



HAL
open science

Apports de la modélisation spatiale pour la gestion de la trame verte et bleue

Céline Clauzel, Charlotte Bonnevalle

► **To cite this version:**

Céline Clauzel, Charlotte Bonnevalle. Apports de la modélisation spatiale pour la gestion de la trame verte et bleue. *Cybergeo: Revue européenne de géographie / European journal of geography*, 2019, 900. halshs-02151995

HAL Id: halshs-02151995

<https://shs.hal.science/halshs-02151995v1>

Submitted on 10 Jun 2019

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

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



Apports de la modélisation spatiale pour la gestion de la trame verte et bleue

Spatial Modeling for the management of green and blue infrastructure

Céline Clauzel et Charlotte Bonnevalle



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/32333>

ISSN : 1278-3366

Éditeur

UMR 8504 Géographie-cités

Ce document vous est offert par Université Paris Diderot - Paris 7



Référence électronique

Céline Clauzel et Charlotte Bonnevalle, « Apports de la modélisation spatiale pour la gestion de la trame verte et bleue », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 900, mis en ligne le 05 juin 2019, consulté le 05 juin 2019. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/32333>

Ce document a été généré automatiquement le 5 juin 2019.



La revue *Cybergeo* est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 3.0 non transposé.

Apports de la modélisation spatiale pour la gestion de la trame verte et bleue

Spatial Modeling for the management of green and blue infrastructure

Céline Clauzel et Charlotte Bonnevalle

Les auteurs remercient ARP-Astrance, et en particulier Hervé Moal, pour leur contribution au financement et à la réalisation de cette étude.

Introduction

- 1 À l'heure de l'Anthropocène, les ressources naturelles sont soumises à une pression constante exercée par les activités humaines via l'étalement urbain, la densification des réseaux de transport ou l'intensification agricole. Ces processus contribuent à diminuer et fragmenter les habitats naturels (Forman, 1995), rendant plus difficiles les déplacements des espèces animales. Or, ces flux biologiques assurent la diversité génétique et permettent aux populations de conserver leur capacité de survie face aux nombreux stress environnementaux.
- 2 Face à l'inefficacité des zonages classiques de protection pour enrayer la perte de biodiversité, les politiques environnementales se sont dotées, dès les années 2000, d'un nouvel objectif : mettre en réseau les habitats naturels pour permettre aux espèces animales et végétales de se déplacer. Les réseaux panaméricains ou paneuropéens, Natura 2000 en Europe, les *Transfrontier Conservation Areas* en Afrique australe, le *Great Eastern Ranges corridor* en Australie ou encore la Trame verte et bleue en France sont autant de dispositifs visant à prendre en compte les flux biologiques entre les principales sources de biodiversité aux échelles transnationales, nationales et régionales. Ces dispositifs s'appuient sur le concept de « réseau écologique », c'est-à-dire l'ensemble spatial formé par les cœurs de biodiversité (également appelé tache d'habitat¹ en écologie) reliés par des zones de connexion biologique (Opdam *et al.*, 2006). Ce concept est intimement lié à la

notion de connectivité fonctionnelle, définie comme la réponse d'une espèce aux conditions offertes par les structures paysagères, en termes de déplacements individuels (Taylor *et al.*, 2006) et correspondant à un certain degré de connexion entre les éléments paysagers.

- 3 En France, le concept de réseau écologique a été mis en avant par la loi Grenelle 1, intégrant les trames vertes et bleues (TVB) dans les politiques d'aménagement du territoire (Cormier *et al.*, 2010). Si des critères et des enjeux communs ont été établis par les Orientations nationales TVB pour garantir une certaine cohérence nationale, la loi n'a pas fixé de cadre méthodologique obligatoire pour identifier et caractériser la TVB au sein des schémas régionaux de cohérence écologique (SRCE). Chaque région a ainsi été libre de constituer à sa façon son « comité régional TVB » et de mettre en œuvre sa propre méthodologie en fonction de la disponibilité des données, des outils et des compétences, de la place accordée à la concertation et des enjeux présents sur son territoire (Vanpeene *et al.*, 2017 ; Clergeau et Liénard, 2011). Le bilan des SRCE (Sordello *et al.*, 2017) révèle ainsi une grande diversité de méthodes et de critères utilisés pour définir et cartographier les réservoirs de biodiversité et les corridors, entre les régions, mais aussi au sein d'une même région entre les différentes sous-trames. Il en résulte une forte hétérogénéité de la TVB qui, indépendamment des enjeux locaux de biodiversité, est surtout liée à des choix méthodologiques différents (Amsallem *et al.*, 2018). Cette hétérogénéité rend difficile une comparaison de la TVB à l'échelle interrégionale et complexifie sa prise en compte dans l'aménagement du territoire, notamment pour les régions fusionnées. En outre, elle rend non pertinente une analyse des réseaux écologiques à l'échelle nationale.
- 4 Malgré la diversité des méthodes utilisées et l'objectif de la TVB de préserver la fonctionnalité des continuités écologiques (Décret relatif à la Trame verte et bleue du 27 décembre 2012), force est de constater que la connectivité fonctionnelle du paysage a été peu prise en compte dans l'identification des corridors ou la hiérarchisation des réservoirs. La majorité des régions s'est focalisée sur la connectivité structurelle, où les connexions entre les habitats s'inscrivent explicitement dans le paysage, sans tenir compte des capacités de déplacement des espèces considérées (Sordello *et al.*, 2017). Le recours généralisé à cette approche s'explique par sa facilité de mise en œuvre via les outils SIG, en dépit d'un intérêt écologique limité.
- 5 L'objectif de notre étude est de proposer une méthode reproductible, applicable aux différentes sous-trames, pour intégrer la connectivité fonctionnelle du paysage dans l'identification et la hiérarchisation de la TVB à différentes échelles spatiales. Nous posons l'hypothèse que cette méthode peut être complémentaire de la TVB telle qu'elle est définie actuellement dans les SRCE, en facilitant sa déclinaison aux échelles inférieure (locale) et supérieures (interrégionale, nationale), tout en apportant de nouvelles informations sur la connectivité qui peuvent aider à hiérarchiser les éléments de la TVB.
- 6 En raison de l'hétérogénéité des méthodes mobilisées dans les régions, nous avons fait le choix de modéliser la TVB indépendamment de l'existante en nous appuyant sur des données génériques d'occupation du sol et sur les exigences écologiques des espèces-cibles. La méthode proposée s'appuie sur la théorie des graphes pour modéliser les réseaux écologiques. Développée dans la sphère scientifique depuis les années 2000 (Urban et Keitt, 2001), elle offre un bon compromis entre sa capacité à représenter les aspects fonctionnels de la connectivité et son exigence modeste en données d'entrée et en paramétrage (Calabrese et Fagan, 2004). Cette relative simplicité a facilité sa transposition

dans la sphère opérationnelle où différentes structures (bureaux d'étude, institutions) l'ont récemment mobilisé sur des questions de continuités écologiques (Girardet et Clauzel, 2018).

- 7 Une fois la trame modélisée, le calcul de métriques de connectivité permet de hiérarchiser les réservoirs et les corridors en fonction de leur importance pour la connectivité globale. Les résultats cartographiques mettent en évidence une trame à l'échelle du territoire métropolitain qui peut être comparée à la TVB existante. Cette confrontation met en évidence des éléments communs entre les deux approches (« graphe » versus « TVB »), mais aussi des divergences, i.e. des éléments identifiés par la modélisation mais pas dans la TVB, ou inversement. L'étude des méthodes mises en œuvre et des critères utilisés dans les SRCE permet d'expliquer ces différences. Afin de tester la mise en place de la méthode et de faciliter l'étape de comparaison avec la TVB existante, nous nous sommes focalisés uniquement sur la trame forestière. Ce choix est lié, d'une part, à la présence d'une sous-trame forestière dans tous les SRCE et, d'autre part, à la relative homogénéité dans la définition de cette sous-trame entre les régions (Sordello *et al.*, 2017).

