préserver la connectivité lors de l'aménagement de l'infrastructure.

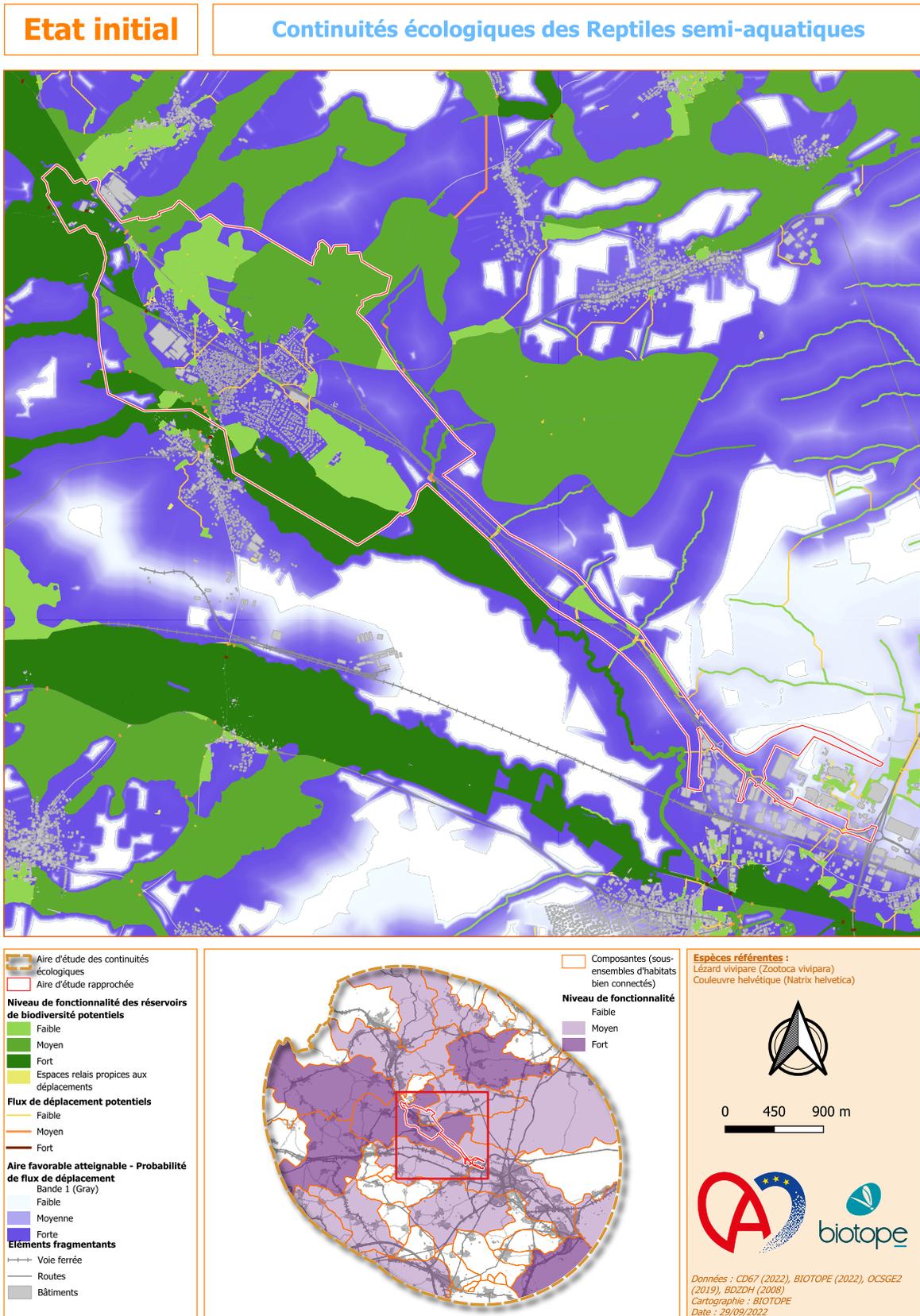


Figure 1 : Continuités écologiques des Reptiles semi-aquatiques (Biotope, 2022)

## Graphab : 12 nouvelles réalisations à découvrir

Dans la première étape, le réseau écologique est constitué de taches d'habitats et de chemins de déplacement. Pour identifier les taches d'habitats des 11 espèces virtuelles, les habitats favorables à chacune sont sélectionnés d'après la typologie de la carte du paysage, avec un seuil minimal de surface précisé. Pour les Amphibiens forestiers, plusieurs habitats de voisinage ont été inclus dans le modèle pour couvrir leur cycle de vie complet.

Pour identifier les chemins de déplacement potentiels, une synthèse de la perméabilité propre aux 19 espèces réelles rattachées aux 11 espèces virtuelles a été menée pour chaque typologie de la carte du paysage. Les corridors surfaciques ont ensuite été générés.

L'importance des taches et des chemins dans le réseau écologique a été évaluée à l'aide de plusieurs métriques. Les métriques globales, comme EC, permettent de comparer le réseau avant et après projet d'aménagement en calculant la quantité d'habitat atteignable du réseau. Les métriques locales, telles que BC, CF, IF et la delta-métrique dPC hiérarchisent les éléments à l'échelle de l'aire d'étude. BC permet d'identifier la fréquence d'utilisation de l'objet étudié (chemin, tache, composante) ; CF est similaire à BC mais étudie l'ensemble des connexions possibles et pas uniquement la plus courte ; IF permet de faire ressortir le cœur du réseau ; dPC évalue le rôle de pas japonais de la tache. Des métriques ont également été calculées pour les composantes (sous-ensembles bien connectés) de chaque graphe afin d'identifier leur niveau de fonctionnalité : EC, PC et S#F, où PC estime la probabilité que 2 individus tirés au hasard dans la composante arrivent à entrer en contact et S#F correspond à la somme des dispersions potentielles à partir de toutes les taches de la composante.

La modélisation a permis d'identifier les chemins impactés par le projet d'aménagement. La pertinence des emplacements des passages à faune, identifiés par Graphab, a été soumise à l'avis d'experts. Globalement, le résultat a été satisfaisant, avec quelques ajustements de quelques mètres pour s'aligner, par exemple, à un layon forestier. La faisabilité technique de ces passages à faune (notamment leurs dimensions en fonction des espèces visées), tout comme le tracé définitif de la déviation routière, reste encore à l'étude à ce stade.

### Résultats

L'utilisation de Graphab a permis d'évaluer l'impact du projet d'aménagement sur la connectivité écologique du secteur étudié et de caractériser les réservoirs de biodiversité et les corridors principaux pour chaque espèce virtuelle.

La carte ci-après illustre un exemple de rendu pour les Reptiles semi-aquatiques associés au Lézard vivipare (*Zootoca vivipara*) et à la Couleuvre helvétique (*Natrix helvetica*).

Les résultats obtenus par Graphab ont également servi de base de réflexion pour identifier les secteurs nécessitant des aménagements spécifiques au passage de la faune pour chaque espèce virtuelle.

