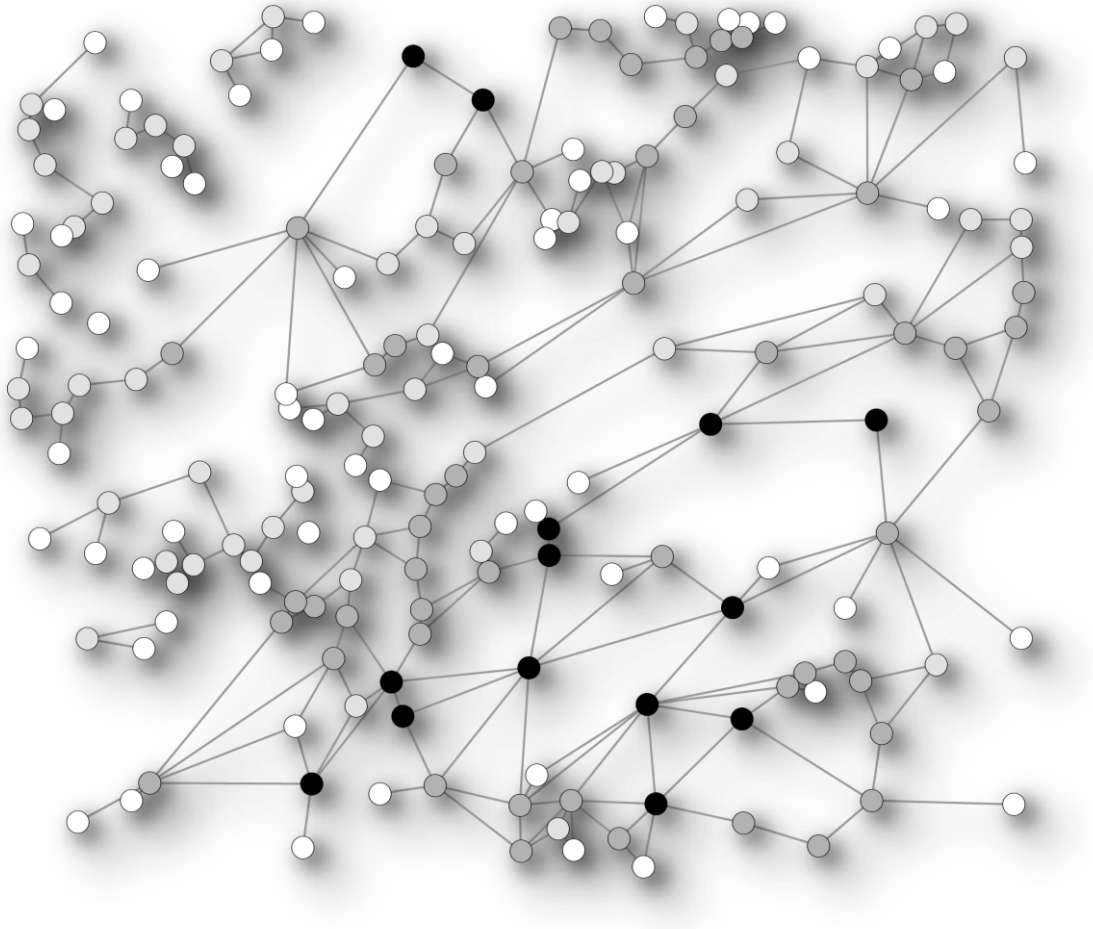
Mémoire de Master 2 - Recherche 2014-2015

Potentiel des graphes paysagers pour l'identification des Trames Vertes et Bleues



Présenté par Rémi Bonduelle

Master 2 Géographie Aménagement Environnement, spécialité Information Spatiale et Aménagement

Sous la direction de Jean-Christophe Foltête

Professeur de Géographie, Université de Franche-Comté, Directeur du Laboratoire ThéMA

UFC Université de Franche-Comté

UFR sciences du langage, de l'homme et de la société

ThéMA UMR 6049 CNRS - Universités de Franche-Comté et de Bourgogne

Remerciements

A Jean-Christophe Foltête, directeur de ce mémoire, pour m'avoir permis de réaliser mon stage au sein du laboratoire Théma, de m'avoir encadré tout au long de ce travail et de m'avoir fait profiter de son expertise.

A François-Pierre Tourneux, maître de conférences, pour ses remarques et conseils quant à la bonne tenue de ce mémoire.

A Gilles Vuidel et Jérôme Valence pour leur appui technique en SIG et en informatique.

A Yohan Sahraoui et Marc Bourgeois, doctorants au laboratoire ThéMA pour leur patience et leur disponibilité afin de mener à bien ce mémoire.

A ma famille qui m'a toujours soutenu, et qui m'a permis de réaliser ces études.

Et enfin, à toutes les personnes non citées qui m'ont soutenu tout au long de ces années.

Introduction

La consommation de ressources et d'espace par l'Homme se répercutent à plusieurs échelles : à une échelle mondiale avec les changements climatiques, à une échelle régionale et inter-régionale avec des problèmes de fragmentation de l'espace et à une échelle locale par la destruction des milieux (Delcourt et Delcourt, 1988). A une échelle régionale, le développement actuel de nos sociétés entraîne une augmentation de la fragmentation de nos territoires (M. Gurrutxaga et al.,2010). Ce phénomène est lié à notre façon d'aménager l'espace en fonction de nos besoins. Notre développement a des conséquences notamment sur la biodiversité. Il a été montré par Fahrig (2003); Foley et al., (2005) et Kraussetal, (2010) que la fragmentation est l'une des causes majeures de la perte de biodiversité. La fragmentation du territoire est due à : l'étalement urbain, la construction d'infrastructures de transport et la reconversion de terres par l'agriculture intensive.

A partir des années 1990 l'approche des réseaux écologiques vise à limiter la perte de biodiversité (Bennett et Mulongoy, 2006). Au niveau mondial, les sommets de Rio en 1992 et de Johannesburg en 2002 mettent en évidence la perte de biodiversité ainsi que les moyens à mettre en place afin de limiter cette perte de biodiversité par la création de réseau écologique. Cette approche consiste à utiliser les espaces protégés déjà mis en place puis à mettre en réseaux les réservoirs à l'aide de corridors écologiques afin de maintenir des espaces fonctionnels dans le paysage.

En France, les lois Grenelle I de 2007 et Grenelle II de 2009 ont permis de prendre en considération les préoccupations écologiques. La création des Trames Vertes et Bleues (TVB) est issue de ces lois Grenelles. La TVB est un outil favorisant la biodiversité. Selon le code de l'urbanisme cet outil a pour objectifs : « la préservation de la biodiversité notamment par la conservation, la restauration et la création de continuités écologiques » (Article L.110). Selon le code de l'environnement, il s'agit « d'enrayer la perte de biodiversité en participant à la préservation, à la gestion et à la remise en bon état des milieux nécessaires aux continuités écologiques » (Article L371-1). Comme les problèmes liés à la perte de biodiversité, la TVB doit être utilisée à plusieurs échelles afin d'obtenir un réseau de protection cohérent entre toutes les échelles du territoire. Dans ce but a été créé le comité opérationnel des trames vertes et bleues (COMOPTVB) fixant les « orientations nationales » et proposant des guides afin de mettre en application l'outil TVB. A l'échelle régionale, un schéma de cohérence écologique (SRCE) est élaboré, pour spatialiser et hiérarchiser les enjeux de continuités écologiques. A l'échelle locale, des documents de planification sont utilisés pour introduire les concepts et les applications liées à la TVB dans les Schéma de Cohérence Territoriale et les Plan Local d'Urbanisme intercommunaux. Les difficultés de l'application TVB sont multiples, en effet la multiplicité des échelles, des acteurs et des méthodes à mettre en œuvre fait de la TVB un outil nécessaire et indispensable pour la préservation de la biodiversité mais contraignant à mettre en action.

Une méthode a été développée plus récemment pour identifier au mieux les besoins des espèces avec un minimum de données sur les espèces étudiées. Il s'agit de la construction des réseaux écologiques développés à partir de la théorie des graphes par Urban and Keitt (2001). La théorie des graphes est une théorie mathématique utilisée dans l'analyse des réseaux. Les graphes peuvent être considérés comme une forme de modélisation des réseaux écologiques. En effet, plusieurs méthodes peuvent être appliqués afin d'analyser la connectivité de la structure paysagère. Le développement de métriques permet d'estimer les flux de déplacements potentiels entre les taches d'habitat. L'utilisation des graphes paysagers par les aménageurs est récente, de plus ces méthodes ne font pas encore l'unanimité dans la création des réseaux écologiques. L'enjeu pour la diffusion et la compréhension de ce domaine d'expertise est de vulgariser les idées, concepts et méthodes. L'application de cette méthode pour l'identification des réseaux écologiques n'est pas encore acquise.
L'un des objectifs de ce mémoire est de déterminer si l'ajout de nouveaux critères à la construction des graphes paysagers permet d'identifier plus précisément les composantes des réseaux écologiques. Suite aux différents constats énoncés plusieurs problèmes émergent :

Quelle opportunité pour les graphes paysagers dans la modélisation des réseaux écologiques ? Comment la théorie des graphes appliquée aux réseaux écologiques va-t-elle permettre l'identification et la hiérarchisation de scénarii d'aménagement afin de déterminer les réservoirs de biodiversité et les corridors écologiques de la sous-trame forestière à l'échelle de la Franche Comté et du SCoT Bisontin ? Et quelles sont les conséquences de l'application de critères restrictifs issues d'analyses multicritères pour la définition des taches d'habitats et leur impact sur les calculs de connectivité?

Tout d'abord, nous proposerons de situer ce mémoire par rapport aux travaux existants en écologie du paysage et dans le domaine de construction des trames vertes et bleues aux différentes échelles fonctionnelles du territoire. Les objectifs sont d'établir les concepts et notions clés des réseaux écologiques, afin d'appréhender le rôle de la connectivité dans le paysage.
Puis, nous présenterons les territoires d'études et les données mobilisées à l'échelle de la région Franche-Comté et du SCoT Bisontin afin d'observer les réservoirs de biodiversité et les corridors écologiques composantes des réseaux écologiques. Dans le même temps, nous aborderons les étapes de construction des scénarii issus des graphes paysagers avec le support du logiciel Graphab et les différents scénarii à comparer.
Enfin, la dernière partie exposera les résultats des scénarii obtenus. Nous explorerons dans un premier temps les résultats obtenus par le calcul des deltas métriques sur les réservoirs de biodiversité. Nous chercherons ensuite à analyser les résultats sur la construction des corridors écologiques. Puis nous analyserons les enjeux liés aux multi-échelles afin d'observer les méthodes de représentation entre échelles d'analyses. Le mémoire se termine par une discussion des résultats obtenus.

1 – Les origines et les concepts des réseaux écologiques

L'écologie du paysage est une discipline fondée sur la géographie et l'écologie, elle utilise aussi bien des méthodes et des théories issues de ces deux disciplines. L'objectif est de répondre aux enjeux de nos sociétés concernant la destruction et la fragmentation des « milieux naturels » liés à l'anthropisation. Cette nouvelle discipline est à l'origine une prise de conscience d'experts. L'utilisation d'idées et de concepts issus de l'écologie du paysage a permis le développement de la modélisation et la création des réseaux écologiques.

1.1- L'origine des systèmes de protection

1.1.1 – Création et évolutions de protections nécessaires à la gestion des ressources naturelles et paysagères.

Les premiers zonages de protection des milieux naturels correspondent au souhait d'Etat voulant protéger des paysages remarquables. La création de zone de protection des milieux naturels correspond aux besoins de l'Homme d'aménager son territoire et de son souci pour le maintien de la biodiversité. Au début, l'objectif était du sanctuariser des espaces naturelles exceptionnelles. De nos jours, les systèmes de protection de l'environnement ont évolués: d'un ensemble de zone statique à un système connecté et dynamique.

Les premières zones de protection : de la « réserve artistique » aux parcs nationaux.

La première demande de protection du paysage est réalisée par les peintres de l'école de Barbizon. L'inquiétude de ces peintres est la modification par l'Homme des paysages, qu'ils peignent de la forêt de Fontainebleau. Un périmètre de protection de 1097 hectares est créé sous l'impulsion des peintres, en 1961, appelé à l'époque « réserve artistique ». Les autorités compétentes de l'époque les « Eaux et Forêts » ont pour consigne de ne plus intervenir dans la gestion de cet espace.

Les Etats-Unis ont été les suivants à mettre en place des zones de protection, en 1864, Le parc régional de la vallée du Yosemite est classé. La création du premier parc national dans le monde demeure américaine avec le parc de Yellowstone en 1872. Des explorateurs mandatés par l'état dans le Wyoming font état dans un paysage « digne d'intérêt ». Cependant, dans la culture américaine la protection du territoire par les parcs nationaux paraît davantage liée à la création d'espace récréatif et de détente pour les citoyens «cette région serait désormais un Parc national, dont la jouissance pleine et entière resterait réservée au peuple américain» (Jaffeux 2010). Au tournant du XIXe et du XXe siècle, l'exemple américain a été suivi dans le reste de l'empire colonial britannique : en Australie (1879), The Royal National Park, au Canada (1886 et 1887), Glacier National Park et Banff National Park, en Nouvelle-Zélande (1894), Tongariro National Park, en Afrique du Sud (1898), le Krüger National Park, mais aussi en Argentine (1903 et 1909), les parcs nationaux du Nahuel Huapi et de L'Iguazu. Ces parcs font partie d'un mouvement de pays à situation coloniale disposant de nouveaux territoires sauvages et inexplorés. En revanche, Les pays européens ne participent pas à ce premier

mouvement de création de parc naturel. A cette époque, la perception de la protection paysagère est davantage attribuée à l'esthétisme accordé au paysage qu'à l'écologie.

Malgré un retard pour la création de parcs nationaux, l'objectif de protection évolue en Europe et en France. L'accent est mis sur la protection des espèces, cette évolution est due à la Ligue Française pour la Protection des Oiseaux(L.P.O) crée la première « réserve naturelle » française sur l'archipel des Sept Iles dans les Côtes d'Armor. La vision du système de protection change peu à peu mais il faudra attendre 1973 avec la Convention de Washington afin de voir apparaître les premiers textes internationaux sur la protection des espèces en voie de disparition. L'Union Européenne va plus loin en 1979 avec la directive « Oiseaux ». Pour mettre en application cette directive : « Les États membres de l'Union européenne (UE) doivent engager des mesures pour assurer la conservation et réglementer l'exploitation des oiseaux vivants naturellement à l'état sauvage sur le territoire européen pour maintenir ou adapter leur population à un niveau satisfaisant. »[1]

1.1.2 Les inventaires de protection…

L'absence de considération pour l'habitat des espèces protégées est rapidement rectifiée, en effet il est tout aussi important de protéger l'habitat et les espèces. Les zones de la convention Ramsar pour la protection des zones humides sont les premières à favoriser la protection d'un milieu pour la richesse écologique le composant. En France, La Création des Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique (ZNIEFF) est le point de départ pour la protection des milieux écologiques. Ces zonages ont une valeur juridique, selon le code de l'urbanisme lors de l'élaboration ou de la révision d'un Schéma Cohérence Territoriale (SCOT), d'un Plan local d'urbanisme (PLU) ou d'une carte communale. Ces zonages doivent être pris en compte dans les différents échelons de l'aménagement du territoire.[2]

L'Union Européenne en 1992 développe son système de protection avec la création de la directive « habitat » ayant pour objectif le maintien de la biodiversité. C'est la création des zones spéciales de conservation (ZSC) issue de la directive « habitat » et des zones de protection spéciales issue de la directive « oiseaux ». Ces zones sont les prémices de la stratégie paneuropéenne de la protection écologique et de la création d'un réseau écologique à l'échelle de l'UE.

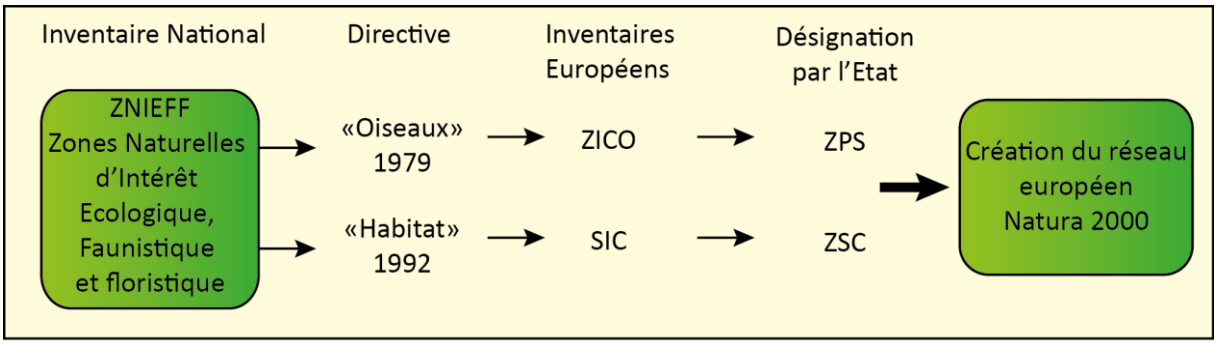
1.1.3. … aux réseaux écosystémiques

Des conférences mondiales et européennes se sont tenues sur les problèmes liés à l'environnement. Une partie du problème est la mauvaise gestion des ressources naturelles, la destruction de ces milieux naturels a fait émerger le besoin de maintenir des écosystèmes viables et le concept de réseaux écologiques. La conférence de Rio de Janeiro en 1992 est le point de départ de cette tendance définissant le concept de développement durable. Dix ans, après une nouvelle conférence a été tenue à Johannesburg. Pendant cette période les concepts de protections des milieux naturels

[1] Source : ec.europa.eu/legislation_summaries/environment/nature_and_biodiversity/ev0024fr_fr.htm
[2] Le rôle de ces documents sera approfondi au cours de l'étude.

ont évolué. Nous sommes passés de la protection des écosystèmes, espèces et ressources naturelles, même ordinaires ; à la préservation de la biodiversité, sur l'identification de réseaux et de couloirs écologiques aux niveaux nationaux et régionaux.

En Europe l'application des principes développés à Rio en 1992 est adopté lors de la Troisième Conférence ministérielle "Un environnement pour l'Europe" réunie en octobre 1995 à Sofia en Bulgarie. L'objectif majeur de ces conférences est développé une stratégie approprié pour lutter contre le déclin des paysages et de la biodiversité en Europe puis de proposer des solutions concrètes pour maintenir un environnement « naturel ». C'est le début de la stratégie pan-européenne de protection et de lutte contre la biodiversité. En 2003, l'Europe avec la Résolution de Kiev sur la biodiversité se donne les moyens d'agir à son échelle contre la perte de biodiversité avec la création d'un réseau écologique Européen.
Pour lutter contre la perte de biodiversité les deux directives européennes « Oiseaux » (1979) et « Habitats faune flore » (1992) sont mobilisés. L'association de ces deux zones de protection forme la base réglementaire du grand réseau écologique européen : Le réseau Natura 2000.
Avec la création du réseau Natura 2000, l'objectif de l'Europe est la préservation des espèces et des habitats protégés par ce réseau ; le souhait est de réaliser un maillage complet de l'Europe. La libre circulation des espèces animales et la préservation de leur habitat sont au centre de toutes les attentions.