Méthode et données

- 8 La modélisation d'un réseau écologique par la théorie des graphes comporte plusieurs étapes, de la réalisation d'une carte d'occupation du sol au choix des métriques de connectivité, en passant par la définition des espèces étudiées².

Les modèles biologiques étudiés

- 9 Pour représenter la diversité des espèces forestières, une approche générique par profil d'espèces (tableau 1) a été choisie en fonction de la taille minimale des taches d'habitat et de la distance de dispersion (Minor et Lookingbill, 2010). Le premier profil correspond aux petits mammifères dont la taille minimale des taches est de 1 ha et dont la distance de dispersion est de 1 km. Le deuxième profil (mammifères moyens) correspond à 100 ha et 10 km, et le troisième (grands mammifères) à 1 000 ha et 100 km (tableau 2).

Tableau 1 : Profils des espèces forestières choisies (d'après Girardet *et al.*, 2016, adapté de Minor et Lookingbill, 2010)

Profil d'espèces	Dispersion maximale	Surface minimale des taches d'habitat	Exemple d'espèces représentatives
Petits mammifères	1 km	1 ha	Belette, écureuil roux, hermine
Moyens mammifères	10 km	100 ha	Putois d'Europe, rougequeue à fond blanc, gobemouche gris
Grands mammifères	100 km	1000 ha	Cerf, lynx

La carte d'occupation du sol

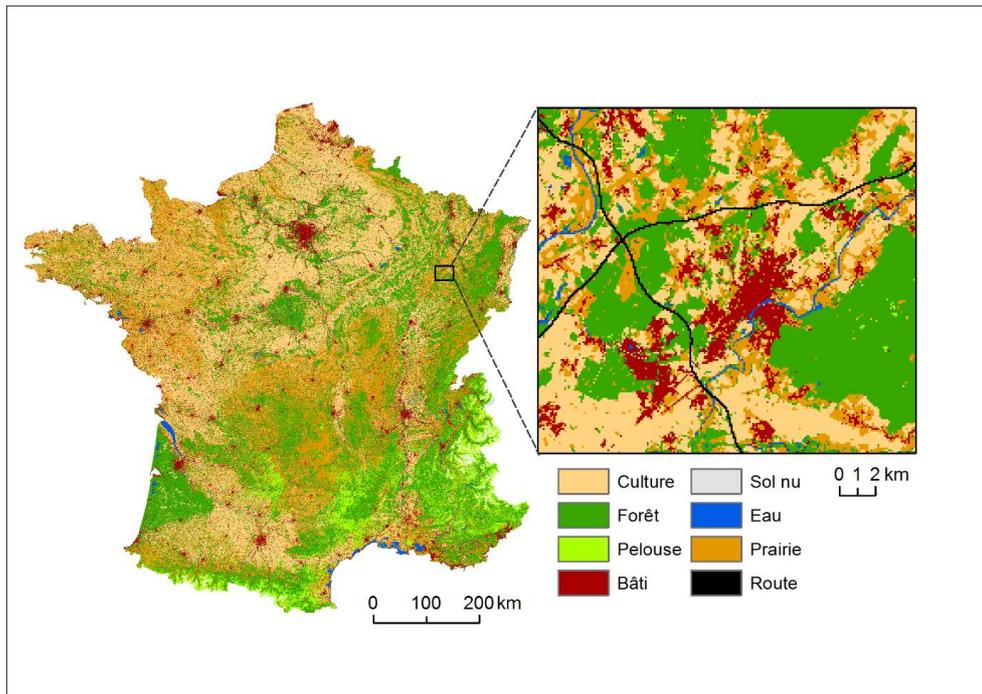
- 10 La modélisation de la trame forestière sur l'ensemble du territoire métropolitain français nécessite une carte d'occupation du sol d'une résolution suffisamment fine pour représenter des éléments paysagers importants pour le cycle de vie des espèces, et couvrant l'ensemble du territoire de manière homogène. Nous avons utilisé la carte d'occupation des sols OSO 2017 réalisée à partir de traitements automatiques d'images satellites optiques Sentinel-2. Cette carte a été adaptée et complétée pour les besoins de notre étude. Les 17 catégories initiales ont été regroupées en 9 classes (tableau 2), représentant différents degrés de perméabilité paysagère pour les espèces forestières (cf. section suivante). La résolution de la carte, initialement à 10 m, a été ramenée à 100 m pour réduire les temps de calcul. Enfin, le réseau routier principal (autoroutes et nationales issues de la base ROUTE500® de l'IGN) a été rastérisé et superposé à la carte OSO de manière à représenter correctement l'emprise des routes (figure 1).

Tableau 2 : Reclassification des catégories d'occupation du sol à partir de la carte OSO

Carte OSO 2017	Reclassification des catégories	Perméabilité paysagère
Culture été	Culture	Neutre
Culture hiver		
Vergers		
Vignes		
Forêt feuillus	Forêt	Habitat
Forêt conifères		
Pelouses	Pelouse	Neutre
Prairies	Prairie	Favorable
Landes ligneuses		
Urbain dense	Artificialisé	Défavorable
Urbain diffus		
Zones industrielles		
Surfaces routes		
Surfaces minérales	Sol nu	Défavorable
Plages et dunes		
Eau	Eau	Neutre

Glaciers ou neige	Glacier ou neige	Défavorable
-------------------	------------------	-------------

Figure 1 : Carte d'occupation du sol créée à partir de la carte OSO et de la base ROUTE500® de l'IGN



La construction des graphes

- 11 À partir de cette carte d'occupation du sol, trois graphes sont construits, représentant chacun le réseau écologique d'un des trois profils d'espèces forestières. Chaque graphe est constitué d'un ensemble de nœuds (ici les agrégats de cellules adjacentes codées en « forêt », d'une surface minimale de 1, 100 ou 1000 ha selon le profil) connectés par des liens représentant les chemins de déplacement potentiels. Les nœuds du graphe correspondent aux réservoirs de biodiversité du réseau écologique et les liens correspondent aux corridors.
- 12 Les liens sont définis en distance de moindre-coût pour tenir compte de la perméabilité du paysage. Une valeur de résistance est associée à chaque catégorie d'occupation du sol, représentant la difficulté de franchissement de ces éléments paysagers pour les trois profils d'espèces forestières. Le choix de ces valeurs est adapté d'une étude de Gurrutxaga *et al.* (2011) sur les mammifères forestiers. Une valeur de 1 a été attribuée à l'habitat (forêt), 10 pour les éléments favorables aux déplacements comme les prairies, 100 pour les éléments neutres et 1000 pour les éléments défavorables (surfaces artificialisées).
- 13 À partir des trois graphes construits, des métriques provenant de la théorie des graphes ou de l'écologie du paysage peuvent être calculées pour caractériser la connectivité à différentes échelles (nœuds, liens, composantes, graphe entier) (Galpern *et al.*, 2011). Nous avons choisi deux métriques, l'indice de centralité intermédiaire et le Delta-PC afin de hiérarchiser les nœuds (taches d'habitat) et les liens (corridors potentiels) en fonction de leur contribution à différents aspects de la connectivité :