La figure ci-après montre une analyse des chemins prioritaires à rétablir pour maintenir la connectivité du réseau pour les Mammifères forestiers à dispersion élevée (Putois d'Europe, *Mustela putorius*). Les courbes correspondent à la notation de la connectivité écologique du réseau avant le projet (état initial, en rouge) et après le

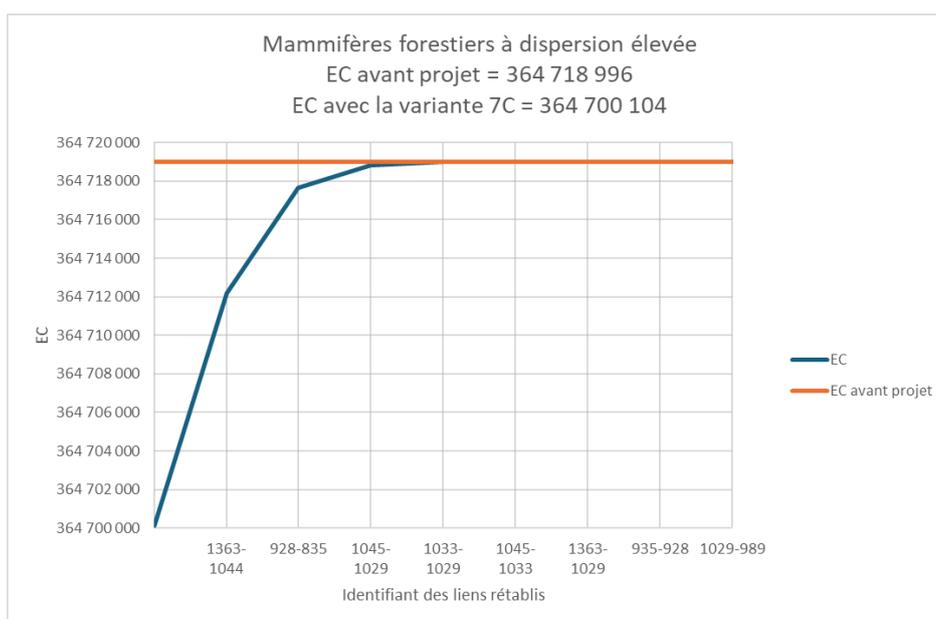


Figure 2 : Rétablissements prioritaires des continuités écologiques des Mammifères forestiers à dispersion élevée (Biotope, 2022)

## Paramètres utilisés dans Graphab

Espèce virtuelle	Amphibiens forestiers	Amphibiens de milieux ouverts	Reptiles de milieux ouverts	Reptiles de milieux (semi-) aquatiques	Mammifères semi-aquatiques	Mammifères forestiers à dispersion élevée	Milieux ouverts mixtes à faible dispersion	Oiseaux forestiers à faible dispersion	Oiseaux forestiers à dispersion élevée	Oiseaux de milieux arborés	Oiseaux de milieux aquatiques
Connexité	4										
Taille min habitat (ha)	0.004	0.02	1	0.2	0.05	0.1	2	2	30	1	100 (linéaire de 5km*200m, traduit en 5000*200 m <sup>2</sup> )
Type de mouvement	Dispersion										
Distance en m	370	2470	300	1550	100	4906	2387	2182	3739	2398	3246
Probabilité de mouvement	0.05				0.5						
Topologie	Complet										
Impédance	Coût										
Valeur des coûts	1/10/100/1000/10000										
Grappe élaguée	Oui										

Tableau 1 : Paramètres utilisés dans Graphab

projet (variante 7C, en bleu). En abscisse figurent les identifiants des corridors interrompus par la variante retenue et en ordonnée, la valeur de la connectivité gagnée pour chaque rétablissement. Cette analyse est réalisée via la ligne de commande `-gttest`.

Cette étude souligne l'importance de choisir des métriques pertinentes et efficaces, tout en tenant compte des temps de traitement. Il serait intéressant de voir quelles métriques influencent la hiérarchisation finale des éléments et lesquelles n'ont pas eu de plus-value dans cette

hiérarchisation. Ensuite, plusieurs techniques ont été utilisées pour optimiser ces traitements : augmentation de la mémoire allouée à Graphab, augmentation du nombre de cœurs, réduction de la résolution du raster et recours à des machines plus puissantes à distance.

Nous remercions l'équipe Graphab pour le développement de l'outil, leur disponibilité pour les échanges et les nombreuses publications qui ont facilité la prise en main du logiciel.

## 10

## Effets de la connectivité sur la biodiversité des sites de captage d'eau potable

Chloé Thierry <sup>a</sup> Benoit Pisanu <sup>b</sup>  
Olivier Delzons <sup>a</sup> Nathalie Machon <sup>c</sup>

<sup>a</sup> PatriNat (OFB,MNHN), 4 avenue du Petit Château 91800 Brunoy

<sup>b</sup> PatriNat (OFB,MNHN), 36 rue Geoffroy Saint-Hilaire 75005 Paris

<sup>c</sup> UMR7204 CESCO (SU,MNHN,CNRS), 61 rue Buffon 75005 Paris

### Problématique

À l'échelle du paysage, l'intensification de l'agriculture, la fragmentation et la destruction des habitats naturels sont des causes majeures de perte de biodiversité qui peuvent être atténuées à de petites échelles spatiales. Cependant, les relations complexes entre les activités humaines, les paysages et la biodiversité sont mal connues. Pourtant, ces connaissances pourraient aider les acteurs privés qui gèrent des zones semi-naturelles à jouer un rôle positif dans la conservation de la biodiversité. Si les sites industriels contribuent souvent à la fragmentation et à la destruction des habitats, ils peuvent dans certains cas jouer un rôle d'habitat, de refuge ou de corridor pour la biodiversité, en particulier lorsqu'ils font l'objet d'une gestion écologique. Nous nous sommes intéressés ici à des sites de captage d'eau potable, en étudiant comment ils peuvent jouer un rôle dans le maintien des communautés de plantes, de rhopalocères et d'orthoptères dans un paysage agricole fragmenté. Nous avons intégré dans nos modèles des valeurs de connectivité issues de modélisations utilisant la théorie des graphes et les chemins de moindre coût, effectuées pour les trois groupes taxonomiques. L'objectif était plus particulièrement de comprendre le rôle que jouent les sites de captage dans la connectivité du paysage et l'influence de celle-ci sur la distribution des espèces, par rapport aux pratiques agricoles des cultures adjacentes et à différentes variables locales.