Rémi Bonduelle D'après la DREAL Basse-Normandie

Figure 1 La création et l'intégration du réseau Natura 2000 en France

Conclusion

Pour arriver à ce système de protection, il aura fallu plus d'un siècle. D'un système de protection par zones récréatives à celui d'un réseau écologique comme Natura 2000. Ces évolutions ont été possibles par le travail de scientifiques, d'acteurs de terrains, etc… La compréhension de problématiques modernes liées à nos modes de vie et à leurs actions sur l'environnement a permis le développement dans un premier temps de zones de protection avec en priorité la protection d'espèces en voie d'extinction et la protection des milieux exceptionnels. Depuis la protection s'est étendue à l'ensemble des espèces des milieux dits « ordinaires ». Cette volonté de protection de la biodiversité a fait émerger le processus de réseaux écologiques.

1.2– Les apports de l'écologique du paysage

Pour mieux comprendre le rôle de la connectivité, il faut s'intéresser à deux théories fondatrices de l'écologie du paysage : les théories de biogéographies des îles de Mac Arthur et Wilson et la théorie de métapopulation. De plus, la connectivité est contrainte par l'espace et le temps comme le suggère la théorie de la hiérarchie. L'évolution perpétuelle de la structure fonctionnelle du paysage peut modifier la connectivité. S'appuyer sur ces théories va permettre de distinguer les relations existant entre les besoins caractéristiques des espèces et l'agencement des structures paysagères. La connectivité fonctionnelle représente la possibilité pour une espèce de pouvoir se déplacer dans son habitat préférentiel en fonction de ses caractéristiques biologiques (Mougenot et Melin, 2000).

1.2.1 Les théories de l'écologie du paysage

Pour comprendre les principes liés à la notion de connectivité, la théorie biogéographique des îles de MacArthur et Wilson (1967) et des métapopulations doivent être expliquées. La première se fonde sur l'observation d'espèces résidantes d'un archipel, elle permet de définir deux principes. Premièrement, la probabilité d'immigration est liée à la surface de l'habitat et à la proximité de l'habitat source. Il va diminuer au fur et à mesure que les nouvelles espèces s'installent et saturent les niches écologiques disponibles. Deuxièmement, La probabilité d'extinction est d'autant plus importante que la surface est faible. Quant à la théorie des métapopulations, elle décrit un groupe de populations d'une même espèce occupant un habitat fragmenté, mais qui continue à interagir de manière régulière ou diffuse. La distribution discontinue d'une métapopulation est causée par la fragmentation géographique et par une alternance d'habitats favorables et défavorables qui obligent les animaux à prendre des risques en se déplaçant d'un endroit favorable à un autre. D'où l'importance de déterminer la taille minimale d'habitats et la distance de dispersion d'une espèce car ces attributs garantissent le brassage génétique des populations.
L'autre volet est apporté par la théorie de la hiérarchie Allen et Star (1982). D'après Berthoud (2010), il existe une corrélation évidente entre les échelles d'espaces et de temps au niveau des vitesses de fonctionnement : les phénomènes qui se déroulent sur de grands espaces sont beaucoup plus lents que ceux qui se déroulent à une échelle locale. De plus, ces processus ne sont pas continus en n'ayant pas la même genèse et ont relativement peu d'interactions. Le système global peut donc être découpé en niveaux d'organisation distincts. La théorie de la hiérarchie apporte une vision supplémentaire à la connectivité. Elle doit être également pensée en termes d'échelles spatiales, temporelles.

1.2.2 Le rôle de la connectivité

La connexité

La connexité est une variable fonctionnelle mesurant le degré d'influence, c'est- à-dire la facilité ou la difficulté de mouvement des espèces entre les différentes taches d'habitats. Dans un réseau écologique, la fragmentation des habitats ou leur connexion jouent un rôle majeur dans la distribution et la survie des populations animales.

Forman et Godron (1986) ont défini les corridors comme:

« *Narrow strips of land which differ from the matrix on either side. Corridors may be isolated strips, but are usually attached to a patch of somewhat similar vegetation*. »

Par ce constat, les différentes utilisations possibles des corridors sont distinguées. En effet, il existe plusieurs fonctions aux corridors :

- La fonction d'habitat si le corridor remplit pour l'espèce les conditions de survie, de déplacement et de reproduction.
- La fonction de conduit, il facilite le déplacement de l'espèce sans pouvoir permettre les fonctions d'habitat et de reproduction.
- La fonction barrière ou filtre, elle rend impossible le déplacement de l'espèce dans le premier cas et rend difficile le déplacement dans le deuxième cas. Ce type de corridors diminue grandement la connectivité du réseau.

Les corridors représentent pour une ou un type d'espèce, le déplacement le plus facile pour réaliser ses besoins. La pluralité des types de corridors rend compliquée leur perception. Il est donc important de définir le type de corridor que l'on souhaite créer.

La connectivité

La connectivité représente le besoin de mouvement d'une espèce à se mouvoir dans l'espace. Il s'agit pour une espèce d'évaluer les caractéristiques structurelles de la mosaïque paysagère qui l'entoure afin d'utiliser les éléments du paysage pour se déplacer avec le plus de facilité. Il est difficile d'assurer la connectivité pour toutes les espèces présentes dans une zone d'étude mais les corridors doivent assurer la connectivité au plus grand nombre d'espèces possible. Cependant, en favorisant la connectivité pour une espèce, on peut bloquer d'autres espèces suite aux changements appliqués à la mosaïque paysagère. Il faut donc porter la réflexion sur l'ensemble des espèces caractérisant notre espace.
Pour Burel et Baudry (2006), ils existent deux clés pour évaluer ou restaurer la connectivité. Tout d'abord, il faut comprendre « comment une espèce se déplace dans un paysage » puis « comment le gestionnaire peut agir pour favoriser ou limiter ses déplacements. »
L'utilisation de l'espace par les espèces varie en fonction des temporalités, la plupart sont amenées à devoir se déplacer et utiliser les différents éléments du paysage. Burel et Baudry, 2006 définissent la complémentation et la supplémentation. La complémentation est l'utilisation : « d'éléments de natures différentes, utilisés pour des ressources différentes. » La supplémentation est l'utilisation « d'éléments de même nature, utilisée pour la même ressource ».
Les corridors doivent être le plus fonctionnels possible et offrir à un maximum d'espèces la possibilité de traverser l'ensemble du domaine paysager dans les meilleures conditions possibles. Les corridors n'ont pas pour vocation à être constitué des éléments caractéristiques de l'habitat de l'espace utilisé pour la création du réseau écologique. Il convient cependant de rappeler qu'une espèce aura tendance à favoriser les milieux les moins contraignants et où elle dépensera le moins d'énergie pour ses déplacements (Farina 2006; Turner et al. 2001).
Cette préférence pour certains éléments de la mosaïque paysagère va permettre de raisonner en distance coût plutôt qu'en distance euclidienne (Adriaensen et al. 2003). Cependant, cette approche

reste critiquable, en effet d'autres éléments peuvent rentrer en considération lors des déplacements de certains individus. L'attribution des coûts de déplacements peut aussi faire l'objet de débats selon les espèces et le milieu qui l'entoure. Selon Girardet, (2013) il existe un lien étroit entre l'utilisation des caractéristiques d'une espèce et la modélisation des réseaux écologiques, cette dépendance entraîne des problèmes pour la modélisation des réseaux écologiques. Ce problème est dû à trois raisons :

- Chaque espace possède son biotope.
- Les surfaces vitales sont différentes pour chaque espèce, mais certaines peuvent être regroupées.
- Une distance de dispersion propre à chaque espèce en fonction de ses caractéristiques physiques et la capacité à franchir des milieux non habitables pour lui. (Opdam et al.,2001 et Vos et al. 2001)

Une connectivité soumis à la multiplicité des échelles spatiales et temporelles

La connectivité est tributaire de la temporalité et des échelles spatiales, en effet un corridor peut-être aussi bien matérialisé par une haie ou par un ensemble paysager continue comme un réseau de vallée ou un relief de montagne. Pour un écologue, la temporalité est issue du cycle de vie des individus. En effet, les organismes possèdent différentes phases dans leur cycle de vie. Ces processus écologiques sont les suivants : la dispersion des juvéniles, les déplacements journaliers, les déplacements annuels et saisonniers. Bien sûr, toutes les espèces sont différentes, elles ont chacune leur façon de vivre. Pour Bennett (1999), Il existe quatre grands types de mouvement selon la temporalité des processus écologiques des espèces :

- les espèces sédentaires résident toujours sur la même parcelle d'habitat.
- Des espèces possédant un habitat mais réalisant des déplacements dans d'autres types de milieux à la recherche de nourriture.
- Des espèces saisonnières se déplaçant par les habitats favorables à la recherche de nutriments différents selon les saisons.
- Les espèces migratrices réalisant de grandes migrations traversant parfois les grands ensembles biogéographiques.

D'après Girardet (2013), le déplacement des espèces peut être identifié en trois grandes catégories:

- Les mouvements journaliers,
- les mouvements saisonniers ou migratoires,
- La dispersion.

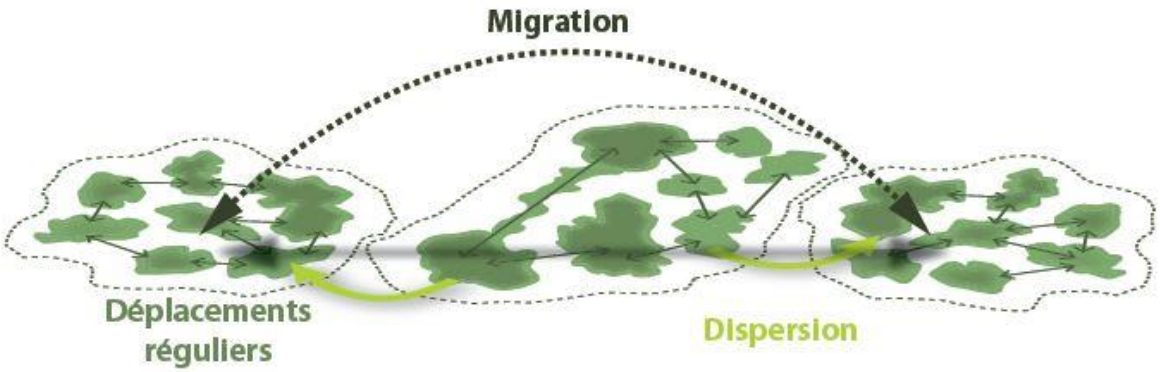


Figure 2 Les différents types de mouvements dans les réseaux écologiques, extrait de Girardet (2013)

Les mouvements journaliers correspondent à des déplacements autour de l'habitat de l'espèce étudiée. Il s'agit des déplacements à l'intérieur du domaine vital, le plus souvent liés à la recherche de ressources alimentaires. Pour les mouvements saisonniers ou migratoires, l'élément déclencheur est la rupture climatique entre les saisons. Ce type de déplacement est plutôt imputé aux oiseaux, ce sont majoritairement eux qui se déplacent sur de longues distances. Les oiseaux migrateurs de par leur nature sont moins perturbés par les éléments fragmentant le territoire puisqu'ils se déplacent généralement sur plusieurs centaines de kilomètres. En revanche, la destruction de certains milieux peut affecter leurs migrations. Et enfin, les mouvements de dispersion correspondent au déplacement d'un individu, le plus souvent des juvéniles. Ces juvéniles sont à la recherche d'un nouveau domaine vital afin d'assurer leurs besoins. Ce type de migration est nécessaire pour le maintien de la biodiversité, car elle permet le brassage génétique des individus et l'enrichissement du patrimoine de l'espèce. C'est pour protéger les espèces ayant ce type de mouvement que les réseaux écologiques sont vitaux pour le maintien des populations.

1.3 – Application des concepts issus des réseaux écologiques à l'aménagement du territoire

Les réseaux écologiques sont l'aboutissement d'une démarche pour la protection de la diversité biologique à toutes les échelles. Ces objectifs sont la création de zones permettant d'assurer les besoins vitaux des espèces. Des applications sont mises en œuvre sur le continent Européen afin d'assurer les objectifs de conservation. L'état Français œuvre également dans ce sens, il met en place aux différentes échelles administratives de son territoire des procédures visant à l'identification des réseaux écologiques.

1.3.1 Les théories issues des réseaux écologiques

Le besoin de protéger la biodiversité est incontestable, cette protection doit être mise en œuvre par une méthode de gestion des systèmes paysagers « naturels ». Ils doivent également s'inscrire dans une logique d'aménagement en offrant la possibilité d'utiliser les ressources naturelles présentes de façon durable (Bennett et Wit, 2001).
Selon Bennett (1999) et Jongman et al. (2001), un réseau écologique doit être composé : d'une zone cœur (core areas), protégée par une zone tampon (buffer zones) et reliées entre elles par des corridors.
Ces éléments doivent être mis en interaction dans le paysage afin d'offrir aux espèces la possibilité de créer leur propre infrastructure toujours divisée par les trois composantes des réseaux écologiques. Elles doivent permettre aux espèces résidentes du réseau d'assouvir les besoins vitaux : dormir, se nourrir et se reproduire.

Pour Bennett (2004), Les réseaux écologiques partagent trois composantes complémentaires les unes aux autres. Il convient alors de catégoriser les différentes classes d'occupation du sol en fonction de la valeur écologique et des ressources naturelles potentielles. Ces composantes surfaciques sont :

- les zones nodales, ou espaces cœurs, lieux où la conservation de la biodiversité prend une importance primordiale.
- les corridors, qui servent aux connexions écologiques. Ils sont le lien entre les zones nodales, ils peuvent être linéaire, en pas japonais (stepping stones) ou paysager.
- les zones tampons protègent le réseau de perturbation externe. Ces zones doivent servir de zone de transition, les terrains doivent être utilisés de manière durable.

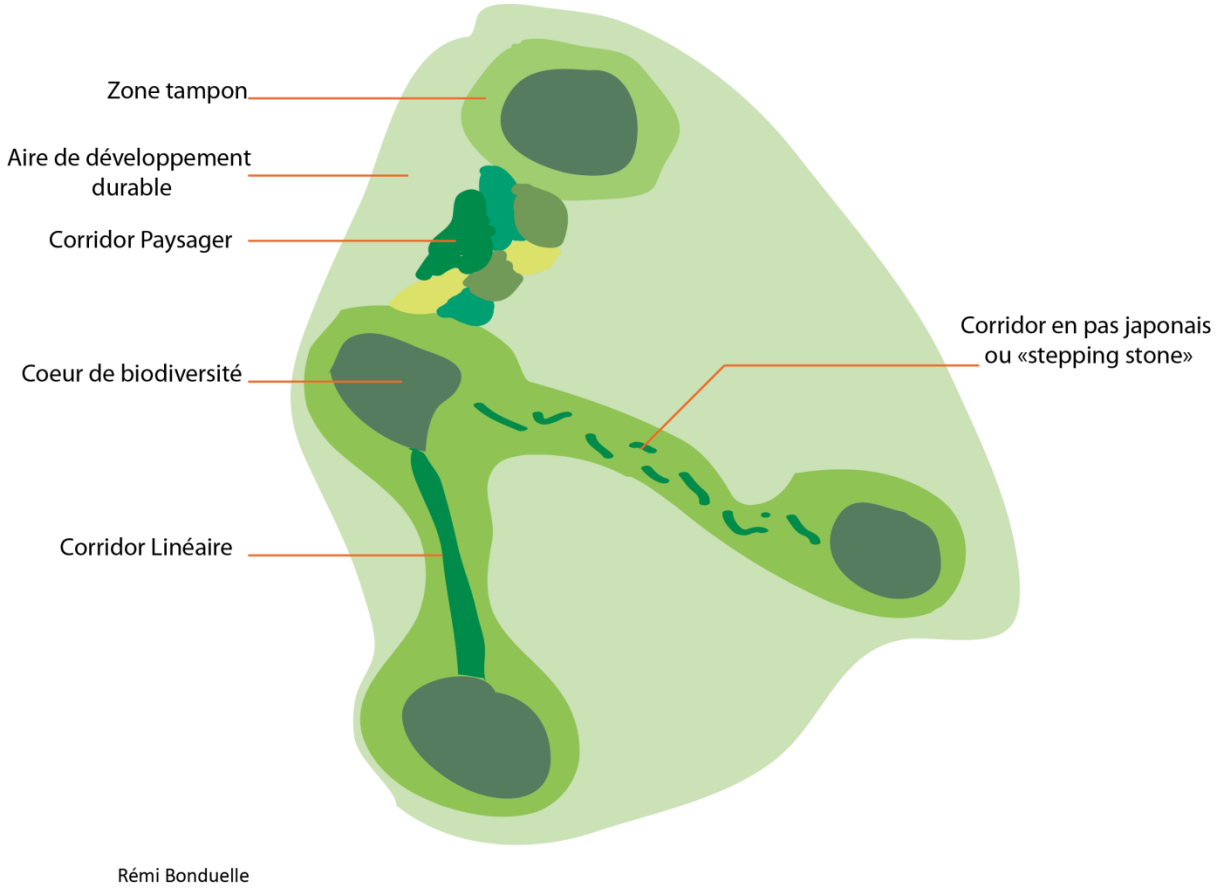


Figure 3 Aménagements des réseaux écologiques, d'après Bennett (2004)

Cette méthode a été choisie pour déterminer les réseaux écologiques à l'échelle de l'Union Européenne lors du développement de la stratégie paneuropéenne de protection de la biodiversité. A l'échelle de l'Europe les zones centrales représentent les principales zones protégées de chaque état tel que : les cœurs de parcs nationaux, les zones de conservation paysagère, les zones de protection internationale de type RAMSAR et de conservation du biotope (UNESCO). Toujours à l'échelle européenne les corridors doivent suivre les caractères écologiques définis par les cœurs qu'ils doivent relier. A ce niveau d'échelle, les corridors identifiés correspondent aux routes migratoires des oiseaux et des grands mammifères. (Burel et Baudry, 2006)

1.3.2 – Les programmes de protection de l'environnement de l'échelle interrégionale à l'échelle locale.

Des démarches interrégionales qui se poursuivent…

Pour l'union européenne, il a été évident de réfléchir à la création d'un réseau écologique à l'échelle continentale. Les objectifs de cette démarche sont : l'identification des éléments paysagers mobilisables à cette échelle et de favoriser la réutilisation des démarches déjà effectuées par les différents pays européens. Cette démarche a été initiée, en 2002, par la cartographie du réseau écologique paneuropéen. Les données utilisées pour identifier les réseaux écologiques à cette échelle continentale sont les données Corine Land Cover (CLC). Cependant, ces données ont un problème lié à leur manque de précision. Néanmoins, elles permettent d'identifier les grands ensembles paysagers et de faire des propositions aux échelles inférieures.
L'étape suivante de la stratégie paneuropéenne des réseaux écologiques a été la combinaison du réseau Natura 2000 et du réseau émeraude dont l'objectif est de mettre en cohérence l'identification des réseaux européens avec les espaces périphériques au continent européen.
En 1991, la Convention Alpine souhaite construire un réseau pour protéger les espaces caractéristiques du milieu Alpin à l'heure actuelle la convention Alpine fédère huit pays : l'Autriche, la France, L'Allemagne, l'Italie, le Liechtenstein, Monaco, La Slovénie et la Suisse. La convention alpine a été la première au monde à protéger son espace par des lois communes à tous les pays limitrophes du massif montagneux
Plus récemment depuis 2007, trois groupes internationaux CIPRA[3], ISCAR[4] et ALPARC[5] interviennent communément à travers le projet « Ecological Continuum Initiative ». Ce projet vise à établir les réseaux écologiques à travers le programme Econnect et le programme Ecological Network Platform of the Alpine Convention. L'autre objectif majeur est l'harmonisation des méthodes de travail entre les pays et de garantir l'accès aux données communes sur l'arc alpin. Le dernier objectif est la prévention et la communication autour de l'importance des réseaux écologiques pour l'arc alpin pour le public.
Les réseaux écologiques à une échelle continentale doivent pouvoir fournir des indications sur les espaces à protéger afin de maintenir une cohérence à l'échelle inférieure. Le but pour ces réseaux est de réfléchir sur des temps d'évolutions des écosystèmes en rapport avec l'échelle de représentation utilisée pour fournir aux espèces l'opportunité de se déplacer en fonction du contexte de changement climatique.