- 14 L'Indice de centralité intermédiaire (*Betweenness Centrality*, BC) est une métrique locale qui évalue dans quelle mesure un nœud ou un lien a une position centrale dans le réseau. Il est calculé en faisant la somme des plus courts chemins passant par le nœud ou le lien focal i , chaque chemin étant pondéré par le produit des capacités des nœuds reliés et de leur probabilité d'interaction.

$$BC_i = \sum_j \sum_k a_j a_k \exp(-\alpha d_{jk}) \quad j, k \in \{1..n\}, k < j, i \in P_{jk}$$

où d_{jk} représente la distance entre les nœuds j et k , α l'intensité de l'effet de la distance sur les déplacements et P_{jk} l'ensemble des nœuds traversés par le plus court chemin entre j et k . Les nœuds et les liens avec les plus fortes valeurs de BC correspondent à des éléments qui sont traversés par les flux potentiels les plus importants. Identifier et préserver ces éléments permet de maintenir la fonctionnalité d'un réseau écologique, c'est-à-dire la capacité pour les espèces à se déplacer efficacement (i.e. en utilisant les chemins les moins coûteux reliant les taches d'habitat les plus importantes).

- 15 Le Delta-PC est une métrique globale, calculée au niveau du graphe entier, qui qualifie l'importance de chaque nœud ou lien pour la connectivité globale en utilisant la méthode de retrait itératif des nœuds et des liens. La métrique globale est calculée à l'état initial, un nœud ou un lien est retiré du graphe et la métrique est recalculée. La différence entre les deux valeurs est implémentée dans le nœud /lien retiré, traduisant la perte de connectivité engendrée si cet élément était retiré. Le Delta-PC est basé sur la métrique PC (Probabilité de Connectivité [Saura et Pascual-Hortal, 2007]) défini comme la probabilité que deux individus tirés au hasard dans la zone d'étude parviennent à entrer en contact. Il est calculé comme la somme des produits de la capacité de tous les couples de nœuds pondérées par leur probabilité d'interaction, divisée par le carré de la zone d'étude :

$$PC = 1/A^2 \sum_i \sum_j a_i a_j \exp(-\alpha d_{ij})$$

où A représente la surface de la zone d'étude. Les nœuds et les liens avec les plus fortes valeurs de Delta-PC correspondent aux éléments qui, s'ils disparaissaient, entraîneraient une forte diminution de la connectivité globale en déconnectant une partie du réseau. Identifier et préserver ces éléments permet ainsi de maintenir l'intégrité d'un réseau écologique en évitant sa fragmentation.

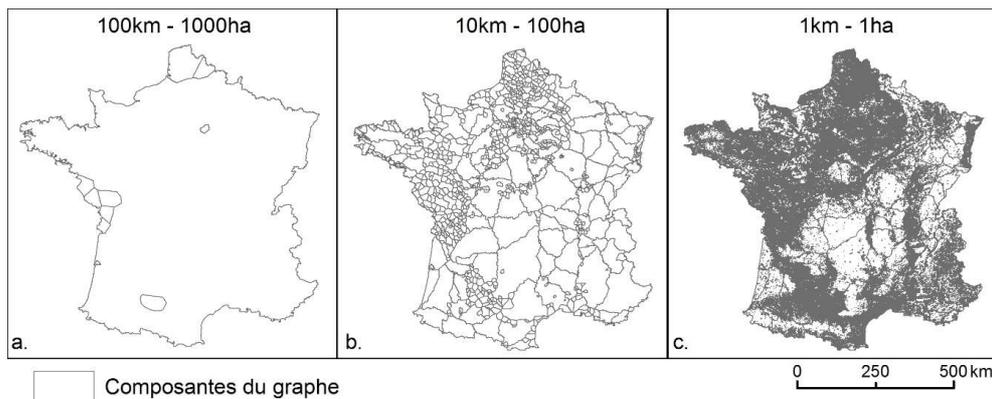
- 16 La probabilité d'interaction de ces deux métriques est paramétrée à une très grande distance représentant des événements de dispersion à l'échelle de plusieurs générations afin de mettre en évidence l'importance des éléments du réseau pour la viabilité à long terme des populations et être en cohérence avec l'échelle nationale (Saura *et al.*, 2011).
- 17 La modélisation de la trame forestière par la théorie des graphes et le calcul des métriques ont été réalisés avec le logiciel libre Graphab (Foltête *et al.*, 2012). Les couches des éléments des graphes sont visualisables en version topologique (nœuds et liens simplifiés) et en version réaliste (taches et chemins) sur une page html (<https://cclauzel.github.io/GraphabTVB>). Cette carte interactive réalisée grâce au plugin Qgis2web permet de zoomer jusqu'au 1:15000^e en ciblant sur des lieux géographiques. La carte ne contient que les éléments des graphes pour les grands (100 km-1000 ha) et moyens mammifères (10 km-100 ha), le graphe représentant le réseau forestier des petits mammifères étant trop lourd pour une visualisation optimale (>1 Go).

Résultats

La trame forestière modélisée pour les trois profils d'espèces

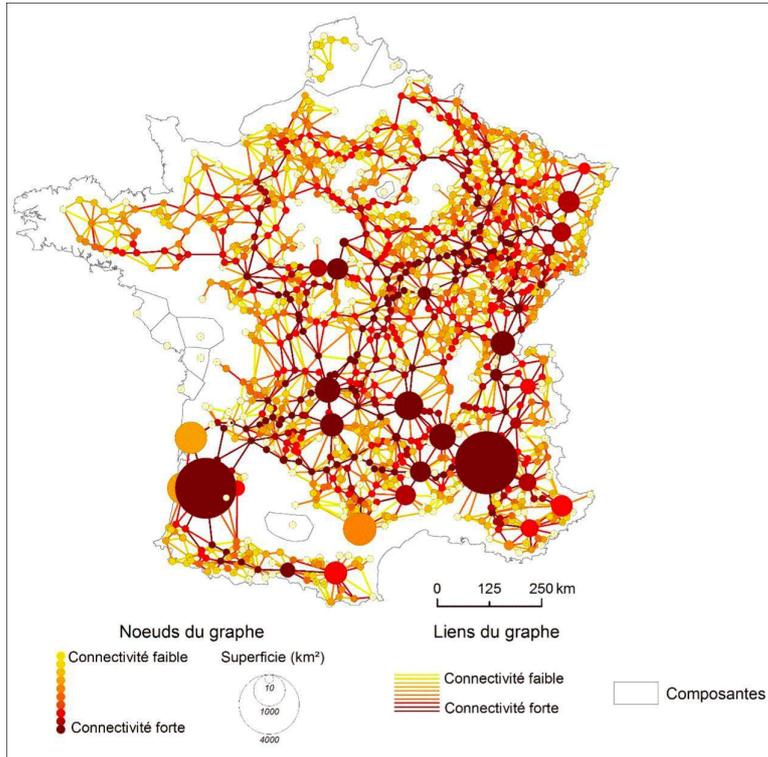
- 18 La modélisation de la trame forestière pour les grands mammifères montre que ces espèces peuvent potentiellement se déplacer dans presque toute la France métropolitaine sans rencontrer de barrières infranchissables (figure 2a). Seul un micro-réseau dans l'extrémité nord apparaît déconnecté en raison d'une faible densité de nœuds et de liens. D'autres composantes sont visibles sur le littoral vendéen ou dans le Sud-Ouest mais ne contiennent qu'une seule forêt de plus de 1000 ha. Malgré cette bonne connectivité globale, plusieurs zones de fragilité apparaissent (cf. carte interactive, couches 100 km_1000 ha). Le réseau forestier en Bretagne est ainsi connecté uniquement grâce à quelques forêts (forêt d'Ombrée, forêt du Pertre, forêt de Fougères) et à la présence de prairies facilitant les déplacements. L'est de la région parisienne (également visible sur la figure 5) apparaît également comme une zone de fragilité avec de faibles connexions via des camps militaires dans la Marne occupées par des formations forestières, permettant théoriquement le passage entre le Parc naturel régional (PNR) de la Montagne de Reims et la forêt d'Argonne dans un secteur pourtant fortement agricole. De la même façon, au nord de l'Île-de-France, la connexion entre la forêt de Compiègne et les massifs forestiers du PNR des Ardennes repose sur un seul corridor longeant la vallée de l'Oise et traversant quelques massifs (forêts domaniales de Saint-Gobain à l'ouest de Laon et d'Andigny au nord-est de Saint-Quentin), jouant le rôle de tache-relais (*stepping-stone*).