### Zone d'étude

Notre étude s'est concentrée sur une zone de 13 x 18 kilomètres dans le département des Yvelines, entre les villes de Mantes-la-Jolie et Les Mureaux. Cette zone est marquée par un développement urbain croissant le long de la Seine et est dominée par des terres agricoles avec quelques habitats semi-naturels. Trente-cinq sites de captage d'eau potable y ont été étudiés, dont la taille varie de 0,1 à 1 hectare et qui sont régulièrement répartis dans une matrice essentiellement agricole (principalement des

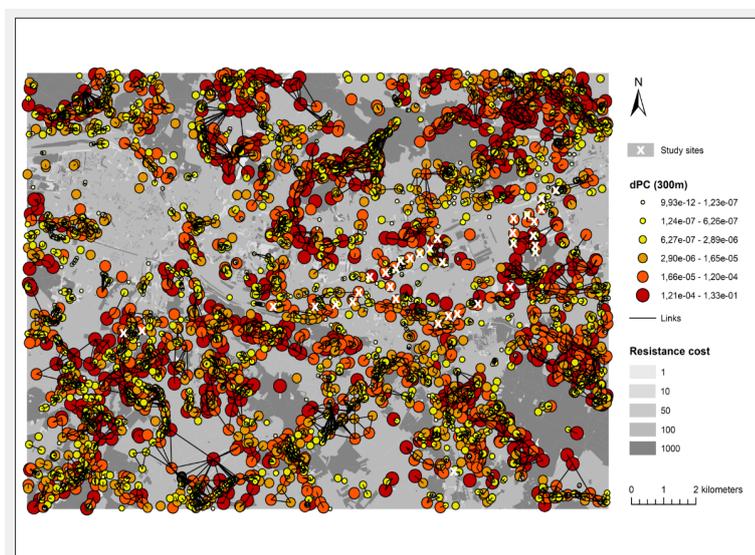


Figure 1 : Exemple de modélisation de la connectivité pour les rhopalocères (dispersion de 300 mètres)

grandes cultures et des cultures maraîchères). Tous créés entre 1960 et 1970, ces petits sites industriels comprennent un captage d'eau souterraine, recouvert d'un socle en béton et/ou d'un bâtiment, et un périmètre de protection immédiate clôturé où l'utilisation de pesticides est interdite. Ils sont principalement constitués de milieux ouverts, pelouses sèches ou prairies mésophiles à mésohygrophiles, gérés par une fauche tardive chaque année.

### Données utilisées

La carte d'occupation du sol servant de base à la modélisation était issue de la compilation, la hiérarchisation et le traitement de plusieurs bases de données SIG disponibles sur la zone d'étude (Thierry et al., 2020 ; Figure 1). Une couche raster avec une résolution de 2 mètres a été obtenue afin de mettre en évidence

les éléments linéaires ou les petites constructions pouvant impacter le déplacement des espèces cibles. Pour les données de gestion des parcelles agricoles autour des sites, nous avons utilisé les indices de fréquence de traitement (IFT) en herbicides (données de la Chambre interdépartementale d'agriculture d'Ile-de-France, 2015). Les données sur les taxons étudiés et les conditions locales (sol, disponibilité florale, hauteur de la végétation) provenaient des inventaires effectués sur les sites en 2018 et 2019, auxquelles s'ajoutent des données sur leurs traits de vie issues de plusieurs bases de données nationales et internationales (Thierry et al., 2022).

## Méthode

**Biodiversité :** Afin d'inventorier la biodiversité des sites de captage, nous avons utilisé le protocole Vigie-Flore ([www.vigie-flore.fr](http://www.vigie-flore.fr)) pour les espèces végétales, le protocole STERF (Suivi Temporel des Rhopalocères en France : <https://www.vigienature.fr/fr/suivi-temporel-des-rhopaloceres-de-france-sterf>) pour les rhopalocères et le protocole décrit dans Lacoëuilhe et al. (2020) pour les orthoptères. Nous avons intégré une approche fonctionnelle en calculant pour chaque site les valeurs moyennes des traits des espèces (dispersion, spécialisation et dépendance des plantes à la pollinisation) pondérées par leur abondance dans la communauté.

**Connectivité :** Afin d'obtenir une valeur de connectivité pour chaque site d'étude, nous avons attribué à chacun d'eux la

valeur dPC de la tache d'habitat dans laquelle ils se trouvent, correspondant à sa contribution à la connectivité globale du paysage selon l'indice PC (Saura et Pascual-Hortal, 2007).

**Utilisation d'herbicides :** Nous avons calculé un IFT moyen basé sur la quantité de surfaces traitées dans des zones tampons de 100 m et 300 m autour des sites d'étude.

**Analyses statistiques :** Pour chaque taxon, nous avons utilisé des modèles linéaires avec une erreur Gaussienne, en utilisant la structure suivante : Variable réponse (richesse spécifique, abondance et équitabilité de Piélou) ~ variable explicative du paysage 1 (herbicides) + variable explicative du paysage 2 (connectivité) + variable explicative locale 3 (type de sol pour la flore, disponibilité florale pour les rhopalocères et recouvrement des plantes herbacées <20 cm pour les orthoptères) (Thierry et al., 2022).

## Paramètres utilisés dans Graphab

Les coûts attribués à chaque classe d'occupation du sol pour les rhopalocères et les orthoptères des milieux herbacés sont les suivants : 1 pour leurs parcelles d'habitat, 10 pour les éléments favorables, 100 pour les éléments défavorables et 1000 pour les éléments considérés comme des "barrières". Les petites mosaïques d'habitats ont un coût intermédiaire entre ceux des habitats les composant (par exemple 50 pour une mosaïque constituée d'habitats

	Données	Sources
Routes et voies ferrées	<b>BD Topo Réseau routier</b> - Classe_route (Autoroute, Brette, Route à 2 chaussées, Route à 1 chaussée) (Retirer tunnels et ponts, sauf au dessus des cours d'eau, buffers)	IGN, 2017
	<b>BD Topo Voies ferrées et autres</b> - Classe Tronçon_voie_ferrée (Voie de service et Voie non exploitée) (Retirer tunnels et ponts, sauf au dessus des cours d'eau, buffers)	IGN, 2017
Milieux aquatiques et humides	<b>BD Topo Hydrographie</b> - Classes Surface_eau, Tronçon_cours_eau (uniquement éléments non fictifs, permanents, position 0 par rapport au sol et hors Seine), Point_eau (Station de pompage) (buffers)	IGN, 2017
Petits éléments des milieux ruraux	<b>ECOLINE</b> (surfaciques puis linéaires et ponctuels) (buffers)	Institut Paris Région, 2008
	<b>BD Topo Réseau routier</b> - Classe_route (Route empierrée, Chemin, Piste cyclable) (Retirer tunnels et ponts, sauf si au dessus des cours d'eau, buffers)	IGN, 2017
Milieux artificiels, agricoles et naturels	<b>BD Topo Bâti</b> - Bâti indifférencié, industriel et remarquable, Construction légère, Construction ponctuelle (éolienne), Réservoir (buffers)	IGN, 2017
	<b>BD Topo Voies ferrées et autres</b> - Classe Gare	IGN, 2017
	<b>RPG</b> sans surface non agricole, sans estives et landes, avec détails poste divers	ASP, 2017
	<b>MOS</b> sans les postes 1 à 5, 7, 8, 13, 15 à 17, 21 à 25, 28	Institut Paris Région, 2017
Occupation du sol en fond	<b>ECOMOS</b>	Institut Paris Région, 2008
Occupation du sol en fond	<b>OSO</b>	THEIA - CES OSO, 2018
Photographies aériennes	<b>BD Ortho</b> (2019)/ <b>SPOT</b> (2017) (pour vérifier informations)	IGN, 2019/ GEOSUD, 2017

Figure 2 : Données utilisées pour réaliser la cartographie d'occupation du sol

herbacés et d'éléments défavorables). La dispersion des espèces végétales dans les milieux herbacés est complexe et largement due au vent, nous avons donc attribué un coût de 1000 pour les forêts et les bâtiments de plus de 15 mètres de haut, un coût de 1 pour tous les milieux herbacés et un coût de 10 pour les autres catégories d'occupation du sol. Nous avons conçu des graphes planaires sans seuil puis utilisé l'indice de probabilité de connectivité (PC). Nous avons étudié des espèces peu ou modérément mobiles : distances de dispersion de 100 et 300 mètres pour les rhopalocères et les orthoptères, de 150 et 500 mètres pour la Flore.