… à l'échelle nationale.

En Europe, les premiers pays à réfléchir à la cohérence des réseaux écologiques à l'échelle nationale sont les Pays-Bas et la Suisse. Ces deux pays ont réfléchi différemment à leur approche de mises en place des réseaux écologiques. Les Pays-Bas ont choisi d'intégrer leur politique de création de corridors écologiques de l'échelle internationale en intégrant leur pays voisins dans la création de corridors jusqu'à l'échelle locale ; intégrant les zones de protection et les corridors créés dans les différents plans d'urbanisme. En revanche, le cas Suisse se repose sur le volontariat de chaque

[3] International Commission for the Protection of the Alps
[4] The International Scientific Committee on Research in the Alps
[5] the Alpine Network of Protected Areas

canton à suivre les indications développées par Berthoud et al. (2004). En effet, la Suisse compte sur l'incitation financière pour inciter les cantons à développer leur réseau écologique.

Pour le cas Français, à l'échelle nationale, le Comité Opérationnel des trames vertes et bleues (COMOPTVB) est en charge de la cohérence des réseaux écologiques. Le COMOP souligne les problèmes liés aux changements climatiques et la fragmentation de l'habitat comme principaux facteurs pour la perte de la biodiversité. Appuyer sur la loi Grenelle de l'environnement le COMOP doit veiller à la cohérence de son outil la TVB aux différentes échelles administratives du territoire Français : nationales, régionales et locales. De plus, il doit tenir compte dans sa démarche des liaisons pouvant être faites avec des régions transfrontalières afin d'assurer une cohérence à l'échelle européenne. Pour réaliser ces objectifs, le COMOP (2011) a développé cinq critères afin d'assurer une cohérence des réseaux écologiques sur tout le territoire :

- L'utilisation de zones de protections déjà existantes.
- La prise en compte pour les milieux aquatiques et humides les espèces déjà identifiées par les plans départementaux d'aménagement et de gestion des Eaux.
- la nécessité de la coopération interrégionale et transfrontalière pour donner une cohérence au réseau écologique.
- le choix des espèces végétales et/ou animales à utiliser pour mettre en cohérence un réseau à l'échelle nationale.
- Enfin, le choix des habitats sélectionnés cependant le COMOP en a distingué quatre à l'échelle nationale : Boisé, Bocager, les milieux froids et humides et les milieux xériques.

1.3.3 La méthode française de représentation des réseaux écologiques : la trame verte et bleue

Les implications liées aux Grenelles de l'environnement

En 1999, la France se dote de la Loi Voynet ou loi d'Orientation pour l'Aménagement et le Développement Durable du Territoire(LOADDT). L'un des enjeux majeurs de cette loi est l'intégration du « développement durable » dans les différents documents d'aménagements du territoire tout « en préservant pour les générations futures les ressources disponibles ainsi que la qualité et la diversité des milieux naturels. »[6] Mais il a fallu attendre les Grenelles de l'environnement I & II de 2007 et 2009 pour avoir les premières lignes directrices de la protection de la biodiversité. L'anthropisation des milieux dits « naturels » notamment avec l'extension de zones urbaines, la spécialisation d'aires agricoles et la construction d'infrastructures de transports ayant un effet barrière contribuent grandement à cette perte de biodiversité. L'un des modes d'action envisagé par les Grenelles a été la mise en place des trames vertes et bleues.
Le projet de loi Grenelle 2 prévoit trois échelles d'actions pour les TVB : Tout d'abord, à l'échelle nationale, puis à l'échelle régionale à travers les schémas régionaux de cohérence écologique, et enfin à l'échelle des intercommunalités dans le cadre de SCoT, PLUi et PLU.
Les trames vertes et bleues se composent de trois composantes selon (Amsallem J., & al., 2010) : les réservoirs de biodiversité, les corridors écologiques et les cours d'eau. La présence de zones tampons ou de transition est de plus en plus présente lors de la création des TVB. Les TVB se composent

[6] LOI no 99-533 disponible sur : http://www.legifrance.gouv.fr/

également de sous-trame, ces sous-trames sont caractéristiques d'un milieu qui lui est propre (ex : sous-trame forestière, sous trame zone humide, etc…). Dans chaque sous-trame une espèce ou un groupe d'espèces sont identifiés. Une fois cumulée ces sous-trames permettent la création des TVB.
Ils existent différentes méthodes pour établir l'identification des réservoirs de biodiversité :

- Les zonages d'inventaires, réglementaires, de gestion ou de préservation.
- La présence de certaines espèces ou habitats
- La qualité des milieux avec deux méthodes : la perméabilité des milieux (la circulation des espèces) ou une analyse multicritère (sur les facteurs de qualité, capacité et fonctionnalité des milieux).

L'identification des corridors est un élément tout aussi important à déterminer pour la mise en place des TVB. L'identification est réalisée par une combinaison d'approche, soit :

- Par l'analyse des continuités : « Interprétation visuelle, Dilatation-Erosion ou Perméabilité des milieux »
- Par l'analyse des conflits notamment des zones de conflits avec les éléments de fragmentation des milieux
- Par expertise : avec la collaboration des experts sur les espèces et/ou le terrain d'étude.

L'implication de la trame verte et bleue aux différentes échelles administratives françaises

La Loi n°2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement (dite Grenelle 1) instaure dans le droit français la création de la trame verte et bleue, comme outil d'aménagement du territoire destiné à enrayer la perte de biodiversité. Sa constitution, d'ici à 2012, implique l'État, les collectivités territoriales et toutes les parties concernées quelle que soit l'échelle d'intervention. La Loi n°2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement (dite Grenelle 2) précise ce projet parmi un ensemble de mesures destinées à préserver la diversité du vivant.

Les Trames Vertes et Bleues s'intègrent à l'ensemble des documents d'aménagement du territoire déjà existants comme le réseau écologique paneuropéen, le schéma national de cohérence écologique et sa déclinaison régionale, le schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE), ainsi que les schémas de cohérence territoriale (SCoT), les plans locaux d'urbanisme (PLU) et les cartes communales. De plus, à l'échelle régionale, un nouveau schéma fait son apparition suite aux lois Grenelle, il s'agit du Schéma Régionale de Cohérence Ecologique.
La trame verte et bleue a donc des objectifs de suivi des réseaux écologiques à plusieurs échelles. Les orientations à l'échelle nationale sont apportées par le Muséum Nationale d'Histoire Naturelle (MNHN), ces orientations sont au nombre de trois afin d'assurer la cohérence du Schéma National de Cohérence Ecologique (SNCE) : (1) une identification des continuités écologiques, (2) une remise en état des continuités écologiques et (3) l'identification des enjeux nationaux et transfrontaliers.

A l'échelle de la région, Les Schémas Régionaux de Cohérence Ecologique (SRCE) sont obligatoires suite aux lois Grenelle de l'environnement à l'heure actuelle dix régions ont fait valider leurs SRCE. Dans un SRCE, une cohérence entre les échelles doit être assurée. Il doit donc assurer une cohérence avec les différents documents d'urbanisme de types SCoT, PLU et cartes communales tout en

assurant les continuités écologiques avec les régions limitrophes (MEDDE, 2013). La région au travers ce schéma doit être en mesure d'identifier les réservoirs de biodiversités et de préserver voir remettre en état les continuités écologiques. Afin d'obtenir la validation de son SRCE la région doit fournir aux autorités compétentes : un plan d'action stratégique qui reprend les éléments cités précédemment, un atlas cartographique et de mettre en place un dispositif de suivi et d'évaluation.

Au niveau « local », c'est-à-dire à l'échelle intercommunale ou communale. Les documents d'urbanismes caractéristiques de ces échelles le SCoT et le PLU doivent prendre en compte les recommandations apportées par le SCRE afin de maintenir la cohérence des réseaux écologiques entre les intercommunalités. L'identification des besoins spécifiques à la zone d'étude afin d'analyser plus finement les éléments paysagers doivent être permis à la lecture de ces documents. Le SCoT a lui un double objectif, en effet la construction des réseaux écologiques nécessite de maîtriser le développement urbain et dans un même temps préserver les espaces naturels (Belmont, Etienne et Bordas, 2010). Quant au PLU, il utilise la maille (l'échelle parcellaire) la plus fine du point de vue administratif pour déterminer ces réseaux écologiques. En outre, il définit les règles d'utilisation de l'usage du sol et les éléments constituant de la TVB.

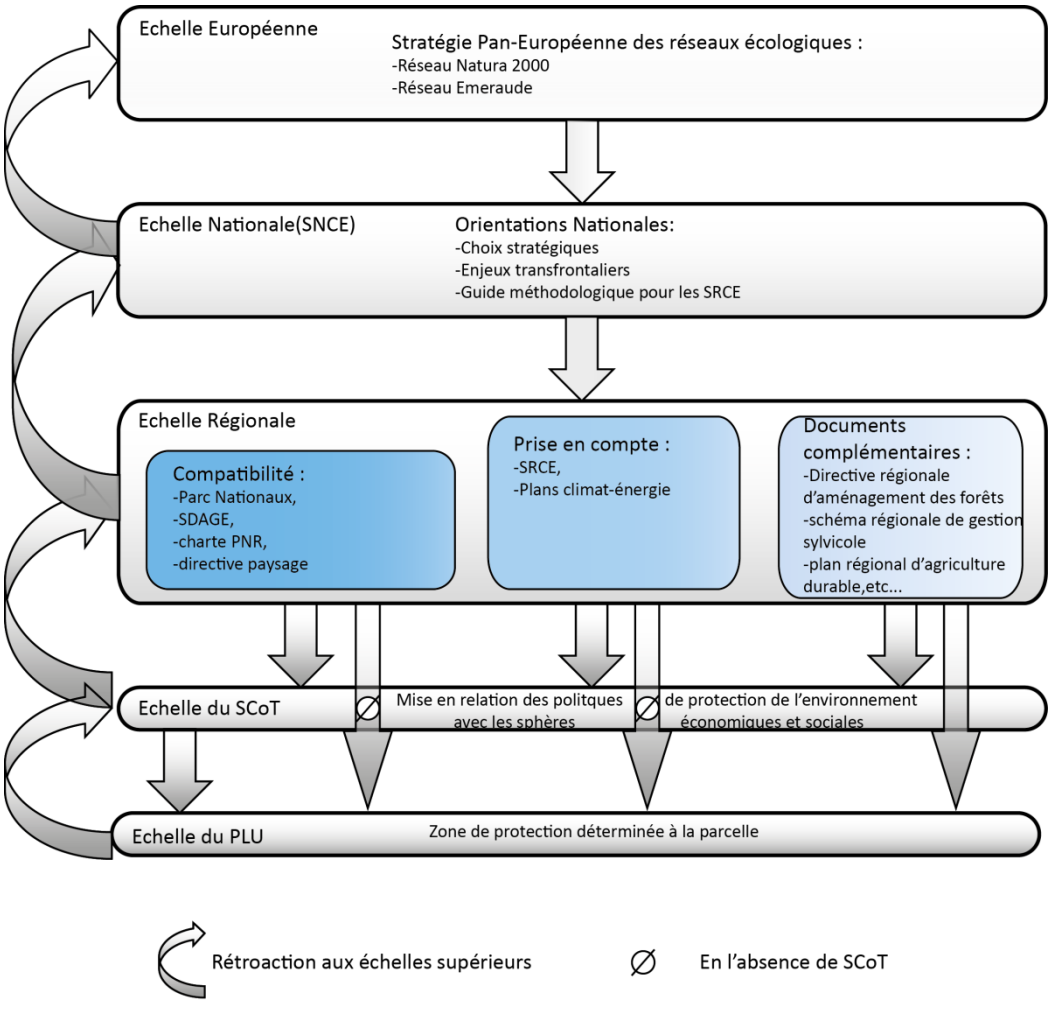


Figure 4 Articulation des échelles à la mise en place des réseaux écologiques : de la stratégie pan-européenne aux documents d'urbanisme

Conclusion

Le concept de réseau écologique apparaît comme un élément moteur pour la protection de la biodiversité et de l'environnement. L'utilisation des réseaux écologiques dans l'aménagement du territoire est devenue une pratique courante, en effet la loi Grenelle en France a largement contribué à la normalisation de cette démarche. En revanche, le manque de méthodologie commune entre les différentes échelles du territoire et la multiplicité des approches proposées peuvent engendrer des complications quant à la mise en œuvre de ces réseaux. La modélisation des réseaux écologiques requiert une réflexion importante en amont notamment sur le choix de l'espèce à modéliser en tenant compte des problèmes liés aux différentes échelles de temps et d'espaces. La représentation de ces réseaux écologiques peut s'avérer compliquée selon la méthode choisie l'acquisition et le traitement des données peut s'avérer délicat. A l'heure actuelle, la solution proposée par les réseaux écologiques semble acquise mais l'analyse de la connectivité par les graphes n'est pas encore utilisée dans les municipalités ou les agences d'urbanisme (Bergsten et al., 2013).

1.4 - La modélisation des réseaux écologiques

1.4.1 L'intérêt de la modélisation par les graphes paysagers

La modélisation des réseaux écologiques fondées sur la théorie des graphes issue des travaux scientifiques notamment ceux de Urban et Keitt (2001) ont permis l'analyse de la connectivité paysagère. La modélisation des graphes paysagers associe la représentation des taches d'habitats à des nœuds et les déplacements potentiels des espèces à des liens. La modélisation établit la relation existante entre la théorie des graphes et la possibilité de modéliser les réseaux écologiques et d'analyser la connectivité paysagère. La théorie des graphes semble un compromis très intéressant en terme d'exigence de données en entrée relativement faible et la pertinence et l'efficacité de celle-ci par rapport à la réalité qu'il représente (Calabrese et Fagan, 2004). De plus, Dale et Fortain (2010) préconisent l'utilisation des graphes pour l'analyse des réseaux écologiques à l'échelle régionale. En effet, Les graphes paysagers permettent au travers de la modélisation une analyse spatiale et multi-échelle. L'autre aspect intéressant de la construction du graphe paysager pour les réseaux écologiques est la possibilité d'utiliser plusieurs métriques de connectivité, qu'elles soient issues de la théorie des graphes ou adaptées pour définir les réseaux écologiques (Rayfield et al. 2011). L'origine et la méthode de construction des graphes paysagers seront détaillées lors de la présentation de la méthodologie mise en place dans le cadre de l'utilisation des graphes paysagers pour l'identification des composantes des réseaux écologiques.

L'application de la théorie des graphes aux réseaux écologiques permet une évaluation rapide aux différentes échelles du paysage (Urban et Keitt, 2001). Les graphes peuvent notamment servir à résoudre des problèmes liés à l'analyse des réseaux, avec l'analyse de la connectivité ou du plus court chemin (Loro et al., 2015). Les graphes paysagers à travers l'utilisation de métrique de connectivité ont été évalués notamment par (Pascual-Hortal & Saura, 2006; Saura & Pascual-Hortal, 2007). Le faible coût de mise en place des graphes paysagers permet de multiplier les scénarii. Les graphes permettent de réaliser des calculs de connectivité interne. L'utilisation de Delta métrique permet de déterminer l'importance d'un patch par rapport à l'ensemble du réseau (Saura & Pascual-Hortal, 2011). Les graphes paysagers ont également prouvé leur intérêt dans les études d'impacts

(Girardet, 2013), ces études ont permis de caractériser les problèmes de connectivité liés à la fragmentation et à l'effet barrière dus aux aménagements d'axes de transports Gurrutxaga et al. (2011).
En outre, la théorie des graphes appliquée au concept des réseaux écologiques peut être considérée comme efficace pour la planification bien qu'elle reste peu utilisée pour le moment. (Bergsten et al., 2013). En effet, malgré la validité scientifique des graphes paysagers et leurs valeurs avérées pour l'identification de réseaux écologiques ou d'études d'impact, la question de leur appropriation par les acteurs territoriaux reste en suspens. Ces acteurs tels que les différents services de l'état, les agences d'urbanisme ou cabinets d'études privées n'ont pas encore acquis les concepts et les idées avancés à la théorie des graphes pour l'identification des réseaux écologiques. Des démarches de visibilité doivent être organisées pour promouvoir l'utilité dans ses différents services. Le développement des outils liés à la modélisation par les graphes paysagers doit s'appuyer sur un accompagnement pour les acteurs utilisant ces méthodes. Des efforts doivent être faits pour faciliter la compréhension méthodologique liée aux graphes.

1.4.2 – L'apport des graphes paysagers pour les réseaux écologiques : une aide à la gestion des TVB

Jusqu'à maintenant ont été présentés les différents concepts et notions clés pour la mise en place des réseaux écologiques. Dans les travaux réalisés, la production du document issu de la mise en place des TVB aux différentes échelles du territoire crée un emboîtement des documents ne permettant pas toujours d'identifier clairement les enjeux liés à la TVB. Il semble pertinent d'utiliser les graphes paysagers pour déterminer les grandes composantes des réseaux écologiques. En effet, l'absence d'une méthode commune pour l'identification des réservoirs de biodiversité et des corridors écologiques entraîne des incohérences lors de la mise en place des TVB. Ce manque de cohérence est essentiellement visible lors d'applications d'idées mises en place aux échelles nationales ou régionales et apparaît difficilement réalisable à l'échelle locale. L'application de la méthode des graphes paysagers pour l'identification des TVB semble pertinente et simple à la réalisation. La modélisation est réalisable à l'ensemble des échelles du territoire à condition de prendre des espèces adaptées au terrain d'étude. La modélisation par les graphes doit se confronter à l'expertise de terrain et doit servir d'outil d'aider à la décision pour les acteurs territoriaux afin d'intégrer les résultats obtenus dans l'évaluation des TVB. De plus, l'application de méthodes quantitatives liées à l'utilisation de calcul de métrique de connectivité permet de comparer les résultats acquis avec d'éventuels résultats de terrain. Actuellement, le manque de méthode permettant d'analyser quantitativement la connectivité place les graphes paysagers comme l'une des solutions, les plus appropriées pour établir un lien entre le monde opérationnel et le monde scientifique dans la gestion et l'évaluation des TVB. La modélisation des réseaux écologiques par les graphes paysagers est donc un nouvel élément important à intégrer dans la création des TVB.