Figure 2 : Les composantes du graphe pour chacun des trois profils d'espèces.



- 19 La hiérarchisation des nœuds et des liens du graphe par l'indice de centralité intermédiaire (figure 3) fait ressortir les parcours les moins coûteux pour traverser le graphe à l'échelle de plusieurs générations d'individus. Les résultats montrent clairement un axe horizontal du Périgord aux Alpes, en passant par le Quercy et les Cévennes ; et un axe transversal sud-ouest/nord-est du Périgord aux Vosges traversant le plateau de Millevaches et le Morvan. Ces axes correspondent ainsi à des chemins de dispersion longue-distance pouvant potentiellement permettre aux espèces de s'adapter à différents stress environnementaux (changement climatique par exemple) en modifiant leur aire de répartition.

Figure 3 : Hiérarchisation des nœuds et des liens du graphe représentant le réseau forestier pour les grands mammifères. La connectivité est évaluée par l'indice de centralité intermédiaire (*Betweenness centrality*).



- 20 Pour les mammifères forestiers de moyenne capacité de dispersion (10 km), le réseau forestier apparaît beaucoup plus fragmenté (figure 2b), notamment par les routes principales, alors même que le nombre de taches d’habitat (100 ha et plus) est plus important (tableau 3). Les zones de fragilité précédemment identifiées (Nord, littoral vendéen, Bretagne) deviennent des zones de déconnexion totale avec une fragmentation du réseau en de multiples composantes (cf. carte interactive, couches 10 km_100 ha). Cette situation s’explique par des paysages majoritairement agricoles qui contraignent les déplacements de ces espèces moins mobiles.
- 21 Pour les petits mammifères à faible capacité de dispersion, le réseau est logiquement extrêmement fragmenté, bien que le nombre de taches de plus de d’1 ha dépasse le million et représente 30 % du territoire. Dans les secteurs fortement fragmentés, les composantes (figure 2c) sont constituées de nœuds isolés les uns des autres par la présence de cultures et/ou de routes. Les composantes avec une plus grande surface (> 100 km²) sont caractérisées par une forte densité de taches forestières et de connexions, qui permettent potentiellement aux espèces de se déplacer sans rencontrer d’obstacles majeurs. C’est notamment le cas du Massif central et de l’Est de la France (Alpes du Sud, Morvan, Vosges).

Tableau 3 : Comparaison des caractéristiques des graphes entre les trois profils d’espèces

Distance de dispersion	Nombre de nœuds	Surface d’habitat forestier en km ² et en % du territoire national	Nombre de liens	Nombre de composantes
------------------------	-----------------	---	-----------------	-----------------------

1 km	1 076 549	162 574 (30 %)	1 882 547	206 940
10 km	10 062	124 885 (23 %)	19 229	1 075
100 km	1 232	105 514 (19 %)	3 275	10

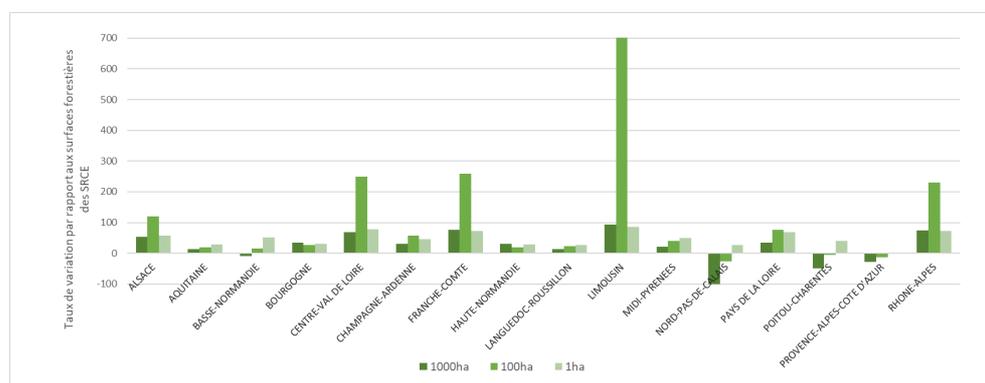
Comparaison avec la trame verte nationale

- 22 Cette modélisation de la trame forestière à l'échelle nationale à partir des données d'occupation du sol et des exigences écologiques des espèces fournit un premier diagnostic de la connectivité du réseau forestier. Le calcul de métriques locales de connectivité permet de hiérarchiser les taches d'habitat et les corridors en fonction de leur importance pour la connectivité nationale. Ces premiers résultats peuvent ainsi apporter un complément d'information à la trame verte (TV) en intégrant la dimension multiscalaire des processus écologiques.
- 23 Depuis 2017, les données des Schémas régionaux de cohérence écologique sont diffusées sur le site de l'INPN. Les couches SIG des réservoirs de biodiversité et des corridors ont été standardisées et sont disponibles en format vecteur. Elles permettent de localiser l'emprise des réservoirs et des corridors pour toutes les régions. Néanmoins, la précision des données attributaires varie fortement d'une région à l'autre. Ainsi, la classification des réservoirs et des corridors en type de sous-trame (forestière par exemple) n'est pas toujours disponible, l'information n'ayant pas été transmise dans les données SIG. C'est le cas notamment des régions³ Auvergne, Bretagne, Île-de-France, Picardie et Lorraine pour les réservoirs, ou Basse-Normandie, Pays de la Loire, Poitou-Charentes pour les corridors. Pour pallier cette absence d'information, la synthèse nationale de la trame verte (Billon *et al.*, 2017) produite à partir d'une généralisation cartographique des SRCE regroupe l'ensemble des sous-trames sans distinction, ce qui limite toute tentative de comparaison avec notre travail.
- 24 Afin de comparer l'approche « graphe » et l'approche « TVB », nous nous sommes donc focalisés uniquement sur les SRCE contenant une sous-trame forestière dans leurs données SIG vecteur (soit 16 régions sur 21, la Corse étant exclue de l'analyse). Pour chacun des trois profils d'espèces, une sélection des réservoirs des SRCE a été réalisée en fonction de leur superficie pour être cohérent avec la sélection réalisée dans les trois graphes. La comparaison des surfaces forestières occupées par les réservoirs (figure 4) montre une surestimation de l'approche « graphe » pour 13 régions, dont 5 dépassant les +100 %. Cette surestimation s'explique par la méthode d'identification des réservoirs de biodiversité de la TV. Les régions les ont définies en fonction des zonages existants de protection et d'inventaire (qui était un critère de cohérence nationale), les complétant parfois par les zones de présence de certaines espèces ou habitats patrimoniaux ou menacés (Sordello *et al.*, 2017). Les réservoirs identifiés selon cette méthode ne correspondent donc qu'à une partie des surfaces forestières présentes sur un territoire. Les forêts ne faisant pas l'objet de zonages sont le plus souvent exclues. En région Limousin, l'écart de +700 % s'explique par l'absence du Parc naturel régional de Millevaches comme réservoir de biodiversité dans la TVB, alors que la présence de milieux forestiers l'a classé comme la plus grande tache d'habitat forestier dans l'approche « graphe ». Ce territoire est en revanche présent dans le SRCE sous forme de

corridors et de zone de forte perméabilité. L'écart sur la région Centre s'explique de la même façon par le classement de la forêt de Chambord en corridor diffus et non en réservoir, comme c'est le cas dans notre approche. En Rhône-Alpes, les Monts du Vivarais ont été considérés comme des taches d'habitat forestier dans le graphe alors qu'ils ne sont présents dans aucune sous-trame de la TVB.