## Résultats

Si les communautés floristiques observées dépendent beaucoup du type de sol et de l'utilisation d'herbicides dans les parcelles adjacentes, nos résultats montrent une flore plus abondante et à plus faible capacité de dispersion sur les sites de captage d'eau potable les mieux connectés. Quant aux rhopalocères et aux orthoptères, ils étaient essentiellement constitués d'espèces aux capacités de dispersion élevées et à faible spécialisation, capables d'atteindre les taches d'habitat du paysage étudié, soulignant ainsi sa fragmentation. La spécialisation des communautés d'orthoptères, dépendante de la hauteur de la végétation, a également tendance à être plus élevée sur les sites les plus connectés, suggérant une plus grande sensibilité des espèces spécialistes à l'isolement de leur habitat. Par ailleurs, l'équitabilité de Piélou augmente avec la connectivité pour ce groupe taxonomique, les espèces très mobiles maintenant sans doute de nombreuses métapopulations locales avec des taux de renouvellement élevés, ce qui réduit la probabilité que quelques espèces deviennent numériquement dominantes. Enfin, plus abondants sur les sites les plus connectés, les rhopalocères pourraient aussi être limités par la faible connectivité des milieux ouverts. Un effet négatif des herbicides a également été observé sur leur abondance.

Au final, l'utilisation de Graphab avec une approche déductive nous a permis de mieux comprendre l'influence de la connectivité du paysage, associée à d'autres variables paysagères et locales, sur les taxons étudiés. Les sites de captage d'eau potable, lorsqu'ils sont gérés de manière écologique, sont des habitats semi-naturels précieux pour la biodiversité, qui pourraient jouer un rôle clé en fournissant des habitats et des refuges pour les espèces, et en améliorant la connectivité paysagère. L'implication des acteurs locaux, et notamment des agriculteurs, est cruciale pour conserver et restaurer cette biodiversité de façon efficace, étant donné l'influence du paysage sur les espèces présentes sur les sites.

### Paramètres utilisés dans Graphab

Connexité	8
Surface minimale des taches	0
Type de mouvement	Dispersion
Distance (en mètre)	100 et 300 (rhopalocères et orthoptères), 150 et 500 (flore)
Probabilité de mouvement	Maximale : 0,05
Topologie	Planaire
Impédance	Coût
Valeur des coûts	1, 10, 50, 100, 1000
Grappe élaguée	Non (calcul des métriques) ; Oui (visualisation cartographique)

Tableau 1 : Paramètres utilisés dans Graphab

## Références

- Lacoeuilhe, A., Roquinarc'h, O., Thierry, C., & Latour, M. (2020). Protocole de suivi des Orthoptères pour l'étude des milieux prairiaux. Application à deux cas d'étude. UMS PatriNat – OFB/CNRS/MNHN
- 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), 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.03.005>
- Thierry, C., Pisanu, B., & Machon, N. (2022). Both landscape and local factors influence plant and hexapod communities of industrial water-abstraction sites. *Ecology and Evolution*, 12, e8365. <https://doi.org/10.1002/ece3.8365>
- Thierry, C., Lesieur-Maquin, N., Fournier, C., Delzons, O., Gourdain, P., & Herard, K. (2020). Comment cartographier l'occupation du sol en vue de modéliser les réseaux écologiques? *Méthodologie générale et cas d'étude en Île-de-France*. Article hors-série, Vol. 8. <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2020.HS.05>

## 11

# Contribution des bassins d'orage routiers à la connectivité paysagère : étude de cas sur le Crapaud vert (*Bufo viridis*)

Antonin Conan <sup>a</sup> Jonathan Jumeau <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Université de Strasbourg, CNRS, IPHC, UMR7178, 67000 Strasbourg ; Collectivité européenne d'Alsace, CERISE, Place du Quartier Blanc, 67964 Strasbourg, Cedex 9.

<sup>b</sup> Collectivité européenne d'Alsace, CERISE, Place du Quartier Blanc, 67964 Strasbourg, Cedex 9.

## Problématique

L'urbanisation du paysage entraîne une perte et un morcellement des habitats naturels, réduisant ainsi la connectivité écopaysagère. Cela perturbe les déplacements des animaux et peut parfois provoquer l'isolement des populations, ce qui est particulièrement problématique pour les espèces effectuant des déplacements réguliers, comme les amphibiens. Ces derniers dépendent de deux types d'habitats distincts : un habitat aquatique, essentiel pour leur reproduction, et un habitat terrestre, utilisé le reste du temps. De fait, ils effectuent de nombreux déplacements dans le paysage pour boucler leur cycle de vie biphasique et sont particulièrement vulnérables aux impacts indirects de l'urbanisation, tels que les collisions avec des véhicules. De fait, dans ces paysages modifiés, les amphibiens peuvent utiliser des bassins d'orage comme sites de reproduction, en remplacement des mares semi-naturelles qui ont été détruites par l'urbanisation. L'impact de ces bassins sur la survie et la reproduction des amphibiens reste débattu, mais ils pourraient améliorer la connectivité paysagère pour certaines espèces pionnières affectionnant ces infrastructures, comme le Crapaud vert (*Bufo viridis*).

Cette étude comprend deux volets : le premier vise à valider les coefficients de friction utilisés dans Graphab pour le Crapaud vert, tandis que le second évalue la contribution des bassins d'orage à la connectivité paysagère de la métapopulation de Crapaud vert dans le Bas-Rhin.

## Zone d'étude

Le premier volet de l'étude a été mené à deux échelles : une échelle locale sur la communauté de commune de Molsheim (3 816 ha) et une échelle globale couvrant une grande partie du département du Bas-Rhin (88 272 ha). Le second volet quant à lui s'est concentré uniquement sur l'échelle globale. Le paysage étudié était similaire aux deux échelles d'analyse, et principalement constitué de terres agricoles, d'un réseau routier dense, zones urbaines et

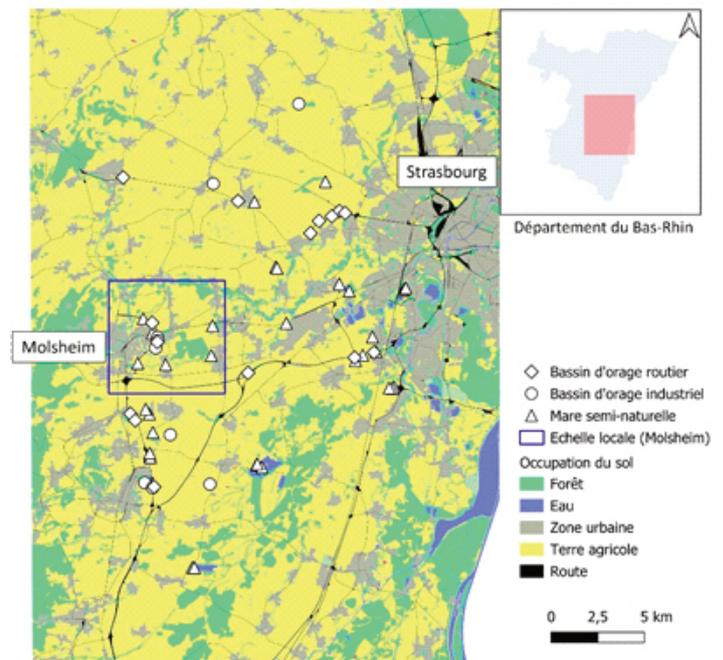


Figure 1 : Cartographie d'occupation du sol de la zone d'étude (échelle globale) avec la localisation des bassins d'orage (bassin d'orage routier + bassin d'orage industriel) et des mares semi-naturelles.

industrielles. Quelques parcelles forestières étaient présentes, mais elles restaient marginales (Figure 1).