A l'heure actuelle certaines méthodes d'identification des réservoirs de biodiversité et de corridors écologiques sont plus plébiscitées. C'est notamment le cas des approches multicritères. En effet, les sélections des éléments composant les réseaux écologiques s'effectuent sur le choix d'indicateurs tel que l'indice de naturalité, d'hétérogénéité, de surface, de compacité des éléments paysagers ou bien sur des indices de distances aux éléments naturels ou aux perturbations anthropiques pour déterminer les zones, les plus favorables à la biodiversité. Ces différents indicateurs ont été

employés dans le cadre de SRCE (Poitou-Charentes, Auvergne, etc..) mais aussi dans des projets de recherche (Silvia et Ferriti, 2013). Ces approches apparaissent satisfaisantes, mais elles sont lourdes à mettre en place et difficilement reproductibles. D'une part, il n'est pas aisé de reproduire les démarches mises en place puisque chaque étude mobilise des indicateurs différents et des méthodes d'analyses tout aussi variées pour déterminer les réservoirs de biodiversité ou les corridors écologiques. D'autre part, l'acquisition et la précision des données issues des critères précédemment sélectionnées est variable selon les échelles d'analyses dans ces conditions, il est difficile d'avoir une approche multi-échelle. Les objectifs sont de démontrer l'intérêt des graphes paysagers et l'intérêt d'une approche multi-échelle pour les graphes paysagers afin de proposer des scénarii pour la création de trame verte et bleue à l'échelle régionale et intercommunale.

Le travail présenté ici cherche à établir différents scénarii afin de déterminer l'influence de critère lors de la modélisation par les graphes paysagers. L'étude se compose de cinq scénarii : (1) une première approche référence privilégiée au sein du laboratoire Théma. Il s'agit de prendre en compte l'ensemble des taches d'habitats défini par une approche espèce (fonctionnelle) ou habitat (structurelle). Ces approches définissent les éléments du graphe pour la 1^{ere} par le mode de vie et les préférences paysagères de l'espèce cible considérée, le but est de représenter au mieux la connectivité fonctionnelle des graphes en intégrant les données espèces afin d'établir les déplacements de l'espèce cible. Pour la 2nd est réalisé par l'identification d'un type de milieu (ex : forestier) sans tenir compte d'une espèce précise, l'objectif est de prendre au mieux les considérations de la gestion opérationnelle du paysage et de proposer des résultats nécessitant seulement des données sur le paysage. (2) la démarche suivante test une approche selon les périmètres de protection, où le but est de déterminer les taches d'habitats en fonction des zones déjà protégées. (3) la dernière démarche est l'ajout successif de critère restrictif. Cette démarche multicritère doit permettre de comprendre et d'analyser, l'importance du choix des critères pour la modélisation des taches d'habitats. L'ajout de critère à la création des graphes paysagers est une nouvelle démarche proposée pour l'identification des réservoirs de biodiversité des TVB.
Un autre élément issu de la modélisation des réseaux écologiques doit être identifié afin de permettre les relations des espèces. La modélisation de corridors par le chemin de moindre coût est le dernier aspect des réseaux écologiques analysés. L'objectif est de proposer une modélisation cohérente des réseaux écologiques représentés par l'approche TVB.

2 – Méthodologie : Contextualisation et présentation de la démarche

2.1. Les terrains d'études

La réalisation de TVB oblige à prendre en compte plusieurs échelles spatiales et temporelles. En effet, les lois Grenelle imposent la mise en place des TVB au sein des différents documents d'urbanisme SRCE et SCoT représentant respectivement la région Franc-Comtoise et les communes du SCoT Bisontin. Pour cadrer l'analyse, deux échelles spatiales ont été identifiées. Il s'agit de la région Franche-Comté et du SCoT Bisontin. La fragmentation des territoires a amené à prendre en considération les besoins d'analyse de la connectivité dans la région.

2.1.1 Deux échelles d'études

La Franche-Comté

Cette région se situe à l'est de la France composent en quatre départements: le Doubs, la Haute-Saône, le Jura et le Territoire de Belfort pour une superficie de 16 202 km². Elle se caractérise aussi comme un carrefour européen puisqu'elle établit la relation Nord-Sud par le fossé Rhénan et la vallée du Rhône. La région se structure autour de la capitale régionale Besançon et de la conurbation Belfort-Montbéliard-Audincourt. Ces deux ensembles urbains représentent les moteurs économiques et culturels de la région. D'autres ensembles de taille moyenne pour la région structurent également l'espace régional, les aires urbaines de Dole, Lons-Le-Saunier, Pontarlier et Vesoul. Leur emprise territoriale a progressé de 27 % entre 1999 et 2010, a testant de la périurbanisation. Ce chiffre est corroboré par l'augmentation de la population dans les espaces péri-urbains avec une progression de 26% de population dans les couronnes des grands pôles (SRADDT, 2013). La périurbanisation autour de ces grands pôles est donc un fait avéré contribuant au morcellement des écosystèmes.

Autour des deux pôles urbains les plus importants (Besançon et Belfort-Montbéliard), la Franche-Comté demeure à dominante rurale (Figure 5). La Franche-Comté est également marquée par son relief, le massif Jurassien d'une part et le massif Vosgien de l'autre. Le premier se compose d'une série de plateau karstique démarrant leur ascension depuis les vallées du Doubs et de l'Ognon terminant leur ascension à la frontière avec la Suisse. Le second relief constitue la limite Nord de la région et se caractérise par une forêt abondante, une plaine agricole à l'Ouest du massif (Figure 6). D'autre part, la Franche-Comté possède le 2nd taux de boisement en France avec un peu plus de 43% de la région sous couvert forestier. La forêt joue donc un rôle prédominant dans les paysages francs-comtois.

L'espace agricole franc-comtois se caractérise par une part importante de prairie, près de 70% de la surface agricole utile (SAU). Ces prairies se trouvent essentiellement à l'Est de la région plus précisément au niveau du Second Plateau et du Jura Plissé. La part importante de prairie et les conditions géographiques de la région favorisent l'élevage extensif. La filière laitière est la première à exploiter cette situation, elle contribue à conserver et entretenir les paysages ruraux de Franche-Comté. De plus, 28% de la SAU comtoise est utilisé pour la culture située entre les plateaux calcaires

de Haute-Saône et dans la plaine du même nom. En revanche, la région est confrontée à des problèmes de fragmentation notamment liés aux processus de périurbanisations autour des grands pôles régionaux, à la présence d'infrastructures de transports et aux pratiques agricoles intensives. Cette fragmentation a atteint les massifs forestiers, notamment par la construction d'infrastructures de transport. Elles viennent perturber les écosystèmes et impactent les corridors utilisés par la faune, dont certains peuvent être primordiale pour le maintien de la biodiversité (forêts de Chailluz, de Chaux…). Au contraire, certains massifs forestiers du Jura et des Vosges Saônoise sont nettement moins perturbé par ces éléments fragmentant.

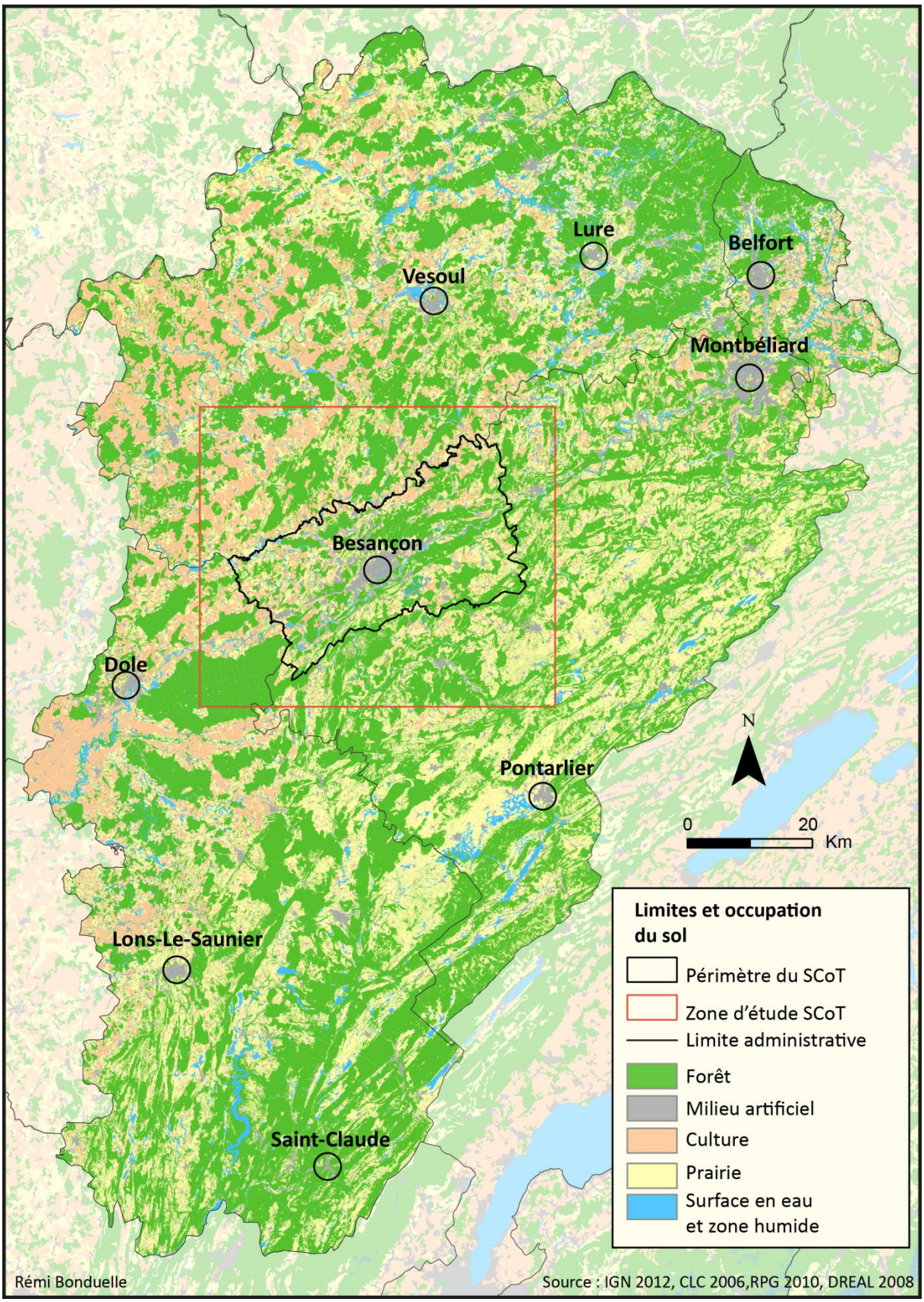


Figure 5 Occupation du sol en Franche-Comté

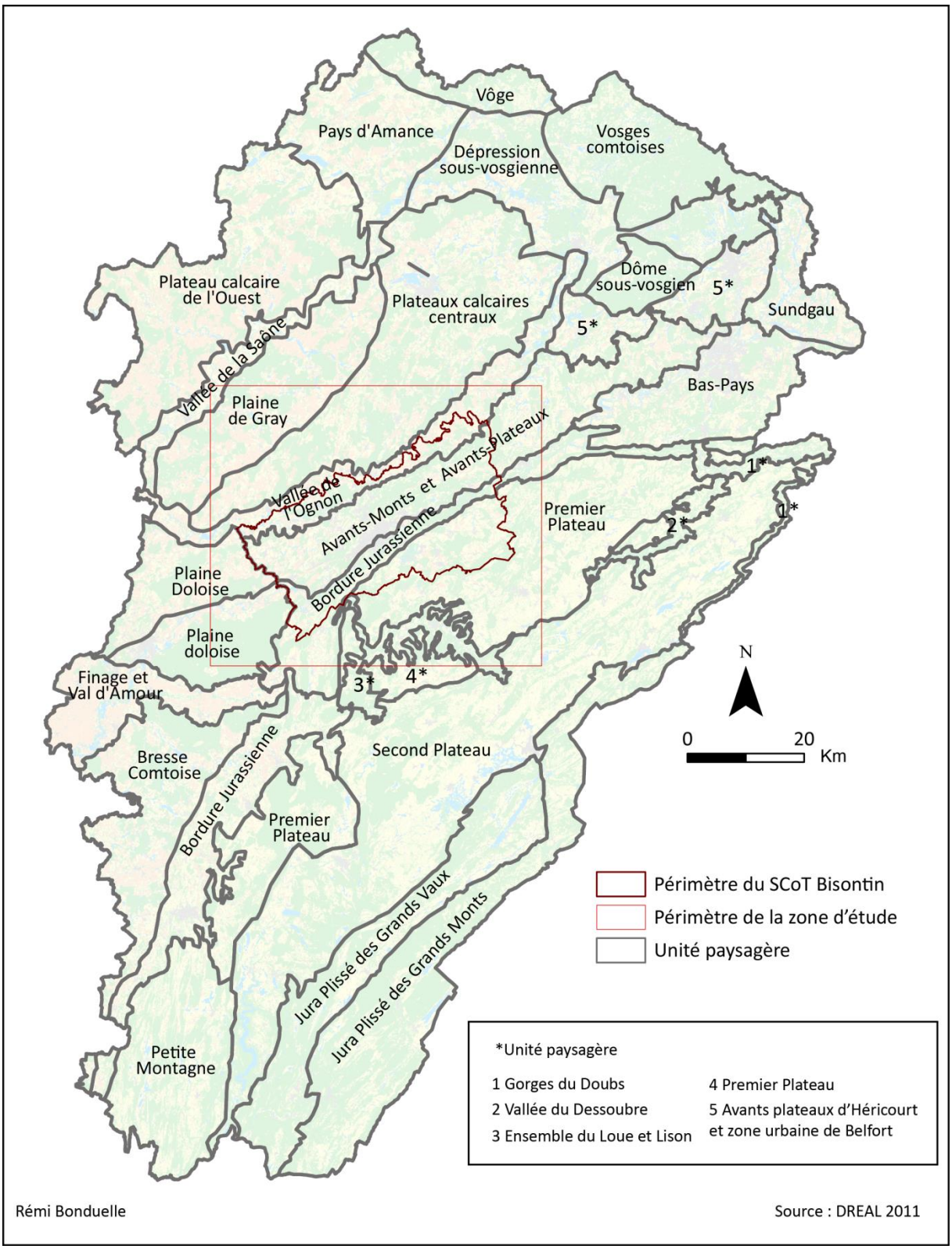


Figure 6 Principales unités paysagères en Franche-Comté

Le périmètre du SCoT Bisontin

Le SCoT fait partie intégrante de la région Franche-Comté (Figure 7), il représente un peu plus de 5% du territoire régional. Le SCoT se situe dans le département du Doubs, il est constitué de cinq communautés de communes : la Communauté d'agglomération du Grand Besançon (CAGB), la Communauté de communes Dame Blanche Bussière (CCDBB), la Communauté de communes de Vaîte-Aigremont (CCVA), la Communauté de communes du Val Marnaysien (CCVM) et la Communauté de communes du Val Saint-Vitois (CCVSV). A l'échelle du SCoT, Besançon fait figure de géant, la capitale régionale représente environ 117.000 habitants sur les 203.000 pour l'ensemble du SCoT. Le reste de la population est dispersé dans le reste des SCoT : 124 communes sur les 133 ne dépassent pas les 1000 habitants, l'espace du SCoT apparaît comme essentiellement rural.

Le SCoT de l'agglomération bisontine est caractérisé par quatre entités paysagères distinctes (Atlas des paysages de Franche-Comté, 2000) :

- la « vallée de l'Ognon », dont le tracé se situe entre les Avant-Monts et les plateaux calcaires de la Haute Saône. Cette vallée est essentiellement tournée vers l'agriculture des céréales. Cependant, la zone reste sous-influence de l'agglomération bisontine entraînant des conséquences en matière d'urbanisation sur le paysage de la vallée de l'Ognon.
- Les « Avant-Monts », possèdent une structure de relief plissé avec des zones de fortes pentes favorables à une végétation de type forêt (forêt de Chailluz) au Nord-Ouest du SCoT. En revanche lorsque l'on se dirige vers le Sud-Est du SCoT, un morcellement des forêts est constaté. Ce découpage est en partie dû à la polyculture et aux espaces prairial présents dans la zone.
- la « Bordure Jurassienne », cette entité est une passerelle vers le « Premier Plateau ». Elle est caractérisée par une série d'anticlinaux et de synclinaux appelée « le faisceau Bisontin ». La ville de Besançon a poursuivi son développement adossé à cette bordure Jurassienne provoquant un étalement urbain largement dirigé vers les Avant-Monts.
- le « Premier Plateau » est la dernière entité paysagère du SCoT présente un relief plutôt plat situé entre 400 et 500 mètres d'altitude, cette entité paysagère possède une empreinte rurale forte. Le réseau hydrographique présent dans ce relief est essentiellement composé d'étangs. Leur origine est due à la composition du sol karstique du premier plateau. Ce premier plateau est constitué en grande partie de forêts et de terrains cultivés.