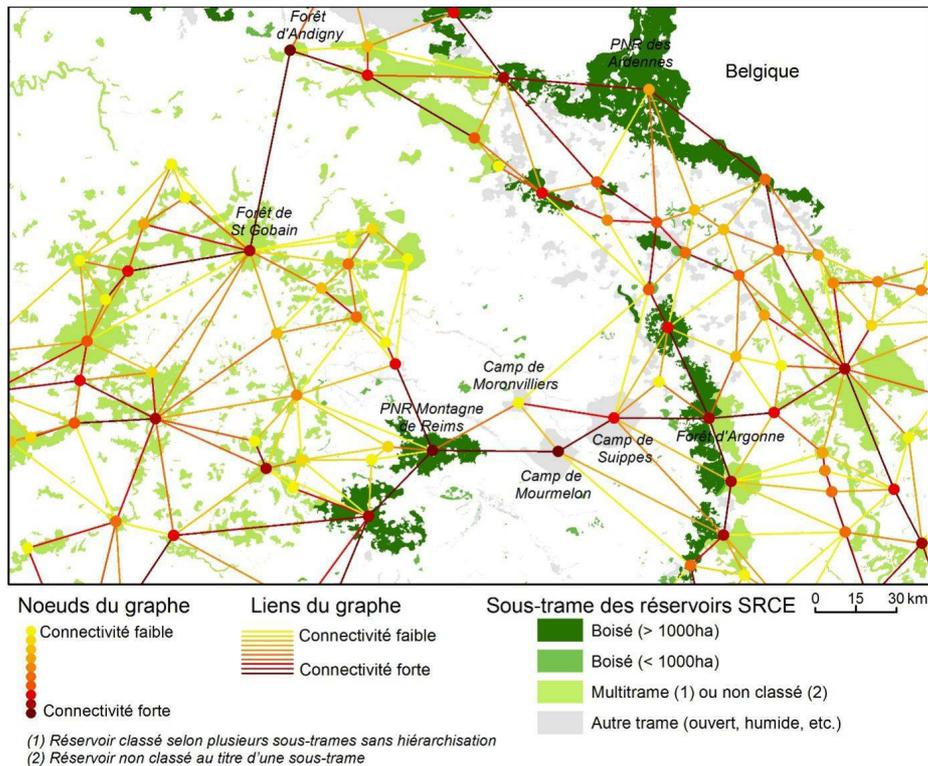
- 25 Pour la région Nord-Pas-de-Calais, où l'approche « graphe » sous-estime la surface des réservoirs de plus de 1000 ha, la différence vient d'une classification de la sous-trame en fonction du milieu dominant dans le SRCE. Les réservoirs sont d'abord identifiés par les zonages de protection et d'inventaire, puis classés par exemple en sous-trame forestière si la forêt est l'occupation majoritaire, sans qu'elle occupe forcément l'intégralité du périmètre. Par conséquent, la surface des réservoirs dits « forestiers » est surestimée dans le SRCE par rapport à une approche fondée strictement sur l'occupation du sol.

Figure 4 : Taux de variation des superficies forestières des taches d'habitat modélisées par la théorie des graphes par rapport aux réservoirs de biodiversité de la Trame verte, pour les trois profils d'espèces et les 16 régions étudiées.



- 26 Ces variations de superficie sont ainsi directement liées aux différentes méthodologies et critères mobilisés dans les deux approches pour identifier les réservoirs de biodiversité. Malgré ce résultat, relativement attendu au regard de la diversité des méthodes utilisées dans les SRCE, l'approche « graphe » garde un intérêt pour la hiérarchisation des réservoirs de biodiversité de la TV. En effet, si tous les nœuds du graphe ne correspondent pas forcément à des réservoirs (toutes trames confondues), ou même à des réservoirs de la sous-trame forestière, ces derniers correspondent en revanche quasiment toujours (entre 88 % et 92 % selon les profils) à des nœuds du graphe. Ainsi, il est possible de leur attribuer une valeur de connectivité issue des métriques calculées sur le graphe. La figure 5, centrée sur le nord-est de la région parisienne, montre par exemple que certains réservoirs forestiers de la TV comme le PNR de la Montagne de Reims, la forêt de Saint-Gobain ou la forêt d'Andigny, ont des valeurs de connectivité forte car elles jouent le rôle de connecteur, ou *stepping-stones* (révélé par la métrique Delta-PC). De la même manière, la figure 5 souligne l'importance des camps militaires de Mourmelon et Suippes pour la connexion entre le PNR de la Montagne de Reims et la forêt d'Argonne. Le classement de ces camps dans la sous-trame « milieux ouverts » dans le SRCE de Champagne-Ardenne laissent penser que ces réservoirs peuvent également être importants pour les espèces des milieux ouverts.

Figure 5 : Hiérarchisation des taches d'habitat et des corridors (profil grands mammifères) en fonction de leur importance pour la connectivité globale et comparaison avec les réservoirs de biodiversité des SRCE au nord-est de la région parisienne. La connectivité des nœuds et des liens est mesurée par la métrique Delta-PC.



27 Concernant les corridors, la comparaison des deux approches est extrêmement difficile en raison de la diversité des méthodes utilisées dans les SRCE pour les identifier (interprétation visuelle, dire d'experts, dilatation-érosion, perméabilité des milieux, moindre-coût). Il en résulte une diversité de formes dans les représentations cartographiques (Sordello *et al.*, 2017) : des corridors surfaciques dont certains ont des formes compactes se rapprochant plus de la définition de zones nodales, comme la forêt de Chambord⁴ (figure 6a) ; des corridors linéaires dont la largeur varie de 100 m à 3km selon les SRCE (figure 6b) ; des corridors discontinus en pas japonais ; ou encore des corridors schématisés par des flèches comme en Bretagne⁵ (figure 6c). La modélisation par les graphes génère, elle, des corridors uniformes, soit sous forme de chemins uniques (linéaire), soit de corridors (surfacique) de moindre-coût, plus ou moins large selon la perméabilité du paysage (figure 7).

Figure 6 : Différentes types de représentation cartographique des corridors de la TV dans les SRCE.