## Données utilisées

Pour établir la cartographie de l'occupation du sol, nous avons utilisé la carte CIGAL (1:10 000 ; 2019). Cette carte a été complétée par l'ajout d'éléments linéaires tels que les cours d'eau et les infrastructures de transport, issus de la BD TOPO de l'IGN (2018). Nous avons également intégré la localisation des bassins d'orage routiers et industriels,

## Graphab : 12 nouvelles réalisations à découvrir

identifiés soit sur le terrain, soit à partir de données fournies par les aménageurs, soit par une analyse visuelle directe de vues satellites. Enfin, les mares à Crapaud vert ont été ajoutées grâce à des inventaires préliminaires réalisés sur le terrain. Une fois compilées, ces sources ont permis de transformer la couche d'occupation du sol en rasters adaptés aux différents volets de l'étude :

- Volet 1, échelle locale : pixels de 1 m de résolution
- Volet 1, échelle locale : pixels de 5 m de résolution
- Volet 1 et 2, échelle globale : pixels de 5 m résolution

### Méthode

Une étude bibliographique et des échanges avec des experts ont permis d'établir des coefficients de friction adaptés au Crapaud vert. Nous avons ensuite utilisé Graphab pour concevoir plusieurs modèles à différentes échelles, organisés en deux volets.

Dans le volet 1, trois modèles ont été réalisés : le premier, à l'échelle locale (Molsheim) avec une résolution fine (pixel de 1 m), intégrait des petits obstacles tels que les clôtures. Une fois les résultats obtenus, ils ont été comparés aux données de terrain (localisations en phase terrestre ; comparaison de mortalités routière avec points de conflits : intersection entre

### Paramètres utilisés dans Graphab

Espèce	Connexité	Taille min habitat en ha	Type de mouvement	Distance en m	Probabilité de mouvement	Topologie	Impédance	Valeur des coûts
Crapaud vert	8	0	Dispersion	5000	0.05	Planaire	Coût	1/10/100/1000/10000

Tableau 1 : Paramètres utilisés dans Graphab

les chemins de moindre coût et les routes). Le second modèle, à la même échelle, mais avec une résolution plus faible (pixel de 5 m), a été comparé au premier à l'aide de métriques spécifiques comme l'IF. Enfin, un modèle global (Bas-Rhin, pixel de 5 m) a été élaboré, puis comparé au modèle local via un zoom sur Molsheim. Ce volet a permis de valider les coefficients de friction utilisés dans Graphab pour cette espèce.

Dans le volet 2, ces mêmes coefficients de friction validés ont été utilisés pour modéliser la connectivité paysagère à l'échelle départementale (Bas-Rhin, pixel de 5 m), selon quatre scénarios : l'état initial de 2019, un scénario sans bassins d'orage, un autre sans mares, et un dernier intégrant de futurs bassins d'orage.

### Résultats

Le premier volet de l'étude a permis d'estimer et de valider les coefficients de friction à utiliser dans Graphab pour modéliser les déplacements du Crapaud

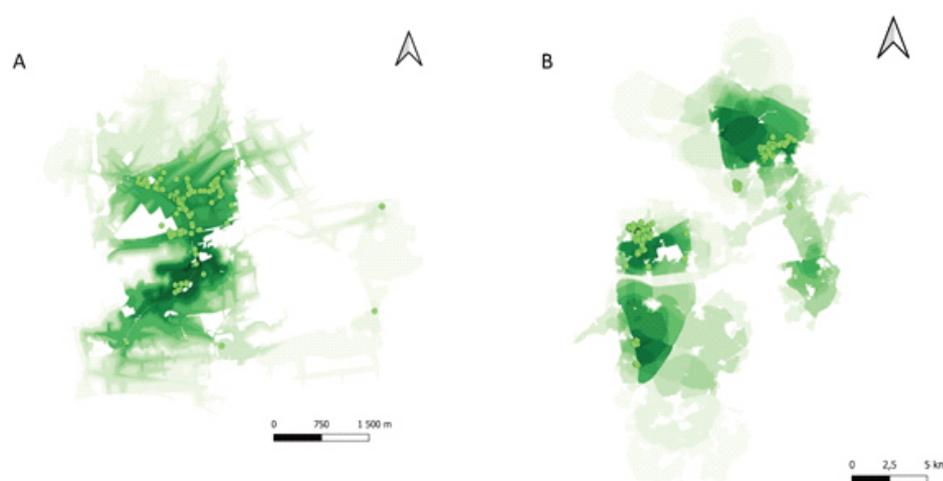


Figure 2 : Représentation des corridors (en vert) obtenus via Graphab : (A) à l'échelle locale (pixel de 1 m) et (B) à l'échelle globale (pixel de 5 m), avec la localisation des Crapauds verts observés en phase terrestre (ronds verts).