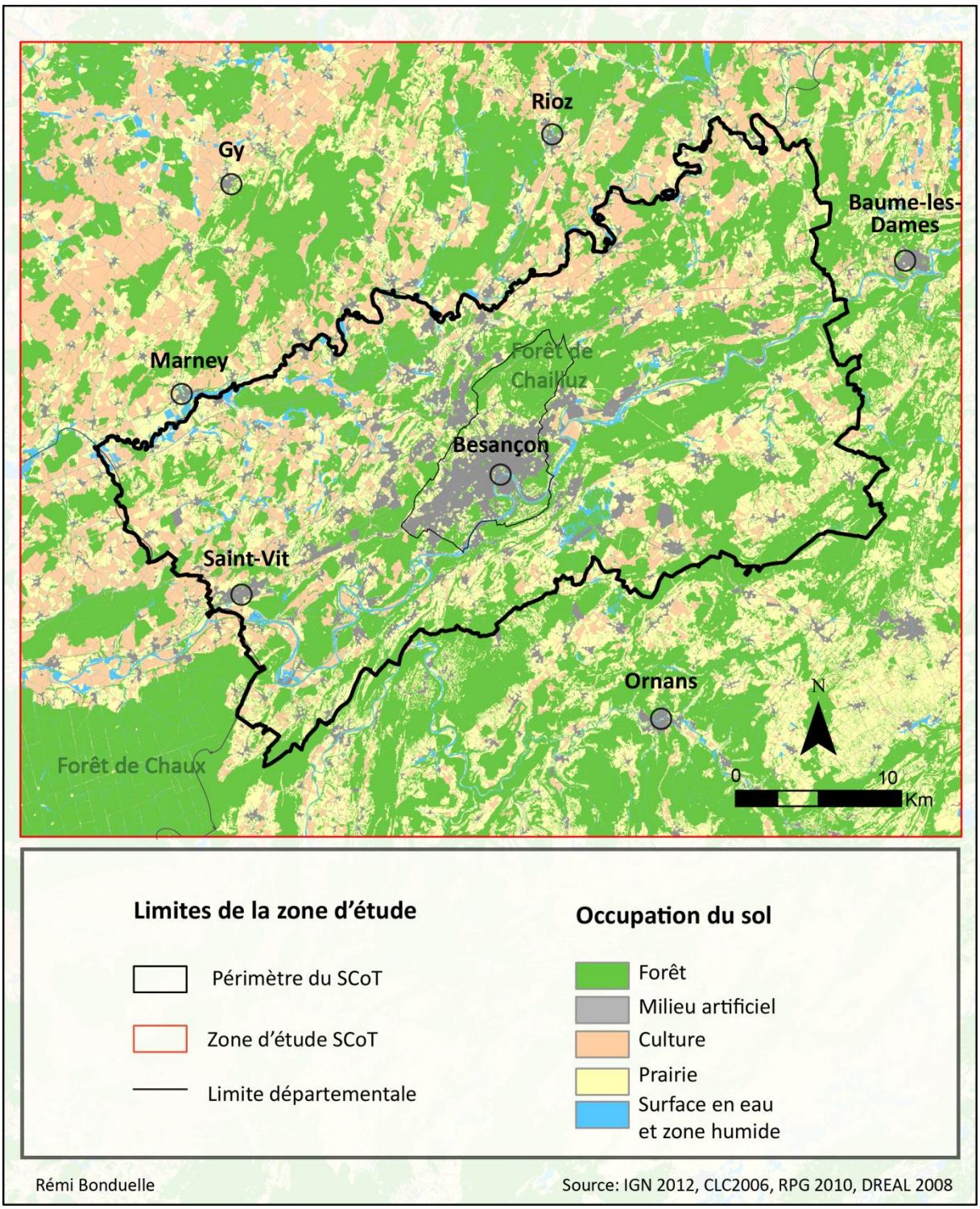


Figure 7 Occupation du sol dans la zone d'étude du SCoT Bisontin

2.1.2 Un carrefour écologique

Le massif forestier du Jura est un relais essentiel entre le massif Vosgien et celui de la Forêt Noire au Nord et avec les massifs alpins au sud. Il est important pour la région de préserver les liens écologiques entre ces différents domaines forestiers. Le SCoT Bisontin est soumis au même problème, en matière de protection de l'environnement, la zone d'étude choisie pour le SCoT dispose d'un vaste domaine forestier (Forêt de Chaux et Forêt de Chailluz). La Franche-Comté doit donc maintenir un système de protection afin d'assurer son rôle de carrefour écologique.
D'autres types d'habitats sont également présents en Franche-Comté comme le milieu herbacé, les milieux xériques. Ils ont été décrits lors de la mise en place du SRCE (2014). Les zones humides méritent également une attention particulière puisque les vallées du Doubs et de L'Ognon servent de corridors naturels aux déplacements des espèces migratrices et sont des points relais entre le Nord et le Sud de l'Europe. L'ensemble de ces habitats fait la richesse paysagère de la région.
Afin de protéger ces différents espaces, la Franche-Comté dispose d'un important dispositif de périmètre de protection issue des réglementations nationales et internationales. L'ensemble de ces zonages de protection représente près de 34% de la superficie régionale. Tous ces périmètres de protection n'ont pas la même valeur, certains offrent une protection complète limitant fortement toute intervention humaine ; tandis que d'autres offrent la possibilité d'aménagements concertés. La région se compose de 13 réserves naturelles nationales avec des objectives conservations importantes, de 2 parcs naturels régionaux (PNR) celui du Jura et des Vosges. L'objectif de ces zones est d'allier protection de l'environnement et dynamisme économique. De plus, les zones ZICO et ZNIEFF I et II sont également présentes à l'échelle du SCoT et de la Région Franche-Comté. Ces zones servent de base au réseau européen Natura 2000. Le but étant de dépasser les limites administratives des états car les espèces à protéger n'ont pas de frontières. C'est pourquoi, il est essentiel pour la région Franche-Comté de réfléchir aux enjeux transfrontaliers des réseaux écologiques.

En vue de la mise en cohérence du territoire Franc-Comtois, il apparaît nécessaire pour les acteurs du territoire de réfléchir aux politiques à mener afin d'établir une cohérence pour les réseaux écologiques entre les différentes échelles du territoire. À l'échelle locale et régionale, les cœurs de biodiversité sont déterminés par les périmètres de protection réglementaires de protection et les zonages d'inventaires. A l'heure actuelle, les outils mis à disposition des territoires français permettent d'intégrer les aspects multi-échelles liés à la TVB. En effet l'obligation de définir ces TVB à toutes les échelles administratives aide à la cohérence entre les échelles. Les connexions entre les documents d'urbanismes locaux (ScoT et PLU) et les documents régionaux (SRCE) se complètent afin de mettre en cohérence les réseaux écologiques identifiés. De plus, à l'échelle régionale, le fait de tenir compte des SRCE issus des régions limitrophes de la Franche-Comté permet de raisonner à une échelle supérieure et de garder une cohérence entre SRCE de régions voisines. Le souci de cohérence interrégionale, s'aligne parfaitement avec les recommandations européennes et participe aux réseaux écologiques pan-européens. L'objectif est d'aboutir à la création d'un réseau national avec le Schéma National de Cohérence Écologique (SNCE). Cependant, la Franche-Comté possède également une frontière avec un autre pays européen. La Suisse et son Réseau Ecologique Nationale (REN) doit être prise en compte afin d'assurer les connexions nécessaires entre les différentes sous-trames

communes identifiées par Berthoud et al. (2004). Il s'agit du milieu forestier, des prairies sèches et des zones agricoles extensives.

2.1.3 Un choix : La sous-trame forestière

La forêt Franc-Comtoise est vaste et possède un caractère naturel, qu'il faut préserver. La sous-trame forestière est identifiée par le MNHN comme l'une des sous-trames à protéger à l'échelle nationale. La Franche-Comté possède le 2ème taux de boisement en France, il est essentiel de déterminer les espaces à sauvegarder en priorité. Le milieu forestier est la source de beaucoup d'enjeux notamment pour la protection des réseaux écologiques mais pas seulement, la filière bois en Franche-Comté est à l'origine d'activités économiques et d'emplois.

La démarche TVB doit permettre l'identification de plusieurs sous-trames et la combinaison de ces sous-trames donnent naissance à la TVB. Dans le cadre de ce travail seul la sous-trame forestière a été prise en considération pour la modélisation par les graphes paysagers des réseaux écologiques. Les démarches suivantes sont déterminées par ce choix.

Etat du milieu forestier Franc-Comtois

La Franche-Comté se caractérise par une diversité de ses forêts essentiellement due aux reliefs. Les forêts de feuillus essentiellement présentes dans la partie collinéenne de la Franche-Comté et les forêts de résineux lorsque l'altitude s'élève près des massifs des Vosges et du Jura.
La gestion anthropique des forêts favorise le morcellement du milieu forestier, en effet 45% de la forêt comtoise appartient au domaine privé. En 2006, le Schéma Régionale de Gestion Sylvicole (SRGS) recense 160 000 propriétaires soit 1,7 ha de forêt par gestionnaire, ce morcellement tend à augmenter. Des plans sont mis en place afin de limiter ce parcellement des milieux forestiers. L'objectif est de permettre aux différents propriétaires de gérer au mieux leur parcelle forestière et de garder une cohérence écologique entre les différents espaces forestiers.
Les feuillus sont majoritaires en Franche-Comté, il représente près de 70% de l'ensemble du couvert forestier, essentiellement situé sur les pentes intermédiaires du massif du Jura et au niveau du premier plateau Jurassien. Ces massifs de feuillus sont localisés dans les plaines et les plateaux de faible altitude (étage collinéen). Les forêts de résineux représentent 30% du couvert forestier régional, ces forêts se trouvent à partir de 800 m d'altitude, situées dans le 2ème plateau jurassien, le Haut-Jura et les Vosges. La composition de la forêt du SCOT bisontin peut être considérée comme mixte (feuillus et résineux) se situant sur les avant-monts du massif du Jura. Il est composé de plus petits massifs forestiers, de bois et de bosquets.

Etat du milieu forestier du SCoT Bisontin

En 2013, le SCoT se compose d'environ 40% de forêts. Le territoire est dominé par les forêts de feuillus, ces forêts composent le SCoT à plus de 80%. Le relief et le climat jouent un rôle prépondérant dans la répartition des différents types de forêts. Cet étagement des forêts du au relief multiple les différentes essences forestières dans le SCoT et, par conséquent, favorisent la biodiversité du milieu forestier. L'évolution des pratiques agricoles et des modes de vie (périurbanisation) a fait diminuer la surface forestière dans le nord-ouest du SCoT. En revanche dans le reste du SCoT le domaine forestier a augmenté de 24 km², une augmentation de 6.8% entre les

années 1950 et 2000. L'agence d'urbanisme de Besançon (AudaB, 2011) met en évidence : les gains observés pour le domaine forestier sont essentiellement dus à l'évolution des lisières agricoles tandis que les grands massifs forestiers de la Dame Blanche, de la forêt de Chailluz, etc… ont peu évolué. Le SCoT bénéficie d'un avantage important pour la gestion de ses forêts, car 71% des forêts sont administrées par les différentes collectivités compris dans le SCoT. L'Organisme National des Forêts (ONF) est en charge de ces forêts, la gestion par les organismes publics des forêts permet d'aménager et de protéger les milieux forestiers. (DRAAF, 2006)

Dynamiques de gestion des milieux forestiers

La forêt apparaît en Franche-Comté comme un milieu à enjeux. Même si les démarches semblent concertées et œuvrent vers une meilleure gestion du domaine forestier, il n'en demeure pas moins qu'une combinaison des intérêts écologiques et économiques reste difficile. En effet, la conciliation des attentes et des besoins selon les acteurs territoriaux rend complexe le fait de maintenir une activité économique fiable et de préserver dans le même temps des espaces forestiers riches en biodiversité. L'homogénéisation des terrains forestiers entraîne un appauvrissement de la biodiversité, entraînant le risque de détruire des milieux fragiles essentiels à certaines espèces protégées. Cependant, les acteurs de cette filière reconnaissent l'intérêt d'avoir une gestion durable des domaines forestiers afin de pérenniser l'activité. De plus, la filière bois représente environ 12 500 salariés soient le 5ème employeur industriel de la région. La filière bois est subdivisée : la transformation de ce bois en bois de construction et ameublement sont les deux sous-filières, les plus importantes. À cela, il faut ajouter la filière bois-énergie. Cette filière fait l'objet d'une demande importante, en effet dans un contexte énergétique difficile, le prix du bois dans la région est moins élevé que les énergies fossiles. Le bois-énergie est considéré comme la 1ere source d'énergie renouvelable de la région (SRCAE, 2011). Les enjeux autour du bois sont donc multiples en Franche-Comté, les ressources issues des forêts sont un bien en terme économique, mais ce bien doit être protégé. Plusieurs périmètres de protection ont été mis en place afin de protéger le milieu forestier et ses ressources naturelles. Les forêts sont encadrées au niveau régional par les Orientations Régionales Forestières (ORF) déclinées selon les gestionnaires publics en Directives et Schémas Régionaux d' Aménagement pour la forêt domaniale, et pour les gestionnaires publics en Schémas Régionaux de Gestion Sylvicole. Pour rappel, la forêt est soumise au système de protection issu de la Directive Habitats, il est capital pour la région et le SCoT de protéger les différents espaces naturels et les paysages afin de maintenir la connectivité des milieux forestiers. Un nouveau périmètre de protection est apparu en 2009 spécifique au milieu forestier (Les forêts de protection). Ce système de protection s'intègre aux différents périmètres de protection déjà existants : réserves naturelles, réserves biologiques, les arrêtés de protection de biotopes, etc…

De plus, la présence du réseau Natura 2000 en forêt Franc-Comtoise permet de compléter l'ensemble des périmètres de protection de la biodiversité. L'intérêt pour les acteurs territoriaux de faire partie de ce réseau est la possibilité d'obtenir des financements par l'Union Européenne dans le cadre d'aménagement et de gestion durable des milieux forestiers.

Conclusion

La région Franche-Comté est caractérisée par un espace forestier parmi les plus importants de France. Les enjeux liés à ce milieu sont multiples : la gestion des activités humaines, la protection de la biodiversité et des ressources disponibles issues de la gestion du domaine forestier. L'hétérogénéité des paysages en Franche-Comté favorisent le développement de la faune et de la flore. Les différents milieux font de la Franche-Comté un territoire favorisant la connectivité des espaces, sa place centrale en Europe fait de la région comtoise un élément essentiel des réseaux écologiques. Ces réseaux doivent protéger aussi bien les réservoirs de biodiversité que les corridors écologiques. C'est pourquoi, à l'échelle régionale et du SCoT Bisontin, la création d'une réflexion sur les réseaux écologiques à travers la mise en place des TVB est essentielle dans le maintien et la protection de la biodiversité et de la connectivité des réseaux.

2.2 – Les données d'occupation du sol

La construction d'une carte d'occupation du sol correspond au fondement des analyses en écologie du paysage. Cette carte d'occupation du sol a été réalisée en amont par le laboratoire Théma. Les bases de données cartographiques nécessaires à la réalisation de cette carte d'occupation du sol sont les données fournies par l'institut géographique national (IGN), la base Zones Humides (DREAL Franche-Comté) et le registre parcellaire graphique disponible par départements auprès de l'Agence de Services et de Paiements (ASP).

Les données fournies par l'IGN sont facilement accessibles par les collectivités territoriales ou par les laboratoires de recherches, la projection utilisée est le Lambert 93. Cette donnée est disponible aux mètres, cependant elle n'identifie pas les espaces agricoles.

L'utilisation de registre parcellaire graphique permet de pallier à ce manque malheureusement le RPG ne fournit pas l'ensemble des terrains agricoles, en effet cette source de données comporte un biais : seul les agriculteurs déclarant leur parcelle à la PAC sont intégrés lors de la numérisation de ces données.

La DREAL Franche-Comté est le dernier acteur à fournir des données. La DREAL à partir de relevés de terrain a constitué une base de données regroupant les informations sur les différents types de « zones humides » présentes dans la région (tourbières, mares et cultures humides).

Les grandes étapes pour la réalisation de la carte du paysage

La conversion au format raster des données acquises précédemment est la première étape de la création de la carte du paysage. La réalisation de la mosaïque paysagère permet de sélectionner les différents types d'habitats. Des coûts sont attribués à l'ensemble de cette mosaïque permettant par la suite de définir les valeurs pour chaque pixel de la carte. La résolution définie lors de la création des différents projets est 10 mètres, cela correspond à la précision des données fournies en entrée. Cette résolution est idéale pour réaliser les différentes manipulations à l'échelle régionale, car elle permet un degré de précision important tout en limitant les temps de calcul trop longs pour la suite des manipulations. La deuxième étape exige la hiérarchisation des différents rasters d'occupation du

sol lors de la création de la mosaïque paysagère sous Arcgis 10.1 (ESRI, 2012). Cette hiérarchisation s'effectue en fonction de l'espèce choisie pour la réalisation des graphes paysagers. En effet, chaque groupe d'espèces ne perçoit pas l'occupation du sol de la même manière, une barrière pour l'un peut s'avérer un habitat pour l'autre. L'objectif de la modélisation est de tenir compte des coûts attribués aux classes d'occupation du sol afin d'obtenir une carte du paysager, la plus fonctionnelle pour l'espèce étudiée. Certains éléments de l'occupation du sol doivent être affinés, c'est notamment le cas des structures linéaires. Différentes méthodes ont été utilisées par le laboratoire ThéMA afin d'obtenir une carte du paysage, la plus « juste » possible.[7]

Conclusion

La double échelle d'étude région plus SCoT Bisontin n'est pas un problème lors de la création de la carte du paysage, il suffit de choisir le périmètre souhaité à l'intérieur des frontières régionales. L'accessibilité et la fiabilité des données déjà réalisées par le laboratoire ThéMA ont permis d'accélérer grandement les étapes du travail.

2.3 - Identification d'un groupe d'espèce

L'objectif est l'identification des réservoirs de biodiversité et des corridors écologiques en se fondant sur une approche profil d'espèce, la biologie des espèces a été prise en compte : la taille du domaine vital et la distance de dispersion. Les espèces choisies pour mettre en place cette démarche sont en accord avec la sous-trame traitée puisqu'il s'agit de l'écureuil roux (Sciurus Vulgaris), la martre (Martes Martes) et le chat sauvage (Felix Silvestris).

Ces mammifères ont été sélectionnés en fonction de leurs caractéristiques :

- Leur habitat : toutes ces espèces font partie exclusivement du domaine forestier,
- Prise en compte de leurs différentes aptitudes et besoins en matière de domaine vital et de distance de dispersion des juvéniles.
- Ces espèces sont toutes inscrites sur la liste de protection de l'IUCN.
- Avoir des données cohérentes sur les deux échelles d'études SCoT Bisontin et région Franche-Comté.

Techniquement : L'objectif est aussi de limiter le temps de calcul nécessaire à la construction des graphes notamment à l'échelle Franc-Comtoise, il est donc nécessaire de réfléchir aux valeurs attribuées en entrée du modèle. Il faut être le plus précis possible pour déterminer les réservoirs de biodiversité, mais aussi permettre la reproductibilité de la méthode en limitant ces mêmes valeurs afin de veiller à la réussite des différentes étapes de création des graphes.

[7] Pour plus de détails sur la méthode d'assemblage de la carte d'occupation du sol consulter la thèse de Girardet (2013).

	Espèces réelles			Profil espèce		
Habitat	Espèce sélectionnée	DD moyen (km)	DV moyen (ha)	Désignation	DD (km)	DV (ha)
Sous-trame forestière	*Sciurus Vulgaris*	1.5	1	mammifère forestier	7	50
	Martes martes	7	50			
	Felix Silvestris	28	150			

DD= Distance de dispersion DV= Domaine vital

Tableau 1 Sélection des espèces

Les valeurs choisies pour les différentes espèces ont été obtenues : pour l'écureuil roux *(Sciurus Vulgaris) par* Wauters et al., (1994); Wauters Et al., (2010), pour la martre (*Martes martes*) par Zalewski et al., (2004), et pour le chat sauvage (*Felix Silvestris*) par les fiches espèces TVB de Sordello (2012).

2.4 – Modélisation des réseaux écologiques par les graphes paysagers

2.4.1 Constructions des graphes paysagers

La théorie des graphes est d'abord utilisée en mathématiques, c'est très récemment qu'elle est reprise en écologie du paysage (Urban et Keitt, 2001). La modélisation par les graphes paysagers permet de déterminer les réseaux écologiques et les flux potentiels entre les taches d'habitats grâce à l'utilisation de métriques paysagères. Les nœuds et liens sont la structure même d'un graphe paysager. Les nœuds sont la représentation des taches d'habitats d'une espèce ou d'un groupe d'espèces, et les liens sont les objets modélisant les relations fonctionnelles entre ces taches. Après avoir collecté les données nécessaires d'occupation du sol et les données biologiques liées à l'espèce sélectionnée : l'application dans l'outil Graphab est possible. Plusieurs étapes sont nécessaires : (1) définir les nœuds du graphe ; (2) définir la topologie du graphe ; (3) attribuer une pondération à la carte du paysage pour la construction du graphe (4) et seuiller les liens du graphe.

La première étape est l'utilisation de la carte d'occupation du sol réalisée précédemment à partir des données fournies par l'IGN, la DREAL et le RPG. Elle permet de faire le lien entre les différents modes d'occupation du sol et les données acquises sur l'espèce choisie. L'ordre de la superposition des différents modes d'occupation du sol lors de la création de la mosaïque paysagère est important, car il va constituer la carte du paysage de l'espèce. Dans Graphab, la sélection d'un mode d'occupation du sol comme tache d'habitat est obligatoire.