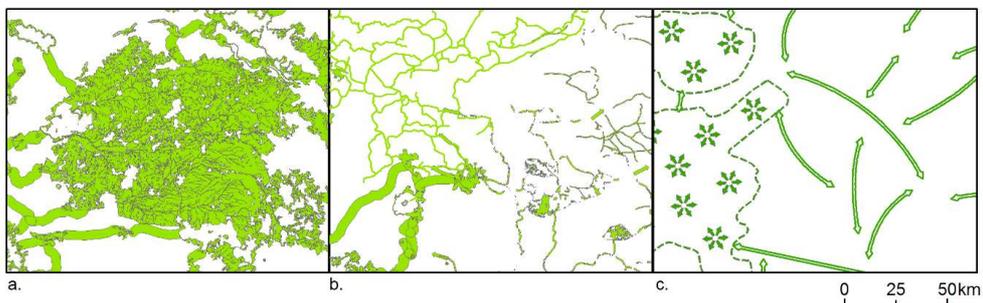
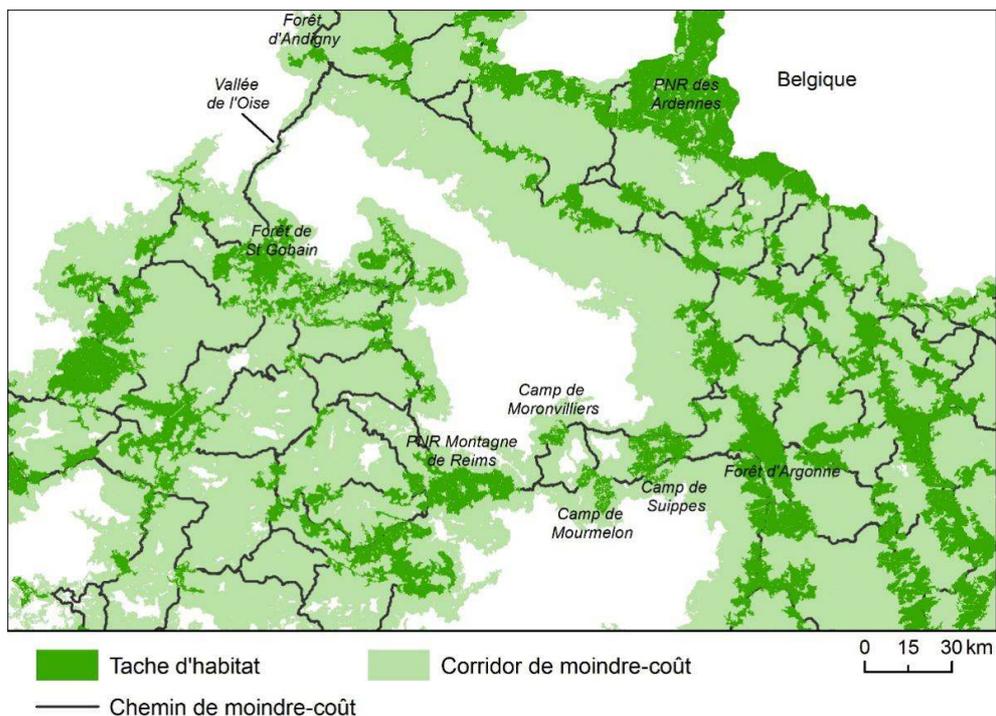


Figure 7 : Représentation cartographique des éléments du réseau forestier issus de l'approche « graphe », pour les grands mammifères (zoom sur le nord-est de la région parisienne, emprise similaire à la figure 5).



- 28 L'autre difficulté est liée à la nature même des corridors, représentant une connexion potentielle entre deux habitats. Si les habitats reliés ne sont pas strictement identiques, ce qui est souvent le cas entre l'approche « graphe » et l'approche « TVB », le tracé des corridors peut différer même avec la même méthode. Seule une comparaison visuelle entre le graphe et la cartographie de la TV permettrait de confronter les corridors des deux approches et identifier des axes communs qui n'auraient pas forcément la même emprise. Une solution alternative consisterait à construire le graphe en définissant les nœuds comme les réservoirs forestiers identifiés dans les SRCE. Cela permettrait d'obtenir des corridors probablement similaires, au moins pour les régions ayant utilisé la perméabilité des milieux ou le chemin de moindre coût pour les délimiter (15 régions d'après Sordello *et al.*, 2017). Néanmoins, outre le fait que la méthodologie pour définir ces réservoirs varie fortement entre les régions, les couches SIG des réservoirs ne contiennent pas toujours l'information sur la sous-trame. La construction d'un graphe à partir des réservoirs des SRCE ne peut donc se faire qu'à l'échelle d'une région, pour laquelle la classification en sous-trame forestière est disponible.

Perspectives

Apports de la modélisation pour l'aide à la décision

- 29 Malgré ces limites sur la comparabilité des résultats, la modélisation de la connectivité fonctionnelle apporte un éclairage intéressant sur la sous-trame forestière. Le recours à des données génériques et à une méthode standardisée permet d'identifier les zones nodales et les corridors forestiers de manière homogène sur l'ensemble du territoire et de

s'affranchir des limites administratives régionales. La méthode apporte ainsi des informations sur la capacité des réservoirs et des corridors de la TV à maintenir la fonctionnalité et/ou l'intégrité du réseau à une échelle globale. Les valeurs de connectivité, utilisées seules ou combinées à d'autres critères, peuvent ainsi aider à la hiérarchisation des éléments de la TV, qui est actuellement peu développée dans les SRCE (Sordello *et al.*, 2017).

- 30 Dans cette étude, nous avons fait le choix, parmi les dizaines de métriques disponibles, de nous focaliser sur deux d'entre elles qui permettent d'évaluer la fonctionnalité (Indice de centralité intermédiaire) et l'intégrité (Delta-PC) du réseau. Selon les objectifs de gestion, d'autres métriques peuvent être mobilisées, comme le *Flux* pour identifier les taches d'habitat qui offrent le plus de connexions avec les taches voisines. Si nous avons fait le choix de travailler à l'échelle de la dispersion, critère de viabilité des populations, il est également possible de s'intéresser aux déplacements quotidiens ou saisonniers des espèces, notamment pour la déclinaison de la TV à l'échelle locale dans les Schémas de cohérence territoriale (SCoT) ou les Plans locaux d'urbanisme (PLU).
- 31 Outre l'apport d'information sur les éléments existants, la modélisation peut également aider à compléter la TV en identifiant des secteurs à enjeux écologiques. Neuf SRCE ont par exemple identifié des éléments jouant un rôle proche de ceux des corridors ou des réservoirs sans pour autant être sélectionnés comme tels (liaisons en contexte urbain, espaces à forte perméabilité, connexions multitrames) (Sordello *et al.*, 2017). L'approche « graphe », en s'appliquant à l'échelle parcellaire, peut ainsi faciliter la prise en compte de la TV lors de la réalisation d'une étude d'impact d'un projet d'aménagement (Dehouck et Amsallem, 2017).
- 32 La modélisation peut également répondre à un autre objectif de la TVB, celui de localiser, hiérarchiser et atténuer les obstacles aux continuités écologiques (Vanpeene *et al.*, 2017). En superposant les liens du graphe ayant les plus fortes valeurs de connectivité aux obstacles identifiés dans la TVB (infrastructures linéaires de transport par exemple), il est possible de localiser les secteurs à haut risque de rupture de la connectivité et qui pourraient faire l'objet de mesures d'atténuation (comme par l'implantation de passage à faune). Cette analyse a déjà été menée sur des infrastructures en projet, pour localiser les passages potentiels offrant le meilleur compromis entre un faible nombre d'aménagements à construire et une bonne restauration de la connectivité (Girardet *et al.*, 2018), ainsi que sur des infrastructures existantes, pour améliorer la perméabilité de points de franchissement non prévus pour la faune (pont, viaduc, tunnel) (Mimet *et al.*, 2016).
- 33 Enfin, l'apport de notre approche par rapport au dispositif TVB est l'articulation des échelles dans la représentation des processus écologiques. Le modèle a en effet été paramétré ici pour évaluer l'importance des taches d'habitat et des corridors pour la dispersion à l'échelle de plusieurs générations d'espèces. Les éléments du graphe sont ainsi cartographiés à l'échelle locale, tout en tenant compte de leur importance pour la connectivité globale. La visualisation du graphe sur une carte interactive qui permet de zoomer de manière quasi infinie⁶ peut faciliter la déclinaison de la TV à l'échelle parcellaire, pour laquelle les acteurs concernés manquent encore d'outils et de méthodes standardisés (Amsallem *et al.*, 2018 ; Debray, 2016).