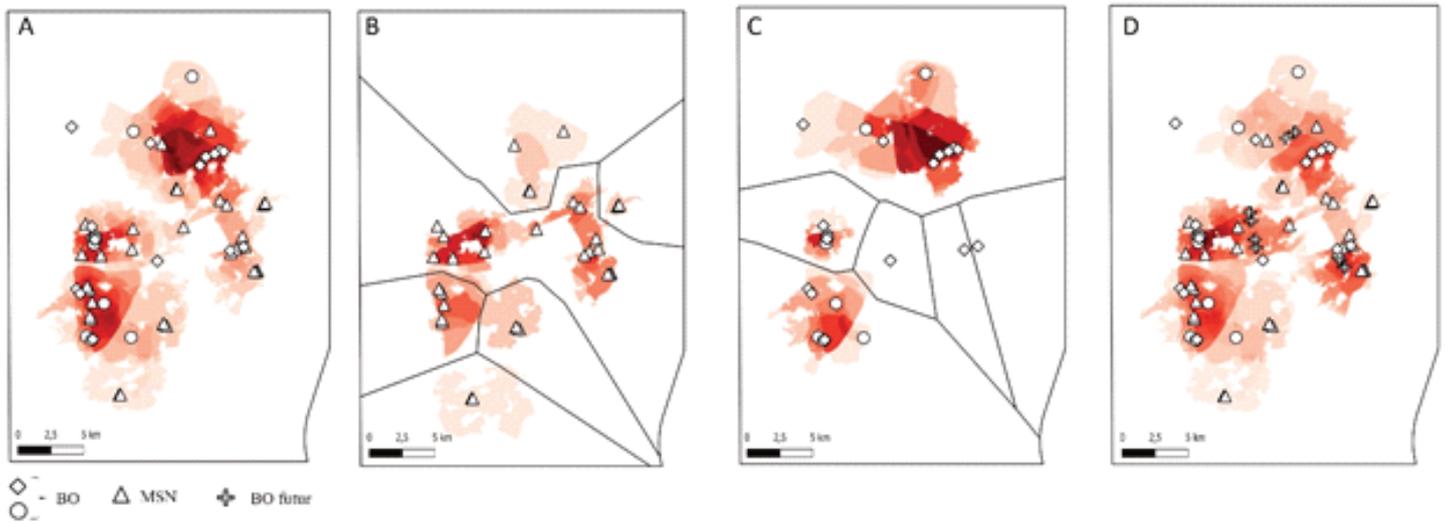


Figure 3 : Représentation des corridors (en rouge) et des composantes pour les différents scénarios modélisés via Graphab : (A) état initial, (B) sans les bassins d'orage, (C) sans les mares, et (D) avec l'ajout de futurs bassins d'orage.

vert à une échelle locale fine (pixels de 1 m). Ces coefficients ont été confirmés par des observations de terrain d'individus en déplacement ou écrasés sur la route (Figure 2A). Pour autoriser une modélisation à l'échelle du département (échelle globale) dans la suite de l'étude, nous avons d'abord testé l'approche en dégradant la résolution à 5m. Nous avons comparé les résultats avec ceux obtenus à la résolution initiale. Les métriques issues des deux modèles (IF et dPC) n'ont montré aucune différence significative, validant ainsi l'utilisation des mêmes coefficients de friction à une résolution dégradée.

Ensuite, une modélisation à l'échelle globale a été réalisée. Les localisations d'individus en phase terrestre correspondaient parfaitement aux corridors établis par le modèle (Figure 2B), confirmant la validité des coefficients utilisés.

Pour le second volet, différents scénarios ont été modélisés : état initial, sans bassins d'orage, sans mares, et avec ajout de bassins d'orage futurs. Les résultats montrent que, dans

l'état initial, la population forme une seule composante. Cependant, les parties nord et sud ne sont reliées que par une seule mare, créant une connexion fragile. Les résultats montrent également que la suppression des bassins d'orage ou des mares fragmente davantage le paysage en six composantes. En revanche, l'ajout de bassins d'orage futurs permet de restaurer un état similaire à l'état initial (une seule composante), tout en renforçant le maillage du réseau et en corrigeant la fragilité existante entre les parties nord et sud (Figure 3). La suppression des bassins d'orage entraînerait un isolement des populations similaire à celui provoqué par la disparition des mares, alors que l'ajout de bassins renforce la connectivité globale. En conclusion, les bassins d'orage jouent un rôle primordial dans la connectivité paysagère du Crapaud vert, améliorant la connectivité dans un environnement fortement dégradé.

## 12

## Enjeux de connectivité de la trame de prairies humides sur le territoire du Grand Pilat

Lisa Favre-Bac<sup>a</sup> Lina Abdelwahed<sup>b</sup> Irène Till-Bottraud<sup>c</sup> Juliette de Meaux<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Conservatoire Botanique National du Massif central, Antenne Rhône-Alpes, Maison du Parc, Moulin de Virieu, 2 rue Benaÿ, 42410 PELUSSIN. Courriel : lisa.favre-bac@cbnmc.fr

<sup>b</sup> GEOLAB, Laboratoire de Géographie Physique et Environnementale, UMR 6042 CNRS-UCA, Maison des Sciences de l'Homme, 4 rue Ledru, 63000 Clermont-Ferrand.

<sup>c</sup> Université de Cologne, Plant Molecular Ecology, Institute for Plant Sciences, Biozentrum, Zùlpicher str. 47B, D-50674 Cologne, Germany.

### Problématique

Les prairies humides subissent une forte régression depuis un siècle (Dixon et al. 2014) due à la dégradation de la qualité de l'habitat par les changements de pratiques agricoles (drainage, fertilisation, retournement, déprise agricole), mais aussi à la destruction des prairies liée à l'urbanisation. Or, ces prairies hébergent une faune et une flore diversifiées, incluant de nombreuses espèces spécialistes menacées et/ou protégées (Habel et al. 2013). Elles rendent également de nombreux services écosystémiques : qualité de la ressource en eau (Benoît & Simon 2004), régulation du débit des crues (Milazzo et al. 2023), stockage du carbone (Bengtsson et al. 2019), ressource alimentaire précieuse pour le bétail en période de sécheresse, etc..

Préserver ces services nécessite un bon état de conservation de ces milieux, et pour cela, il est nécessaire de permettre aux espèces végétales de prairies humides, en particulier les espèces spécialistes, de se maintenir dans ces habitats. Or, préserver l'habitat favorable d'une espèce ou d'une communauté ne suffit pas pour lui permettre de persister à long terme au sein d'un paysage : il est également nécessaire de préserver les possibilités de dispersion de ces espèces, à travers la conservation et/ou la restauration d'une trame fonctionnelle (Taylor et al. 1993, Fahrig & Merriam 1994).

Cette étude, financée par la région Auvergne-Rhône-Alpes et l'Agence de l'eau RMC, a pour objectif de spatialiser les enjeux de connectivités de la trame de prairies humides sur le territoire du Grand Pilat.

### Zone d'étude

Le Pilat est un massif de moyenne montagne, situé dans la région Auvergne Rhône-Alpes, au carrefour des

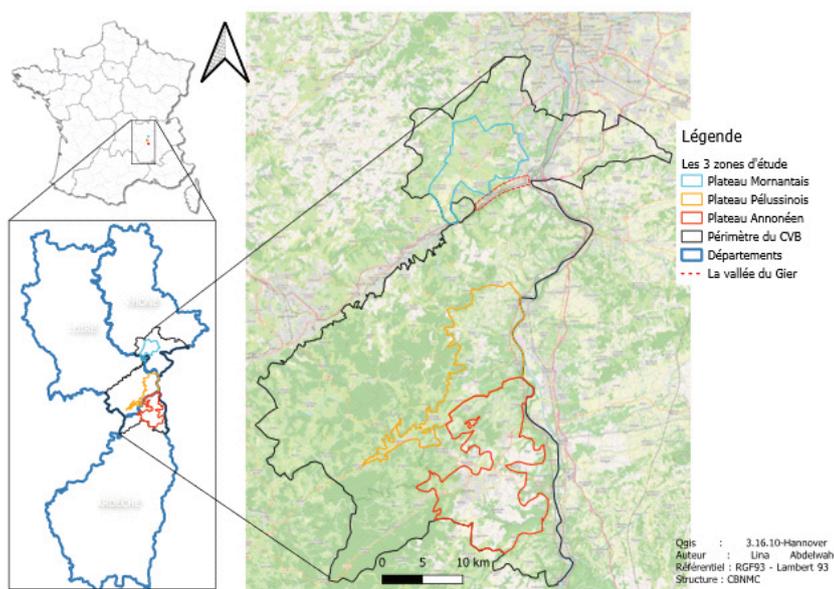


Figure 1 : Carte des 3 secteurs d'étude (source Abdelwahed, 2022).

départements de l'Ardèche (07), de la Loire (42), de la Haute-Loire (43) et du Rhône (69), sur le territoire duquel un Parc Naturel Régional (PNR) a été créé en 1974. Il est identifié au niveau du SRADDET de la région AURA (2019) comme un réservoir de biodiversité à l'échelle régionale.