L'étape suivante correspond à la création d'un jeu de liens, une nouvelle série de choix doit être effectuée. Tout d'abord, la sélection de la topologie : les graphes peuvent être planaire, c'est-à-dire qu'ils peuvent être représentés dans un plan dont les arêtes ne se croisent pas. Ce type de graphe relie les taches les plus proches entre elles. La construction est réalisée à partir de taches délimitées par les polygones de Voronoï, il s'agit d'une simplification du graphe. Dans les projets Graphab réalisés, le choix s'est orienté vers ce type de typologie sa principale utilité est de simplifier le graphe et de diminuer de façon importante les temps de calcul pour la création du jeu de liens. De plus, il possède une certaine légitimité d'un point du vue écologique, la plupart des espèces se déplacent d'un milieu favorable à un autre.

L'autre possibilité est l'utilisation d'un graphe complet, le graphe complet relie toutes les taches entre elles deux à deux. Ce graphe modélise l'ensemble des chemins possibles entre les différentes taches d'habitat sélectionnées précédemment, mais en conséquence, les temps de calculs nécessaires à la modélisation du jeu de liens peuvent être très longs.

La pondération est le second élément à prendre en considération lors de la création du jeu de liens. Les liens représentent le chemin le plus court pour l'espèce représente entre les différentes taches d'habitats. Ce chemin le plus court peut-être déterminé par distance euclidienne, cela revient à considérer l'espace comme homogène, tous les éléments paysagers ont le même degré de résistance. En revanche, le paysage est hétérogène, alors il convient de privilégier la distance effective. Cette distance correspond aux chemins de moindre coût, les différents coûts attribués aux modes d'occupation du sol sont établis en fonction des caractéristiques de l'espèce sélectionnée.
Dans notre cas, les espèces sélectionnées sont exclusivement forestières. Les taches d'habitats font donc partie du domaine forestier, un coût de 1 est attribué à ce mode d'occupation du sol puisqu'il est identifié comme habitat de l'espèce cible.

Scénario	Espèce	Périmètre de protection	Multicritère 1	Multicritère 2	Multicritère 3
Mode d'occupation du sol	Valeurs attribuées				
LGV	10000	10000	10000	10000	10000
Autoroute	10000	10000	10000	10000	10000
Voie férrée	100	100	100	100	100
Route 1er	1000	1000	1000	1000	1000
Plan d'eau	100	100	100	100	100
Surface en eau	100	100	100	100	100
Petit hydro	100	100	100	100	100
Zone Artificialisée	1000	1000	1000	1000	1000
Perturbation anthropique	N/A	N/A	N/A	100	N/A
Perturbation route	N/A	N/A	100	N/A	N/A
Forêt non sélectionnée	N/A	N/A	N/A	N/A	1
Forêt protégée	N/A	1	N/A	N/A	N/A
Zone humide	100	100	100	100	100
Forêt	1	1	1	1	1
Route 2nd	100	100	100	100	100
Prairie	100	100	100	100	100
Culture	100	100	100	100	100
Sol-nu	100	100	100	100	100

N/A= Non attribuée

Tableau 2 Coûts attribués à l'occupation du sol

Après avoir créé un jeu de lien dans Graphab, le logiciel propose de réaliser le graphe. Différents types de graphes sont proposés : (1) L'arbre couvrant minimal (ACM) permet de relier toutes les taches en identifiant le parcours, le plus court. (2) le graphe non seuillé permet de relier toutes les taches entre elles quelle que soit la distance. (3) le graphe seuillé est utilisé lors de cette étude, il permet de retenir seulement les liens inférieurs ou égaux au seuil choisi.

Afin de définir le seuillage du graphe, les données espèces sont mobilisées, en effet l'utilisation de la distance de dispersion de l'espèce sélectionnée est utilisée pour définir la distance maximale de seuillage du graphe. Cependant, cette distance de dispersion doit être convertie en distance-coût, car le jeu de liens créé utilise les coûts donnés lors de la phase de pondération des liens.
La distance de dispersion identifiée ici est de 7 000 mètres, mais pour estimer cette distance en unités de coût une étape supplémentaire est nécessaire.
L'utilisation d'une régression linéaire est effectuée entre les valeurs de distances de tous les liens du graphe. Cependant, cette approche rend parfois approximative la valeur obtenue par la droite de régression. L'application de la fonction logarithme népérien aux deux axes permet de donner aux nuages une forme plus étendue et de préciser la valeur seuil obtenue lors du calcul de la droite de régression. Ensuite, il faut appliquer la fonction exponentielle au résultat précédent afin de déterminer la distance coût. Après avoir obtenu les différentes valeurs de seuillage pour tous les scénarii, le calcul de métriques de connectivité peut être envisagé.

Scénario	Distance de dispersion (m)	Distance - Coût
Espèce	7000	4500
Périmètre de protection		5500
Multicritère 1		6000
Multicritère 2		6500
Multicritère 3		6500

Tableau 3 Distance métrique convertie en unité de coût

Conclusion

Graphab permet de réaliser toutes les étapes à la réalisation des graphes paysagers. Graphab crée un réseau composé de nœuds et de liens en s'appuyant sur la modélisation issue de la théorie des graphes. Toutes les étapes nécessaires à la création d'un graphe doivent être étudiées au cas par cas en fonction de l'espèce analysée, car toutes les espaces n'entretiennent pas la même relation avec la structure paysagère. Dans le cas présent, les taches d'habitat ou nœuds du graphe ont été identifiés par le profil écologique d'une espèce : la surface minimum retenue est de 50ha, et une distance de dispersion de 7000 mètres. L'étape suivante est de définir les critères afin d'établir les différents scénarii à l'identification des taches d'habitats. Puis, il faudra utiliser les métriques de connectivité pour quantifier le rôle de chaque tache d'habitat au sein d'un réseau écologique.

2.4.2 La sélection des réservoirs selon différents types de critères

Les réservoirs sont l'une des trois composantes essentielles à la modélisation des réseaux écologiques. Les réservoirs constituent le cœur d'habitat pour l'espèce, l'endroit où elles peuvent réaliser leurs besoins primaires. L'identification de ces zones est le point de départ de la modélisation des réseaux écologiques. La surface minimum prise en compte dans les différents scénarii modélisant les réservoirs de biodiversité ou tache d'habitat est 50 hectares pour les deux échelles étudiées. De plus la méthodologie générale issue de l'approche Graphab est reprise pour les différents scénarii mis en œuvre. Cependant, des critères spécifiques ont été ajoutés à chaque scénario afin de déterminer l'importance de l'application de critères permettant la définition des taches d'habitats.

Scénario « espèces »

Il s'agit du scénario de référence : l'approche correspond aux procédés mis en place par l'outil Graphab et la démarche détaillée en 2.4. Pour rappel, les grandes étapes sont : la sélection du mode d'occupation du sol étant identifiée comme l'habitat de l'espèce concernée. Puis, l'attribution de coût à la carte paysagère, ces coûts sont déterminés en fonction des caractéristiques biologiques de l'espèce étudiée. Et enfin, la création du graphe seuillé fondé sur la distance de dispersion définie en unité de coût.

Scénario périmètres de protection

Ce scénario utilise les différents systèmes de protection à l'échelle des terrains d'études : La Franche-Comté et le SCoT. Les périmètres de protection ont été choisis en fonction du milieu qu'il protège ici les forêts. Puis deux types de périmètres de protection ont été identifiés pour ce scénario : Des périmètres avec des exigences « fortes » en termes de protection des espaces forestiers, il s'agit des arrêtés de protection de biotopes, les réserves naturelles nationales et régionales et les forêts de protection ont été prises dans leur intégralité. En revanche, des périmètres avec des exigences plus « faibles » ont été également identifiés cependant une étape supplémentaire a été nécessaire puisque ces périmètres ont été intersectés avec les zones forestières. Il s'agit des ZNIZFF de type I et les zones Natura 2000. Ces périmètres de protection sont facilement accessibles par la DREAL Franche-Comté ou par la base de données de l'Inventaire National du Patrimoine Naturel (INPN).

La définition d'un mode supplémentaire d'occupation du sol a été nécessaire afin de créer deux catégories de forêts : celles protégées par les différents périmètres de protection et les autres. Seules les forêts issues de la sélection par les périmètres de protection ont été identifiées comme habitats pour la construction du graphe paysager. Le reste de la démarche est similaire aux scénarii espèces à l'exception du calcul de seuillage du graphe.

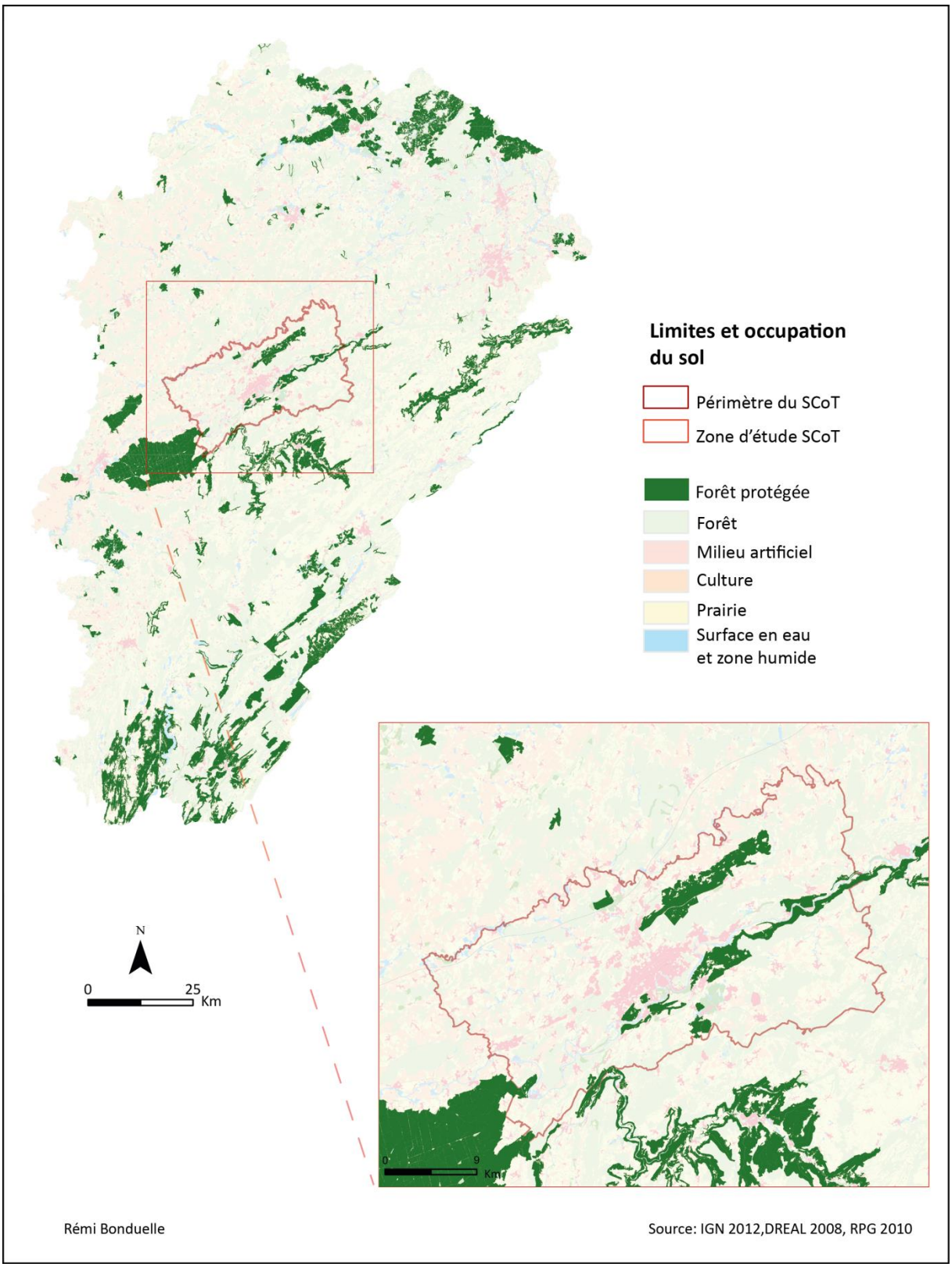


Figure 8 Taches d'habitats identifiées à partir des périmètres de protection aux échelles de la Franche-Comté et du SCoT Bisontin

Scénarii Multicritères

Les scénarii multicritères doivent permettre de comprendre et d'analyser les modifications de connectivité liées à la suppression de tache d'habitat. L'ajout de critère successif doit permettre l'identification des taches d'habitats les moins perturbées par les activités humaines et les plus favorisées d'un point de vue hydrographique. Ainsi pour l'espèce virtuelle, de nouvelles taches d'habitats ont été définies :

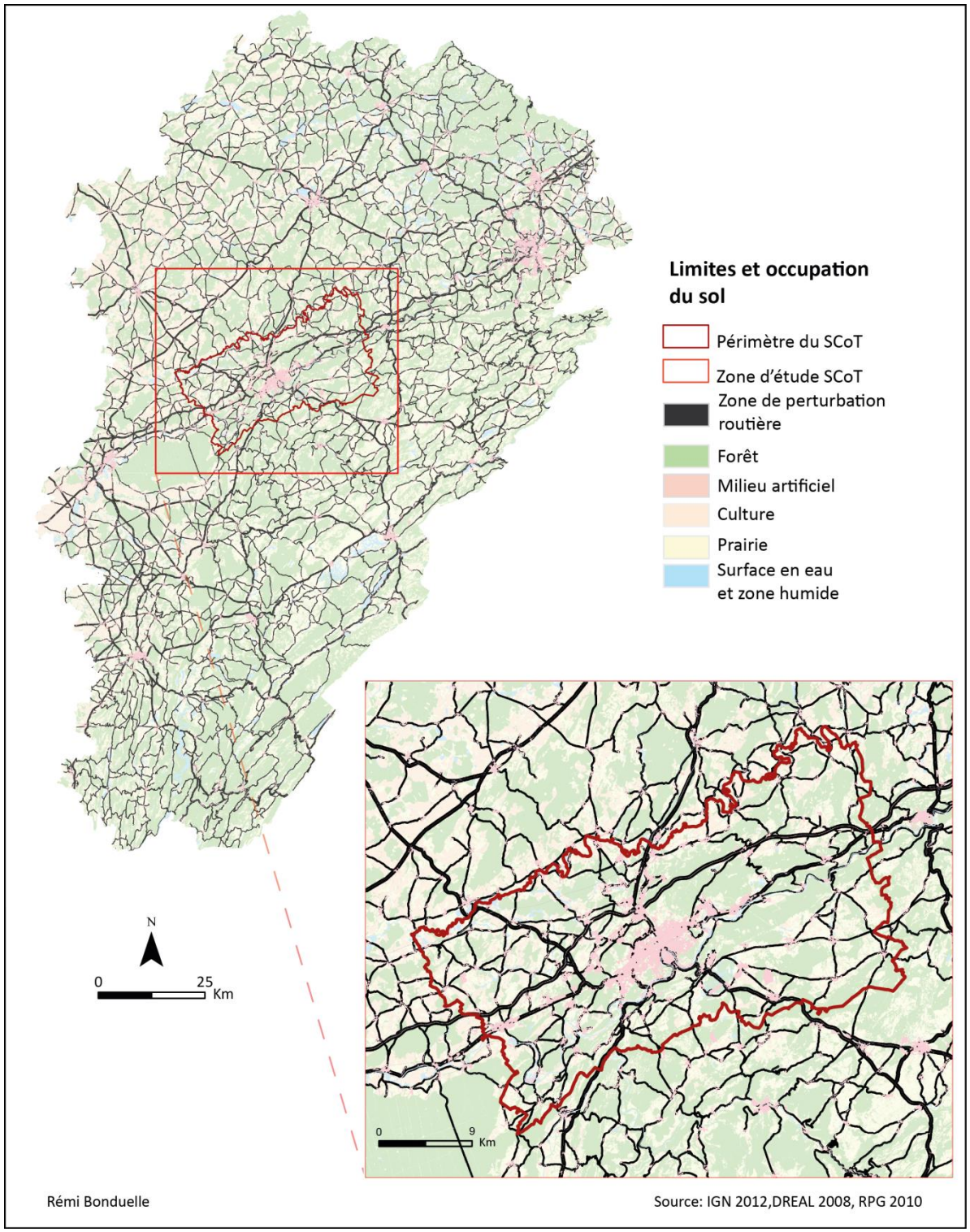


Figure 9 Critère de perturbation des routes aux échelles de la Franche-Comté et du SCoT Bisontin

Le premier scénario multicritère tient compte de la perturbation liée aux routes, les critères sélectionnés sont : une perturbation à 100 mètres pour les routes départementales et une perturbation à 200 mètres pour les routes nationales et les autoroutes.[8] La création d'un mode d'occupation du sol identifié comme zone de perturbation liée aux axes routiers a été ajoutée lors de la construction de la mosaïque paysagère pour ce scénario.

Le deuxième scénario correspond aux perturbations liées aux axes routiers, mais à cela a été ajouté un critère de perturbation des zones anthropiques. Toutes les zones urbanisées de plus de 1 000m²[9] ont été sélectionnées comme zones créant des perturbations pour les espèces identifiées. La démarche utilisée est la même que dans le 1er scénario multicritère, un mode d'occupation du sol a été ajoutée à la mosaïque paysagère. Dans ces deux premiers scénarii multicritères, la démarche effectuée est celle d'un rognage, l'exclusion de zones perturbées pour les espaces fait automatiquement diminuer la surface des taches d'habitats identifiées au départ.

[8] Ces seuils ont été choisis à partir Jolivet 2014, ils correspondent aux valeurs minimum de perturbation routière pour des mammifères.

[9] Cette surface de 1000 m² a été choisie en se fondant sur la définition de la BDTOPO (IGN) qui considère comme zones d'activités toutes surfaces de plus de 1000m².