Améliorations du modèle et limites

- 34 L'approche proposée dans cet article repose sur un paramétrage volontairement simple du modèle afin d'explorer la pertinence de la méthode. La définition des taches d'habitat est fondée exclusivement sur l'occupation du sol couplée aux exigences écologiques des profils d'espèces. Ce choix permet d'avoir une approche généralisable à l'ensemble du territoire, les données de base (carte OSO2017 et Route500©) couvrant l'espace national de manière homogène et exhaustive. Malgré cette relative simplicité, la définition des paramètres est une étape cruciale pour garantir la pertinence des résultats. Dans cette étude, le choix de la résolution spatiale et thématique de la carte d'occupation du sol, des valeurs de résistance attribuées au paysage ou encore de la distance de dispersion s'est appuyé sur des données de terrain, des dires d'experts et la littérature. En outre, la sensibilité des résultats au choix de ces paramètres a été évaluée (voir par exemple Clauzel *et al.*, 2013 ; ou Foltête *et al.*, 2012, pour plus d'informations).
- 35 Plusieurs types d'amélioration sont envisageables mais impliquent la disponibilité de données présentant les mêmes qualités :
- Affiner la définition des taches d'habitat en tenant compte de l'utilisation du sol. Certaines taches forestières identifiées par le modèle ont probablement peu de chances d'être des habitats pour les espèces en raison de la présence d'activités humaines. C'est le cas par exemple des camps militaires de la Marne où les entraînements et les clôtures réduisent la possibilité de connexion avec les taches voisines. Néanmoins, l'approche actuelle a le mérite de montrer le potentiel stratégique de ces espaces comme tache-relais (figure 7).
 - Affiner la définition des taches d'habitat en tenant compte de la composition spécifique et de la gestion forestière. Nous avons choisi d'opter pour une approche générique de la forêt en agrégeant les différents types de peuplements, sur le même principe que la sous-trame forestière de la TVB. Or, un certain nombre d'espèces animales sont inféodées aux forêts de feuillus exclusivement, et inversement. De même, la gestion forestière peut fortement modifier le potentiel écologique des habitats (cas de la forêt des Landes par exemple).
 - Moduler la perméabilité des routes nationales et des autoroutes. Le choix ici a été d'attribuer une même valeur de résistance à ces deux types de routes. Or, il est probable que les autoroutes soient plus difficiles à traverser pour les espèces en raison des clôtures et du terre-plein central. Inversement, la présence de passages à faune peut faciliter leur traversée. Néanmoins, outre la question de la relative efficacité de ces aménagements pour bloquer ou faciliter le passage des animaux, l'ajout de ces paramètres dans le modèle nécessiterait d'avoir des données exhaustives localisant leur emplacement sur l'ensemble du réseau routier français, ce qui actuellement n'est pas le cas.
 - Intégrer le relief dans le calcul des liens du graphe pour augmenter le coût des pixels traversés en fonction de la pente. Sur les zones de fort relief, cette option privilégierait la création de chemins suivant les courbes de niveau, plus longs mais moins coûteux que des chemins directs passant à travers une falaise (Mimet *et al.*, 2016). Une prise en compte de la pente amènerait probablement à une déconnexion du massif pyrénéen, qui dans le modèle actuel est rattaché de manière très fragile à la forêt des Landes par l'intermédiaire de quelques taches relais (cf. carte interactive, couches 100 km_1000 ha).
- 36 Testée ici sur la sous-trame forestière, la méthode peut aisément s'appliquer aux autres sous-trames « vertes » mais aussi aux sous-trames « bleues », en particulier les zones humides et les mares. Son utilisation pour modéliser la trame bleue hydrographique (eaux courantes) est également possible, mais nécessite des ajustements méthodologiques

propres à cet objet de nature linéaire (par exemple associer une direction aux liens représentant le sens d'écoulement). Appliquée à différentes sous-trames, la modélisation par les graphes facilite les approches multi-espèces et multi-trames en offrant la possibilité de spatialiser le potentiel de connectivité sur l'ensemble du territoire. Si notre étude a produit une représentation discrète des éléments du graphe dans la perspective de confronter nos résultats avec la TV, il est possible d'interpoler les valeurs de connectivité de chaque nœud et lien du graphe sur l'ensemble du continuum spatial afin de spatialiser la connectivité paysagère même en dehors du réseau écologique (Sahraoui, 2016). Cette spatialisation pour un groupe d'espèces (ou une sous-trame donnée) peut ensuite être combinée à d'autres pour un diagnostic multi-espèces (ou multi-trames).

Conclusion

- 37 Ce travail exploratoire montre l'intérêt d'une approche modélisatrice pour l'identification et la gestion de la trame verte, en appui aux dispositifs existants. La modélisation par la théorie des graphes ouvre ainsi des perspectives intéressantes pour la prise en compte de la connectivité globale dans le suivi et l'évaluation de la TVB, mais aussi dans sa déclinaison à l'échelon local dans les documents d'urbanisme. Les premiers résultats sur le réseau forestier invitent à poursuivre et approfondir cette analyse en la généralisant aux autres milieux dans une démarche multi-espèces et en améliorant le paramétrage du modèle sous réserve de la disponibilité des données.

BIBLIOGRAPHIE

Amsallem J., Sordello R., Billon L., Vanpeene S., 2018, "Bilan des Schémas régionaux de cohérence écologique en France : quels apports méthodologiques pour l'identification et la cartographie de la Trame verte et bleue ?", *Sciences Eaux et Territoires. La Revue d'IRSTEA*, No.25, 4-11. URL : <http://www.set-revue.fr/bilan-des-schemas-regionaux-de-coherence-ecologique-en-france-quels-apports-methodologiques-pour>

Amsallem J., Dehouck H., 2018, "Focus - Comment préciser les continuités écologiques à l'échelle locale parcellaire ?", *Science Eaux & Territoires*, No.25, 32-33. URL : <http://www.set-revue.fr/focus-comment-preciser-les-continuites-ecologiques-lechelle-locale-parcellaire>

Billon L., Gregoire A., Duchene C., Mustiere S., Lombard A., Sordello R., 2017, *Réalisation d'une carte de synthèse nationale des continuités écologiques régionales - Rapport méthodologique*, UMS 2006 Patrimoine naturel, AFB/CNRS/MNHN.

Calabrese J.M., Fagan W.F., 2004, "A comparison-shopper's guide to connectivity metrics", *Frontiers in Ecology and the Environment*, Vol.2, No.10, 529-536.

Clauzel C., Girardet X., Foltête J.-C., 2013, "Impact assessment of a high-speed railway line on species distribution: Application to the European tree frog (*Hyla arborea*) in Franche-Comté", *Journal of environmental management*, Vol.127, 125-134.