Trois secteurs d'études ont été ciblées : le plateau Mornantais (69), le plateau Pélussinois (42), et le plateau Annonéen (07) (Figure 1).

Au sein de ces secteurs, les communes, sur lesquelles des espèces végétales de prairies humides ont été identifiées dans la base de données LOBELIA<sup>©</sup> du Conservatoire Botanique National du Massif Central (CBNMC), ont été retenues. Un seuil d'altitude fixé à 700 mètres a ensuite été appliqué aux périmètres obtenus pour délimiter les contours définitifs des trois zones d'étude.

## Données utilisées

Afin de modéliser la répartition des prairies humides sur le territoire, les données d'occurrence de neuf espèces végétales (*Achillea ptarmica*, *Anacamptis laxiflora*, *Bromus racemosus*, *Genista tinctoria*, *Lychnis flos-cuculi*, *Oenanthe peucedanifolia*, *Ranunculus flammula*, *Scorzonera humilis* et *Succisa pratensis*) ont été extraites de la base de données LOBELIA© du CBNMC et filtrées pour éliminer les doublons.

Quinze variables environnementales spatialisées ont également été utilisées : une variable topologique (la pente, dérivée du MNT de la BD Alti® de l'IGN), trois variables pédologiques (pH, teneur en argile, granulométrie) issues de Soilgrids (Poggio et al. 2021), une couche géologique simplifiée issue de la BD CHARM-50 du BRGM, trois variables d'occupation du sol (la couche OSO du CESBIO (Thierion et al. 2020), le Registre Parcellaire Graphique - RPG- 2018 et la distance aux cours d'eau, dérivée de la BD TOPO® de l'IGN) et 7 variables climatiques issues de CHELSEA Climate V1.2 (Karger et al. 2017).

## Méthode

Le logiciel Maxent (Philips et al. 2017) a été utilisé pour modéliser l'habitat favorable des neuf espèces de prairies humides citées précédemment, à partir des données d'occurrence et des variables environnementales spatialisées. Cette modélisation a été réalisée à l'échelle de 7 départements de la région avec une maille de 50 m<sup>2</sup>.

Suite à des analyses préliminaires, une carte des probabilités de présence moyenne de 5 espèces spécialistes des prairies humides étudiées (*A. ptarmica*, *A. laxiflora*, *L. flos-cuculi*, *O. peucedanifolia*, *S. humilis*) a été utilisée pour obtenir la répartition des patches d'habitat favorables potentiels sur le territoire d'étude du Grand Pilat. Suivant la méthode proposée par Keeley et al. (2016) et Duflot et al. (2018), une carte de résistance du paysage aux déplacements des espèces-cible a été dérivée de cette même carte de probabilités de présence (Figure 2).

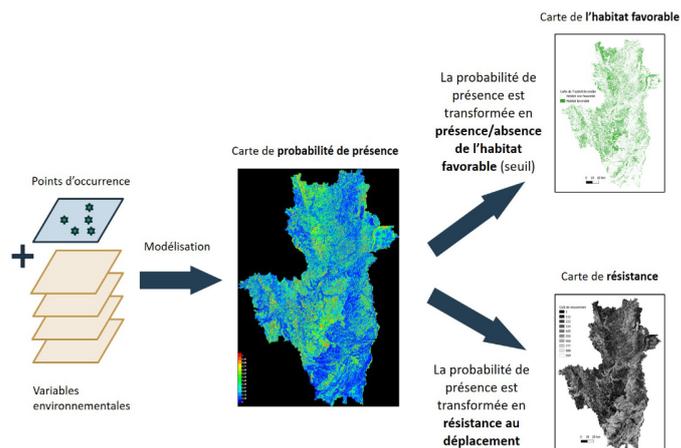


Figure 2 : Principe de modélisation de l'habitat favorable et de la résistance du paysage au déplacement à l'aide de Maxent.

Afin d'étudier le lien entre connectivité du paysage et structuration des communautés végétales d'une part, structuration génétique des populations d'autre part, des relevés floristiques ont été réalisés dans 79 parcelles de prairies humides en 2021 et 2022, et les populations de 3 espèces (*L. flos-cuculi*, 346 individus ; *O. peucedanifolia*, 450 individus ; *S. humilis*, 421 individus) ont été échantillonnées avant d'être géotypées en utilisant la méthode du RAD-sequencing.

## Paramètres utilisés dans Graphab

La carte d'habitat favorable a été filtrée avec les prairies permanentes du RPG 2018. Seules les taches d'habitat ≥ 0,75 ha ont été conservés. Douze graphes paysagers ont été construits à l'aide de Graphab (Foltête et al. 2012), en utilisant deux types de distances (euclidiennes et de coût accumulé) et six distances de dispersion maximales : 500, 1000, 2000, 3000, 5000 et 10000 mètres, afin de voir lesquelles reflétaient le mieux la dispersion des espèces de prairies humides étudiées.

Pour chaque graphe, la connectivité écologique a été mesurée à l'échelle des taches à l'aide des indices BC (Betweenness Centrality) et F (Flux). Les valeurs obtenues

### Paramètres utilisés dans Graphab

Espèce	Connexité	Taille min habitat en ha	Type de mouvement	Distance en m	Probabilité de mouvement	Topologie	Impédance	Valeur des coûts
Crapaud vert	8	0	Dispersion	5000	0.05	Planaire	Coût	1/10/100/1000/10000

Tableau 1 : Paramètres utilisés dans Graphab

étant fortement corrélées, l'indice F a été conservé pour la suite des analyses.

Afin de localiser les enjeux de connectivité sur le territoire d'étude, la métrique delta-IIC a enfin été calculée pour les six distances de dispersion maximale, en utilisant les distances euclidiennes.

## Résultats

### *Analyses génétiques et dispersion des espèces de prairies humides*

*O. peucedanifolia*, espèce zoochore, présente un patron d'isolement par la distance euclidienne. Sa distance de dispersion maximale est estimée à 10000 m. Pour *L. flos-cuculi*, espèce barochore, censée disperser à courte distance, la distance de dispersion maximale estimée par les données génétiques (6000 m) suggère l'existence d'autres modes de dispersion. Enfin, pour *S. humilis*, espèce anémochore, la dispersion ne paraît pas limitée par le paysage à l'échelle étudiée.

Ces résultats soulignent l'intérêt de prendre en compte plusieurs distances de dispersion maximales pour

modéliser la connectivité, en incluant des distances relativement importantes (jusqu'à 10000 m).