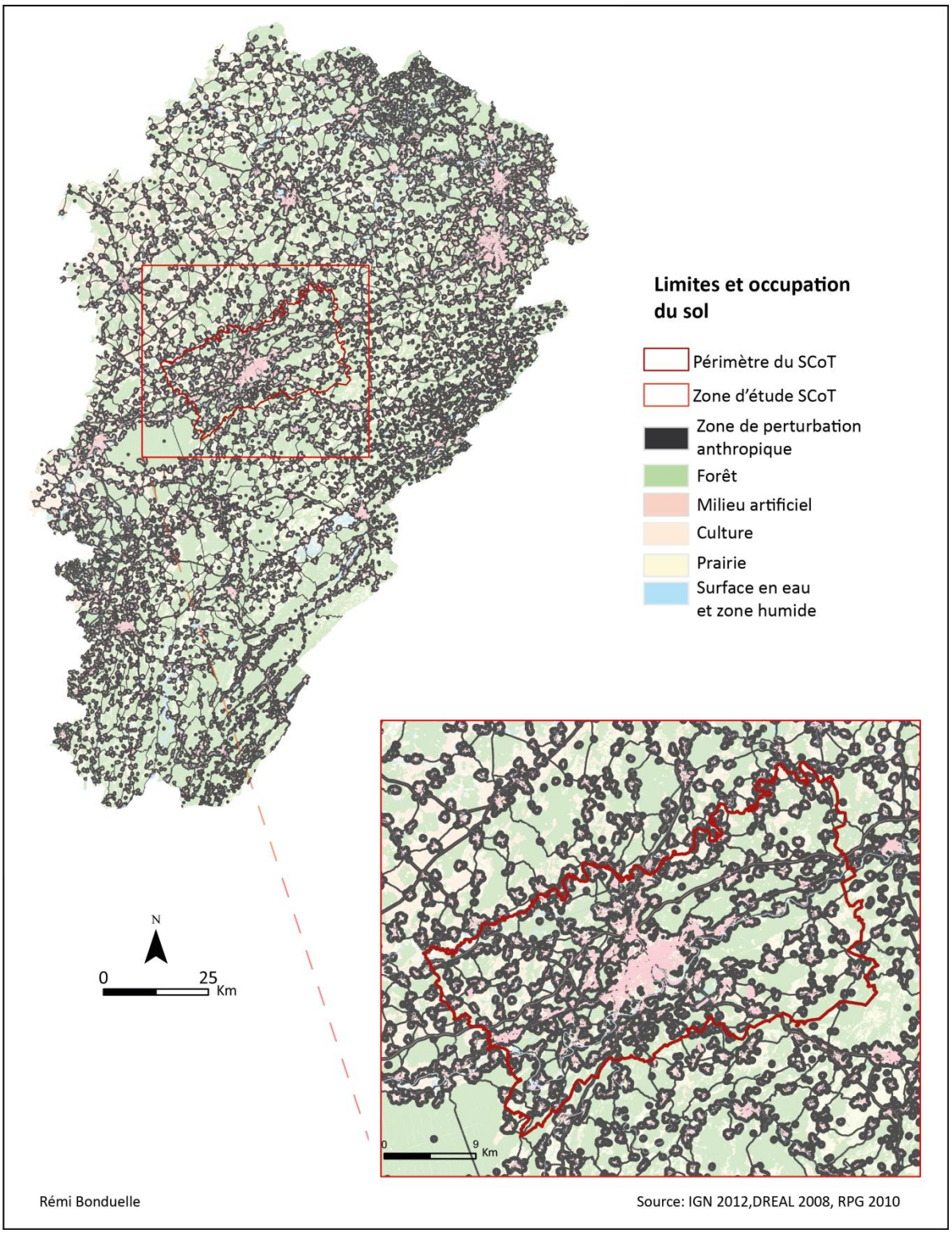


Figure 10 Critères cumulés de perturbation aux routes et aux surfaces d'activités de la Franche-Comté et du SCoT Bisontin

Le troisième scénario est l'identification des forêts comme réservoirs d'habitats potentiellement plus favorables avec un critère de densité hydrologique.[10] Le calcul de densité du réseau hydrographique Franc-Comtois a été possible grâce à la couche de la BDTOPO du même nom. L'utilisation d'une

[10] Le choix de ce critère se fonde sur le projet IPAMAC (2010)

fonction de densité de lignes du logiciel ArcGIS 10.1 (ESRI) a permis d'obtenir la densité hydrographique. Un seuil a dû être choisi afin d'identifier les forêts, présentant une densité hydrographique « faible ». Les valeurs observées en-dessous du dernier quantile ont été exclues.

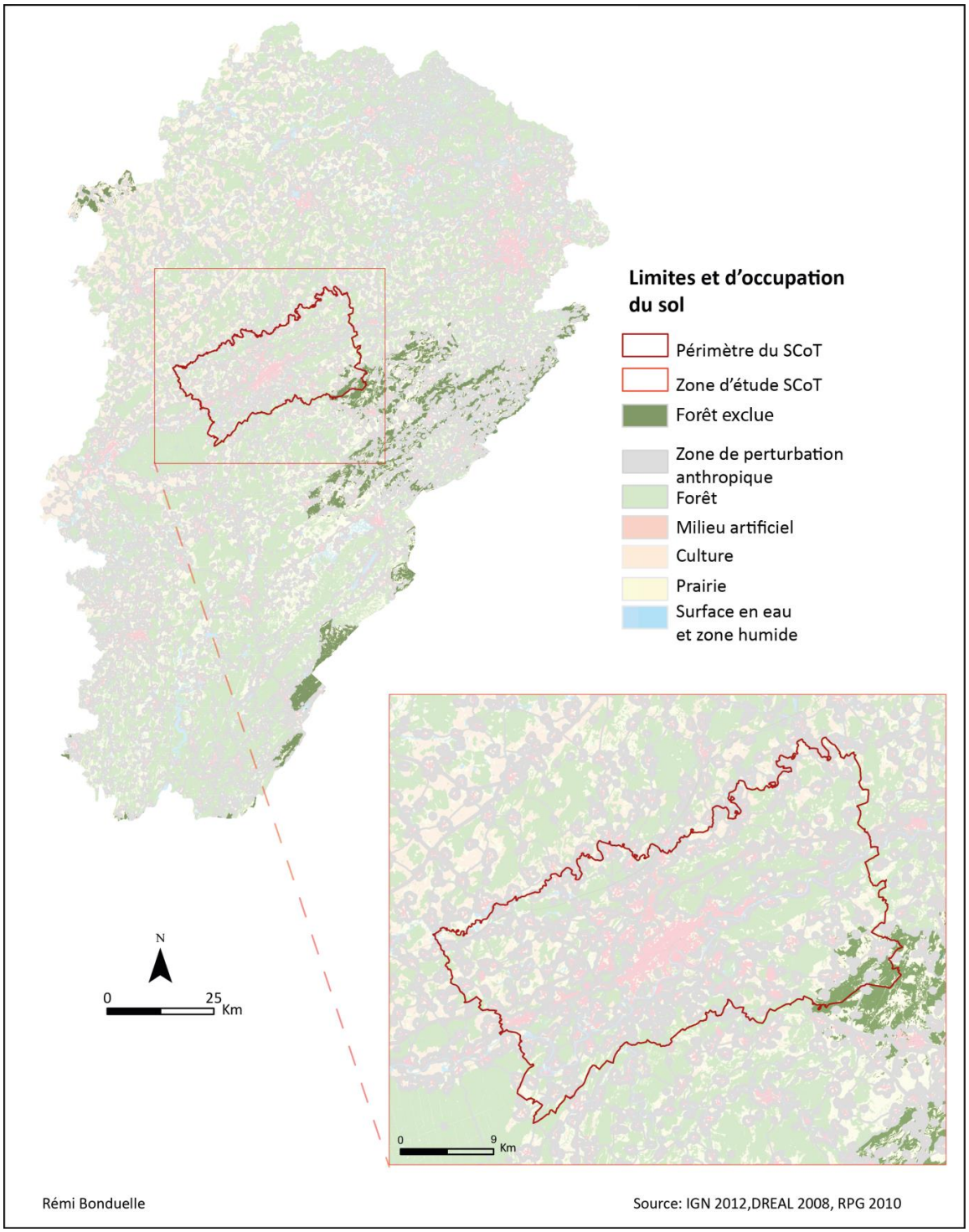


Figure 11 Critères cumulés de perturbation anthropiques et exclusion des forêts les moins hydrographiées aux échelles de la Franche-Comté et du SCoT Bisontin

2.4.3 Utilisation des métriques de connectivité pour la comparaison des scénarii

Les intérêts des métriques de connectivité sont multiples, ils offrent la possibilité de réaliser des calculs : la capacité des taches d'habitats, de mesurer des flux (Urban et Keitt, 2001 et Saura et Pascual-Hortal, 2007), de mesurer la contribution des taches relais (Zetterberg et al.,2011). Pour employer les calculs de métrique de connectivités Graphab propose quatre niveaux d'analyse :

- l'analyse des nœuds du graphe et de ses propriétés.
- l'analyse par des métriques de corrélation des nœuds étudiés et ceux qui lui sont adjacents.
- L'analyse par composantes permet d'effectuer des calculs à la connectivité interne de chaque composante
- Et le dernier niveau d'analyse représente le calcul de connectivité globale du graphe.

Dans le but de comparer les différents scénarii entre eux, le niveau d'analyse globale a été utilisé par l'intermédiaire du calcul de delta-métriques. Ce type de métrique offre la possibilité de déterminer l'importance relative de chaque nœud à l'intérieur du graphe en utilisant la méthode dite de « suppression » ou (removal method). Un taux de variation est calculé pour déterminer l'importance de chaque nœud dans le réseau. Le résultat de ce type d'indicateur est local même si la métrique est calculée sur l'ensemble du graphe.

Choix de la métrique

La réflexion s'est portée sur l'utilisation du PC puis du dPC. Le PC est notamment utilisé pour réaliser des études d'impacts. Le PC n'apparaît pas satisfaisant pour notre cas car l'objectif est de comparer des scénarii avec des taches d'habitats différentes issues des critères précédemment présentés. Notre objectif d'identification des réservoirs de biodiversité pour chaque scénario oblige à utiliser une métrique calculant la connectivité globale du réseau. Le choix s'est donc porté sur le dPC.

Pour obtenir le dPC, il faut dans un premier temps calculer le PC ou Probabiliy of Connectivity index. Cet indicateur est développé par Saura et Pascual-Hortal (2007), Les deux chercheurs, le définissent de la façon suivante :

« *The probability that two animals randomly placed within the landscape fall into habitat areas that are reachable from each other* »

Le PC est défini tel que :

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} a_i a_j p_{ij}}{A^2}$$

Où n est égale au nombre de patch, a_i and a_j sont les aires des patchs i and j, quant à p_{ij} , il représente la probabilité qu'à i et j d'être connecté par un lien. La valeur A correspond à la surface de la zone d'étude.

Pour déterminer la valeur de p_{ij} , une fonction exponentielle est utilisée :

$$p_{ij} = e^{-\alpha d_{ij}}$$

Ici d_{ij} représente la minimisation de la distance entre i and j, et α compris entre 0 et 1 est l'expression de la réduction des probabilités de dispersion résultat de l'utilisation d'une fonction exponentielle (Saura & Pascual-Hortal, 2007).

Après avoir déterminé la valeur du PC, il est maintenant possible de calculer le dPC afin de déterminer le pourcentage de variation lié à la suppression d'une tache d'habitat à l'ensemble du graphe.

$$dPC_i = 100 \times \frac{(PC - PC'_i)}{PC}$$

Où PC'_i correspond à la valeur du PC représentant la suppression de la tache i (Saura & Pascual-Hortal, 2007). Cette valeur est multipliée par 100 pour obtenir le pourcentage de variation dans Graphab le résultat obtenu correspond au taux de variation.

En 2010 Saura et Rubio ont déterminé qu'à partir du dPC, il est possible de déterminer l'importance de chaque patch. La valeur du dPC se décompose en trois parties :

$$dPC_i = dPC_{intra} + dPC_{flux} + dPC_{connector}$$

dPC_{intra} correspond à la variation due à la perte de la surface suite à la suppression de la tache i
dPC_{flux} représente la variation de flux due à la perte d'interactions entre la tache I et les autres taches.
$dPC_{connector}$ est définie comme la contribution de chaque patch à maintenir la connectivité entre les autres taches et passant initialement par i.

Lors de calcul métrique, Graphab offre l'opportunité de résoudre la valeur $p_{ij} = e^{-\alpha d_{ij}}$ en déterminant le paramètre α qui représente la vitesse avec laquelle la probabilité diminue quand la distance augmente. Le logiciel propose de déterminer la valeur α par l'équation quand il s'agit de métrique pondérée :

$$\alpha = -\log(p)\,/d$$

Les valeurs de p les plus généralement attribuées sont :

- p=0.5 cela correspond à la valeur médiane, la distance de dispersion est considérée comme moyenne pour l'espèce.
- P=0.05 cela correspond aux valeurs les plus faibles, la distance de dispersion est considérée comme maximale.

La valeur d est définit en fonction du seuil appliqué aux graphes seuillés.

Dans Graphab, le dPC est directement accessible. Dans l'optique de comparer les différents scénarii créés, le dPCconnector est apparu comme la métrique la plus utile pour identifier les nœuds à conserver dans le réseau. Ces éléments ont pour but de définir les taches d'habitats à préserver pour la réalisation de la TVB.

2.4.4 Comparaison des scénarii : le rôle des critères d'entrée

Deux solutions sont proposées : la 1ère consiste à la comparaison visuelle par la cartographie des différents scénarii en fonction des seuillages choisis pour la distribution. La deuxième solution est l'utilisation d'une ACP pour comparer les différentes valeurs et déterminer l'importance du choix des critères pour définir les taches d'habitats. La comparaison des taches d'habitats entre les différents scénarii est impossible dans une première approche, car les critères qui définissent les taches d'habitats sont par définitions différentes l'une de l'autre ; de plus l'ajout de critères supprime certaines taches d'habitats, dans ce cas la comparaison par une méthode statistique est impossible. Cependant, certaines taches subissent pas ou peu de modifications suites à l'application des différents critères. L'utilisation de la fonction « spatial join » d'ArcGIS 10.1 (ESRI, 2012) offre la possibilité de joindre les entités spatiales s'intersectant. En utilisant l'option « Join one to many » lorsque qu'une tache d'habitat est divisée en deux par l'application d'un des critères, l'option permet de créer une ligne pour chaque entité crée avec les mêmes attributs. Les intersections successives des différents scénarii à l'échelle régionale fournissent un échantillon d'individus égal à 625. Ces 625 individus vont servir de base à la création de l'ACP. La méthode possède des biais importants : la réduction de l'effectif aux plus petits scénarii existants (Périmètre de protection). Les différences de formes des taches d'habitats ne permettent pas de comparer rigoureusement les valeurs issues des métriques de connectivité. Cependant, L'ACP va permettre de dégager les facteurs permettant la comparaison des scénarii par les différentes valeurs issues du dPC.

2.5 Réalisation des corridors de moindre coût

Pour répondre aux besoins de connectivité, l'autre composante des réseaux écologiques : les corridors doivent être également définis. Plusieurs méthodes existent pour déterminer leur tracer :

- une méthode par géographie euclidienne : l'Erosion-Dilatation,
- une méthode par le chemin de moindre de coût,
- et une méthode dite de « la théorie des circuits » (McRae et al., 2008).

Dans le cadre de ce travail, la méthode utilisée pour déterminer ces corridors correspond aux chemins de moindre. Cette méthode est critiquée (McRae et al., 2008), car elle tient compte seulement du chemin de moindre coût. C'est-à-dire le chemin le plus court reliant deux taches d'habitats pour former le corridor. Cependant, elle demeure intéressante pour plusieurs raisons : le temps de calcul pour réaliser les corridors écologiques à partir des données d'occupation du sol est relativement court par rapport à une application par la théorie des circuits. De plus, cette méthode tient compte de coût attribué à la carte paysagère pour former ces corridors, ils sont donc plus précis que la méthode par Erosion-Dilatation. La création de corridor en fonction du chemin de moindre coût offre donc un bon compromis.

Graphab dispose d'une application à la création des corridors écologiques par le chemin de moindre coût. L'utilisation de cette fonction doit être effectuée en ligne de commande.[11] La requête a effectué permet d'utiliser la fonction corridor du logiciel en définissant le « costmax » (le coût maximum) pour chaque scénario. La valeur de « costmax » doit être au minimum la distance de dispersion de l'espèce identifiée et exprimée en unités de coût.

Conclusion

Les terrains d'études utilisés permettent d'observer l'intérêt des réseaux écologiques avec une région Franche-Comté au cœur d'un système entre les différents grands ensembles forestiers représentés par le massif Vosgien, la forêt Noire et les pré-massifs Alpins. À L'échelle du SCoT Bisontin, d'autres problématiques font leur apparition avec la connexion des différents ensembles forestiers du SCoT et le manque de connectivité lié aux perturbations anthropiques. Le réseau européen Natura 2000 et les différents périmètres de protection présents dans les zones d'études attestent des enjeux de préservation. L'acquisition et la mise en place des données d'occupation du sol nécessitent peu de temps et sont relativement faciles d'accès, l'intérêt de la modélisation par les graphes est donc renforcée. Cependant la création de projets et des calculs liés aux projets peuvent être lourds notamment à l'échelle régionale surtout si la maille possède une résolution à 10 mètres. L'utilisation d'un matériel informatique performant est nécessaire à l'application des graphes paysagers.

Lors de la modélisation par les graphes paysagers, les nœuds du graphe correspondent aux taches d'habitat et liens servent à identifier les relations potentielles entre elles. Les graphes offrent des possibilités de modélisations presque infinies : l'utilisation d'une distance coût ou distance euclidienne pour caractériser les relations des individus et de leur carte paysagère. Les différentes étapes nécessaires à la création des nœuds et des liens permettent de prendre en considération les données issues des caractéristiques biologiques des espèces. La modélisation par les graphes crée une structure composée de nœuds et de liens, cette simplification liée à la modélisation, permet le calcul de métriques de connectivité à différentes échelles étudiées. Le dPCconnector est la métrique utilisée dans les scénarii pour les deux échelles d'études. Cette métrique va définir l'importance d'un patch à maintenir la connectivité globale du réseau. L'identification des nœuds, les plus importants pour la connectivité du réseau vont servir de référence pour établir les taches d'habitats à protéger en priorité.

Les deux échelles utilisées ont permis de montrer les applications possibles pour l'identification des composantes d'une TVB, l'emboîtement des terrains d'études offre une possibilité supplémentaire de démontrer la pertinence de l'utilisation des graphes paysagers. L'application des critères de perturbations anthropiques : distances aux routes et aux infrastructures surfaciques, et d'un autre type critère, la densité hydrologique vont contribuer à la modification des taches d'habitats. L'enjeu est de vérifier maintenant si l'application de critère a un rôle important dans la structure du graphe. La vérification est possible par les calculs de connectivité.

[11] Cette fonction n'est pas encore disponible sur l'interface de Graphab.

3 – Résultats

Deux séries de scénarii sont proposées : La première à l'échelle régionale et la seconde à l'échelle du SCoT Bisontin. Dans chaque série tous les scénarii vont être présentés puis des liens vont être faits entre les scénarii. Une synthèse des scénarii aux différentes échelles sera réalisée afin d'observer l'influence de l'échelle d'étude lors de la conception de graphes paysagers. De plus, la réalisation d'une ACP pour les scénarii à l'échelle régionale va enrichir l'analyse entre ces scénarii. Et enfin, les résultats obtenus pour la création des corridors par la méthode du chemin de moindre coût à partir des taches d'habitats identifiées par le scénario « espèce ».

3.1- Identification des réservoirs de biodiversité en Franche-Comté

3.1.1 L'approche « espèce »

Les valeurs du graphe régional issues du dPCconnector d'une approche « espèce » permettent de distinguer trois grands ensembles régionaux en termes de connectivité (Figure 12). Un premier ensemble délimité par le massif Jurassien et l'ensemble du second et premier plateau. Le taux de variation pour chaque noeuds dans cette zone est de l'ordre de 0,16 jusqu'à 2,1%. Le massif forestier Jurassien et les forêts permettant de faire la connexion jusqu'au Nord-Est de la Franche-Comté font partie des taches d'habitats les plus importantes à préserver. Le deuxième ensemble est situé entre le massif des Vosges et les alentours de la ville de Vesoul. Il se caractérise par un dPC élevé dans le massif Vosgien et par des ramifications de taches d'habitats dans les plaines Saônoises. Le dernier ensemble quant à lui est caractérisé par des valeurs de dPC nul ou très faible jusqu'à 0,01%. Il s'agit d'un axe Est-Ouest de la conurbation Belfort-Montbéliard jusqu'à Dole. Cet axe est traversé par l'A36 et la LGV Rhin-Rhône. Ces réseaux déconnectent complètement les habitats forestiers présents.