- Clergeau P., Liénard S., 2011, "Trame Verte et Bleue : Utilisation des cartes d'occupation du sol pour une première approche qualitative de la biodiversité", *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], article No.519. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/23494>.
- Cormier L., Bernard De Lajartre A., Carcaud N., "La planification des trames vertes, du global au local : réalités et limites", *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], article No.504. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/23187>.
- Debray A., 2016, "Les difficultés de la transposition communale des corridors écologiques. Analyses appliquées à trois communes de l'agglomération tourangelle", *Développement durable et territoires* [En ligne], Vol.7, No.3. URL : <http://journals.openedition.org/developpementdurable/11495>
- Dehouck H., Amsallem J., 2017, *Analyse des méthodes de précision des continuités écologiques à l'échelle locale en France*, Irstea –UMR TETIS, Centre de ressources Trame verte et bleue.
- Foltête J.-C., Clauzel C., Vuidel G., 2012, "A software tool dedicated to the modelling of landscape networks", *Environmental Modelling & Software*, Vol.38, 316-327.
- Forman R.T., 1995, *Land mosaics: the ecology of landscapes and regions*, Cambridge University Press.
- Galpern P., Manseau M., Fall A., 2011, "Patch-based graphs of landscape connectivity: A guide to construction, analysis and application for conservation", *Biological Conservation*, Vol.144, No.1, 44-55.
- Girardet X., Foltête J.-C., Clauzel C., Vuidel G., 2016, "Restauration de la connectivité écologique : proposition méthodologique pour une localisation optimisée des passages à faune", *Vertigo* [En ligne], Hors-Série 24. URL : <http://vertigo.revues.org/17337>.
- Girardet X., Clauzel C. (dir.), 2018, "Graphab : 14 réalisations à découvrir", Actes de la journée Retour d'expérience sur Graphab du 27 juin 2017. URL : https://sourcesup.renater.fr/graphab/download/Livret_Graphab%20-%202014%20realisations%20a%20decouvrir_2018.pdf
- Gurrutxaga M., Rubio L., Saura S., 2011, "Key connectors in protected forest area networks and the impact of highways: A transnational case study from the Cantabrian Range to the Western Alps (SW Europe)", *Landscape and Urban Planning*, Vol.101, No.4, 310-320.
- Mimet A., Clauzel C., Foltête J.-C., 2016, "Locating wildlife crossings for multispecies connectivity across linear infrastructures", *Landscape Ecology*, Vol.31, No.9, 1-19.
- Minor E.S., Lookingbill T.R., 2010, "A Multiscale Network Analysis of Protected-Area Connectivity for Mammals in the United States", *Conservation Biology*, Vol.24, No.6, 1549-1558.
- Opdam P., Steingröver E., Rooij S., 2006, "Ecological networks: A spatial concept for multi-actor planning of sustainable landscapes", *Landscape and Urban Planning*, Vol.75, No.3-4, 322-332.
- 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*, Vol.83, No.2-3, 91-103.
- Saura S., Vogt, P., Velázquez, J., Hernando, A., Tejera, R., 2011, "Key structural forest connectors can be identified by combining landscape spatial pattern and network analyses", *Forest Ecology and Management*, Vol.262, No.2, 150-160.
- Sahraoui Y., 2016, *Le paysage, entre esthétique & écologie : modélisation rétrospective à partir de changements d'occupation du sol*, Thèse de doctorat en géographie, Université de Franche-Comté.

Sordello R., Billon L., Amsallem J., Vanpeene S., 2017, *Bilan technique et scientifique sur l'élaboration des Schémas régionaux de cohérence écologique. Méthodes d'identification des composantes de la TVB*, Centre de ressources TVB.

Taylor P., Fahrig L., With K., 2006, "Landscape connectivity: a return from the basics", in Crooks K. R., Sanjayan M. (eds), *Connectivity Conservation*, Cambridge University Press, 29-43.

Urban, D., Keitt, T., 2001, "Landscape connectivity: a graph-theoretic perspective", *Ecology*, Vol.82, No.5, 1205-1218.

Vanpeene S., Sordello R., Amsallem J., Billon L., 2017, *Bilan technique et scientifique des Schémas régionaux de cohérence écologique. Méthodologies d'identification des obstacles et d'attribution des objectifs*, Centre de ressources TVB.

NOTES

1. Le terme « tache » est issu de l'anglais *patch* et fait référence à une entité surfacique différenciée de son contexte paysager.
2. Cette méthode ayant déjà été décrite à plusieurs reprises, nous renvoyons le lecteur aux différentes références bibliographiques citées dans le texte pour des informations plus détaillées sur chacune des étapes.
3. Les SRCE ayant été définis avant la fusion des régions, l'analyse de la TV et sa comparaison avec nos résultats utilisent les périmètres et la dénomination des anciennes régions.
4. Le SRCE de la région Centre classe la forêt de Chambord en « zones de corridors diffus à préciser localement, [...] traduisant l'existence de secteurs très perméables où les corridors ne peuvent être appréhendés à l'échelle régionale ». La forêt de Chambord constitue ainsi un élément de « continuité nationale à travers un axe partant du massif de Païolive au sud-est du Massif central pour remonter vers l'ouest, jusqu'à la Sologne ».
5. La région Bretagne a défini ses corridors par interprétation visuelle lors de groupes de travail réunissant différents experts. Les flèches symbolisent des axes majeurs de connexion sans distinction des sous-trames.
6. Pour des questions d'optimisation du temps d'affichage, nous avons néanmoins bloqué le zoom maximum au 1 :15000° dans la carte interactive.

RÉSUMÉS

Face à l'inefficacité des zonages classiques de protection pour enrayer la perte de biodiversité, la mise en connexion des habitats naturels pour permettre aux espèces animales et végétales de se déplacer est devenue un enjeu majeur des politiques environnementales. L'identification et la gestion des réseaux écologiques soulève néanmoins des difficultés face à la diversité des méthodes pour analyser la connectivité et le manque de données harmonisées à l'échelle d'un pays. L'objectif de cette étude est d'utiliser la théorie des graphes pour intégrer plus finement la connectivité fonctionnelle du paysage dans la modélisation des réseaux écologiques à différentes échelles spatiales. Le recours à des données génériques et à une méthode standardisée permet d'identifier les zones nodales et les corridors de manière homogène sur l'ensemble du territoire

métropolitain français et de s'affranchir des limites administratives régionales. Les résultats cartographiques mettent en évidence une trame verte à l'échelle nationale qui peut être comparée à la Trame verte et bleue existante dans une perspective d'aide à la décision.

Connecting natural habitats to allow animal and plant species to move has become a major issue in environmental policies. However, the identification and management of ecological networks raises difficulties due to the diversity of methods for analyzing connectivity and the lack of harmonized data at the country level. The aim of this study is to use graph theory to more finely integrate the functional connectivity of the landscape into the modeling of ecological networks at different spatial scales. The use of generic data and a standardized method makes it possible to identify core areas and corridors in a uniform way throughout the French metropolitan area and to overcome regional administrative boundaries. The results highlight a nationwide ecological network that can be compared to the existing green and blue infrastructure in a decision-making perspective.

INDEX

geographyun 908, 926, 250

Keywords : connectivity, biodiversity, ecological network, graph theory, decision support

Mots-clés : connectivité, biodiversité, réseau écologique, théorie des graphes, aide à la décision

AUTEURS

CÉLINE CLAUZEL

LADYSS UMR 7533 CNRS, Université Paris Diderot, France

Celine.clauzel@univ-paris-diderot.fr

CHARLOTTE BONNEVALLE

ARP-Astrance, France

bonnevalle.charlotte@gmail.com