### *Réponse des communautés végétales à la connectivité du paysage*

La diversité spécifique des espèces généralistes et spécialistes de prairies humides augmente avec l'indice de connectivité F, aux faibles distances de dispersion pour les spécialistes (500 à 3000 m pour les distances euclidiennes) et aux distances plus importantes pour les généralistes (5000 et 10000 m). La richesse en espèces zoochores augmente significativement avec la connectivité pour les distances euclidiennes moyennes (2000 et 3000 m).

La connectivité impacte la structuration des communautés, pour les espèces spécialistes comme généralistes, à toutes les distances étudiées.

### *Secteurs à fort enjeu de connectivité*

A partir des calculs de delta IIC, quatre secteurs apparaissent particulièrement importants pour la connectivité globale de la trame pour une large gamme de distances (1000 à 10000 m), dont trois sur le plateau annonéen (Figure 3).

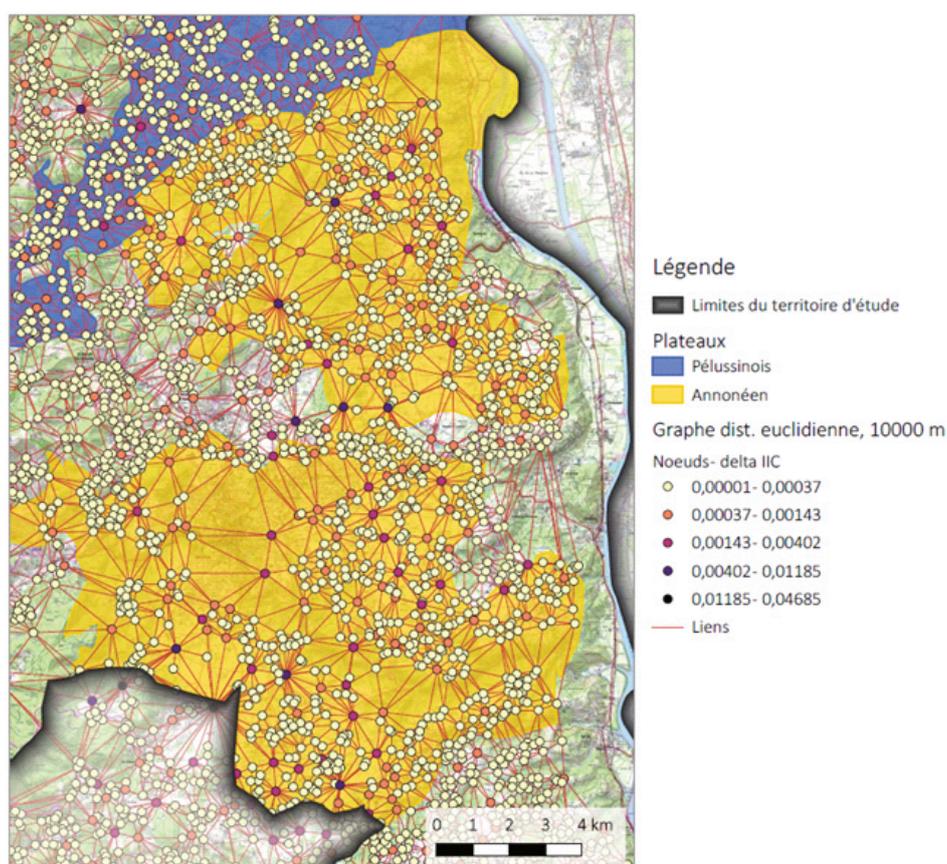


Figure 3 : Exemple de valeurs de delta IIC (distance euclidienne, 10000m) pour le plateau annonéen (en jaune). Fond cartographique : Scan 25®, Institut Géographique National (IGN).

Pour la distance la plus faible (500m), les vallées du Gier et de la Canse apparaissent comme des barrières à la dispersion, faisant ressortir l'importance de parcelles situées de part et d'autre de ces vallées pour conserver la connectivité de la trame.

Une carte des enjeux de connectivité issue de ces résultats a été transmise aux acteurs du territoire.

### Bibliographie

Abdelwahed, L. (2022) Évaluation de la connectivité des prairies humides dans le cadre du Contrat Vert et Bleu du « Grand Pilat » via une étude génétique et écologique. 52 p.

Bengtsson, J., Bullock, J. M., Egoh, B., Everson, C., Everson, T., O'Connor, T., O'Farrell, P. J., Smith, H. G. & Lindborg, R. (2019) Grasslands – More important for ecosystem services than you might think. *Ecosphere*, 10(2).

Benoît, M. & Simon, J. C. (2004) Grassland and water resources : recent findings and challenges in Europe.

Duflot R., Avon C., Roche P. & Bergès L. (2018) Combining habitat suitability models and spatial graphs for more effective landscape conservation planning : An applied methodological framework and a species case study. *Journal for Nature Conservation*, 46, 38-47.

Fahrig, L. & Merriam, G. (1994) Conservation of fragmented populations. *Conservation Biology*, 8(1), 50-59.

Foltête, J.-C., Clauzel, C., & Vuidel, G. (2012). A software tool dedicated to the modelling of landscape networks. *Environmental Modelling & Software*, 38, 316-327.

Habel, J. C., Dengler, J., Janišová, M., Török, P., Wellstein, C. & Wiezik, M. (2013) European grassland ecosystems: threatened hotspots of biodiversity. *Biodiversity & Conservation*, 22(10), 2131-2138.

Karger, D. N., Conrad, O., Böhner J., Kawohl T., Kreft H., Soria-Auza R. W., Zimmermann, N. E., Linder, H. P. & Kessler, M. (2017) Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific data*, 4(1).

Keeley, A.T.H., Beier, P., & Gagnon, J.W. (2016) Estimating landscape resistance from habitat suitability : effects of data source and nonlinearities. *Landscape Ecology*, 31(9), 2151-2162.

Milazzo, P., Francksen, R. M., Zavattaro, L., Abdalla, M., Hejduk, S., Enri, S. R., Pittarello, M., Price, P. N., Schils, R. L. M., Smith, P. & Vanwallegem, T. (2023) The role of grassland for erosion and flood mitigation in Europe : A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 348.

Philips, S. J., Anderson, R. P., Dudík, M., Schapire, R. E. & Blair, M. E. (2017) Opening the black box : an open-source release of Maxent. *Ecography*, 40(7), 887-893.

Poggio, L., de Sousa, L. M., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B. M., Kempen, B., Ribeiro, E. & Rossiter, D. (2021) SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *Soil*, 7, 217-240.

Région Auvergne-Rhône-Alpes (2019) Ambition Territoires 2030 Auvergne-Rhône-Alpes – Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires – Annexe Biodiversité. 97 p.

Taylor, P. D., Fahrig, L., Henein, K. & Merriam, G. (1993) Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos*, 68(3), 571-573.

Thierion, V., Vincent, A. & Valero, S. (2021) Theia OSO Land Cover Map 2020. CESBIO. <https://www.theia-land.fr/product/carte-doccupation-des-sols-de-la-france-metropolitaine/>.

Collectif Graphab



**UNIVERSITÉ**  
**MARIE & LOUIS**  
**PASTEUR**

**ThéMA**  
UMR 6049 Théoriser & Modéliser pour Aménager