3.1.2 L'approche périmètres de protection

Cette approche permet d'observer deux composantes (Figure 13) : l'une est le massif forestier des Vosges. L'autre composante majeure correspond au domaine forestier du Haut-Jura, celui-ci est connecté avec les forêts à proximité de la vallée de la Loue et les forêts le long de la vallée du Doubs. L'identification des taches d'habitats par le choix d'une approche par périmètre de protection n'offre aucune relation possible avec le reste de la région, néanmoins, un axe régional peut-être visualisé.

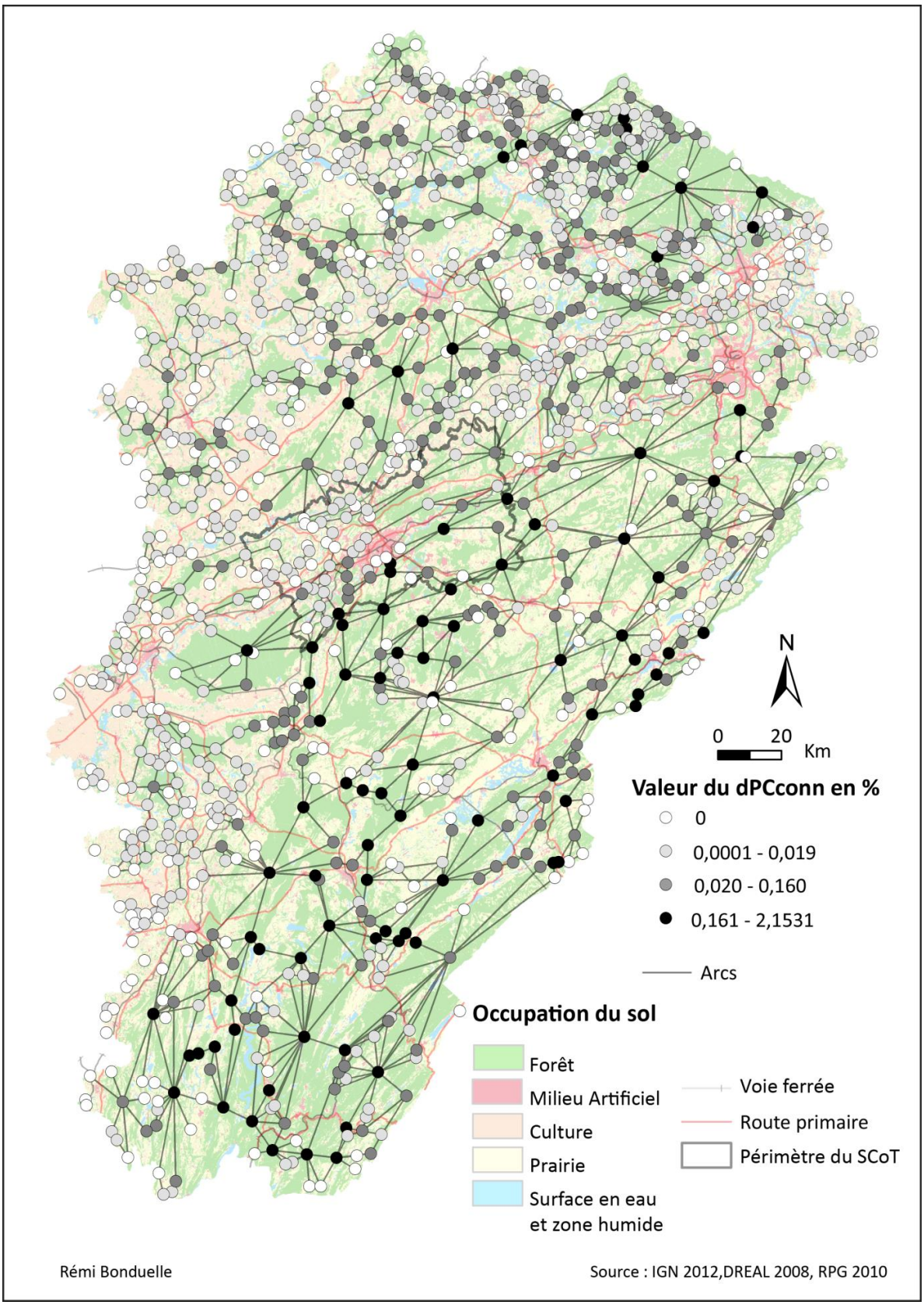


Figure 12 Graphe paysager des mammifères de la sous-trame forestière en Franche-Comté

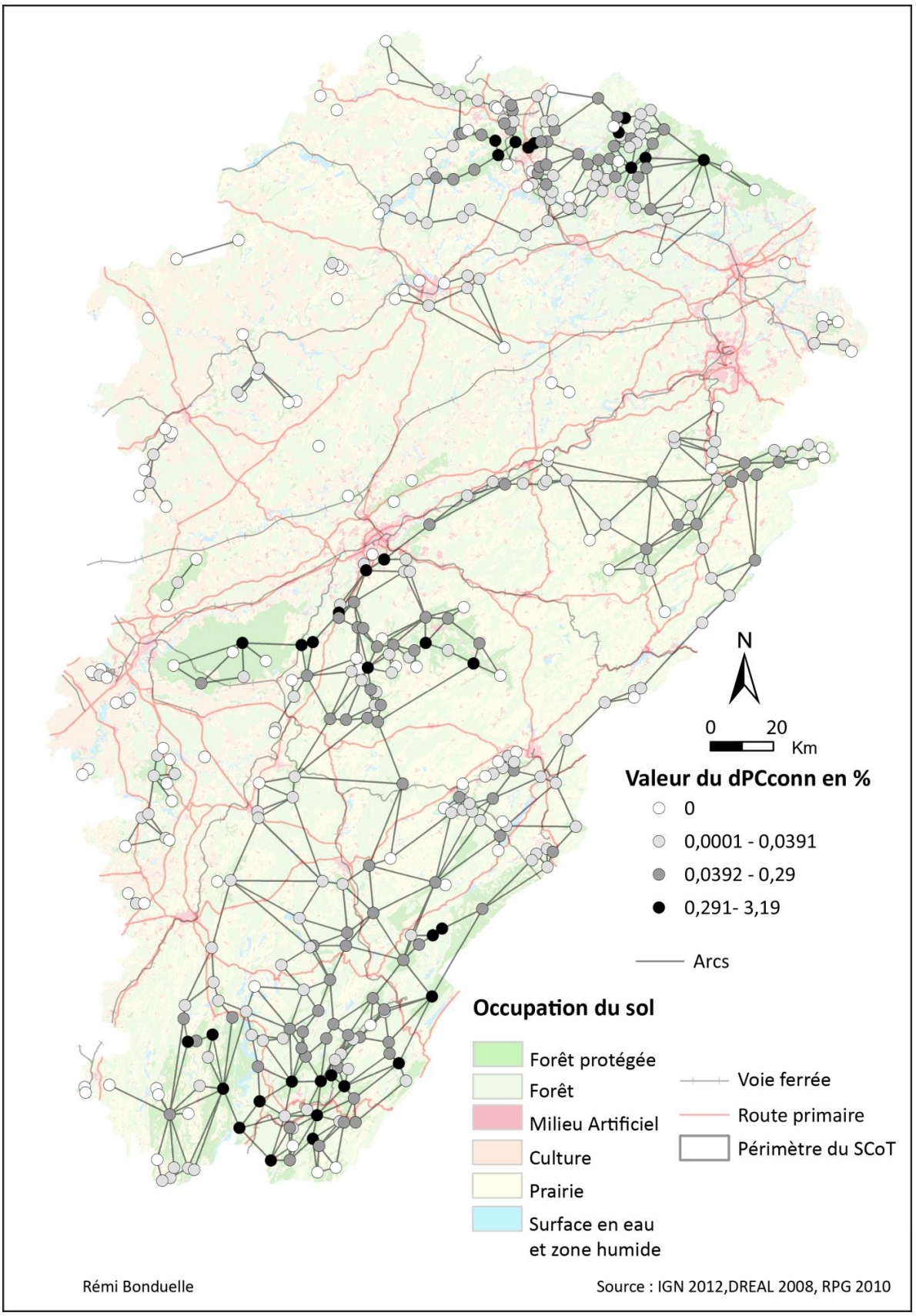


Figure 13 Graphe paysager des mammifères de la sous-trame forestière en Franche-Comté issues des périmètres de protection

Synthèse entre les approches espèces et périmètres de protection

La structure des graphes est complètement différente, le manque de taches d'habitats identifiés par une approche exclusivement fondée sur les périmètres de protection montre des limites. En effet, la différence du taux de variation issue du dPCconnector jusqu'à 3,2% pour le scénario périmètres de protection et jusqu'à 2,1% pour le scénario espèce s'explique par la différence du nombre de nœuds. Ils sont nettement moins importants pour le scénario périmètres de protection. Cette différence montre la faiblesse de fonder une approche exclusive des périmètres de protection, car si un ou plusieurs des périmètres venaient à disparaître, les connexions seraient rompues. Cependant, l'axe massif Jurassien, forêt de Chaux, et vallée du Doubs sont préservés avec cette proche minimaliste.

3.1.3 L'approche multicritère

Critères de perturbation par les routes

La valeur des nœuds issus du dPCconnector pour ce scénario (Figure 14) fait émerger plusieurs zones où la suppression d'une tache d'habitat aurait un impact direct sur la connectivité globale avec des valeurs de dPCconn comprises entre 0.043 et 1.34%. Ces zones sont : les massifs du Jura et des Vosges, la forêt de Chaux et la vallée de la Loue, le premier plateau et les plateaux calcaires centraux entre Besançon et Vesoul. Ces aires géographiques sont à fortes valeurs de connectivité mais elles ne sont pas continues, en effet la présence de taches d'habitats de moindre importance avec un dPC entre 0 et 0.042 est visible entre les nœuds les plus significatifs pour le dPCconn.

Critère de perturbation anthropique

L'ajout du critère de perturbation liée aux surfaces d'activités restreint le nombre de taches d'habitats (Figure 15). Cependant, certaines structures restent inchangées par rapport aux premiers critères seuls. Le massif Jurassien demeure essentiel pour la connectivité du réseau ainsi que la forêt de Chaux et la vallée de la Loue-Lison, cet ensemble possède des valeurs de dPCconn comprises entre 0,059 et 1,19%. En revanche, la structure du graphe et les valeurs du dPCconn sont complètement modifiées pour le massif Vosgien essentiellement à cause de la perte de surface des taches d'habitats. L'autre impact visible de ce critère est la perte de nœuds à proximité des agglomérations de Besançon et de Belfort-Montbéliard.

Critère hydrographique

L'ajout de ce critère crée la suppression des taches d'habitats possédant une densité hydrographique trop faible (Figure 16). Cette suppression est nettement visible au niveau du second et du premier plateau, le sol karstique du Jura en est la principale explication. La localisation des nœuds, les plus importants pour la connectivité et les valeurs du dPCconn, reste stable entre le scénario à deux critères et le scénario à trois critères.

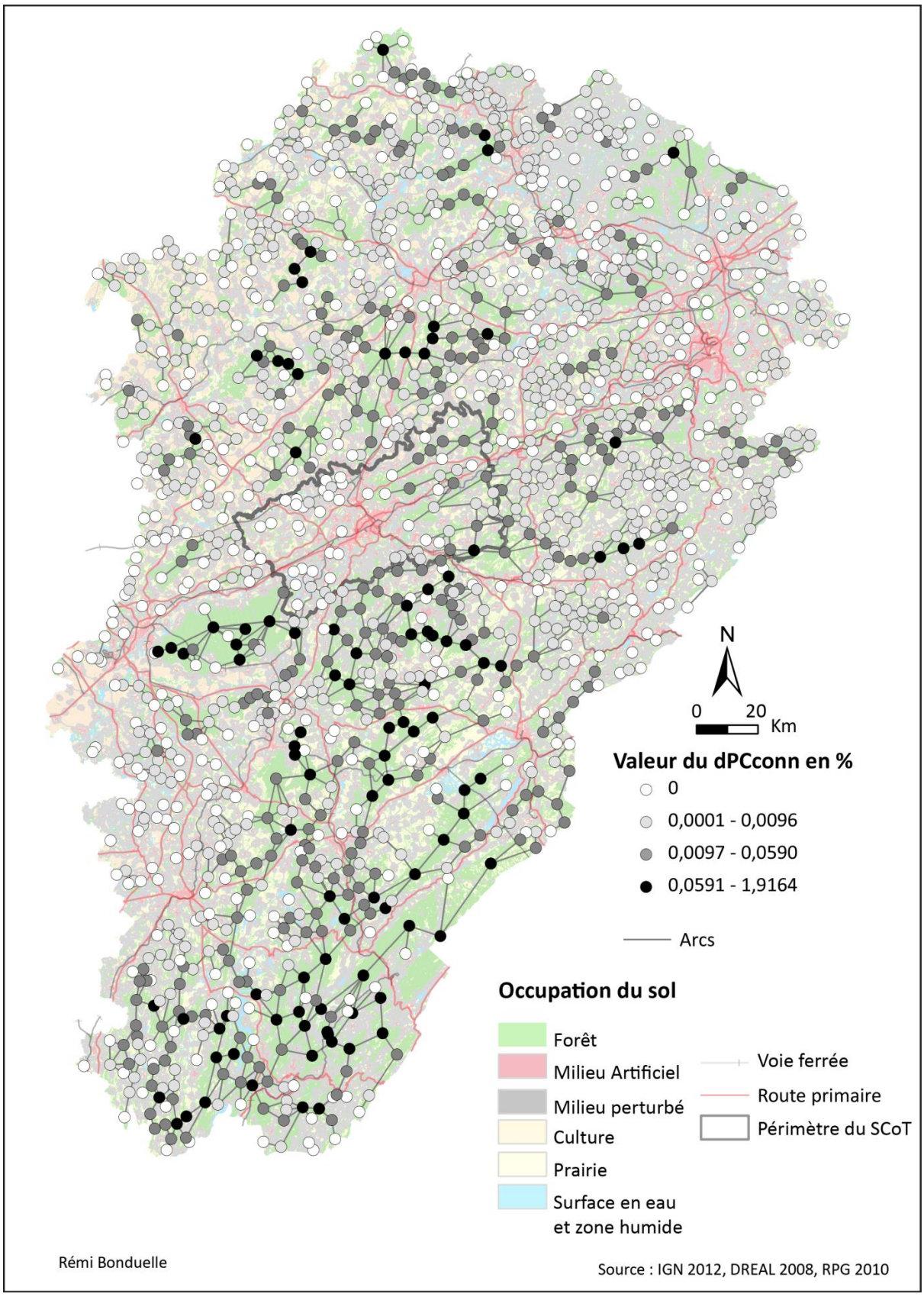


Figure 14 Graphe paysager des mammifères de la sous-trame forestière en Franche-Comté : perturbations des milieux par les routes

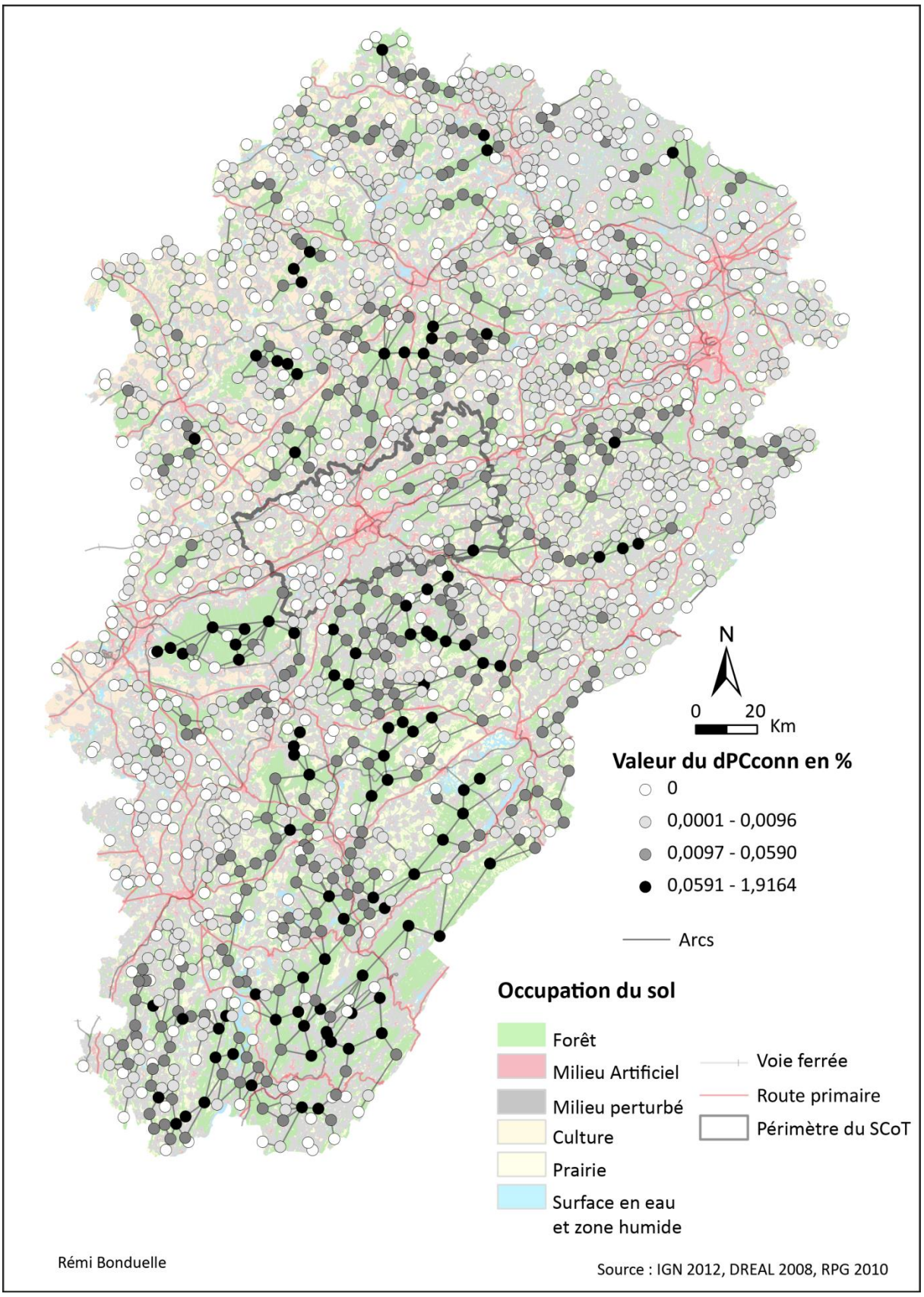


Figure 15 Graphe paysager des mammifères de la sous-trame forestière en Franche-Comté : perturbations anthropiques des milieux

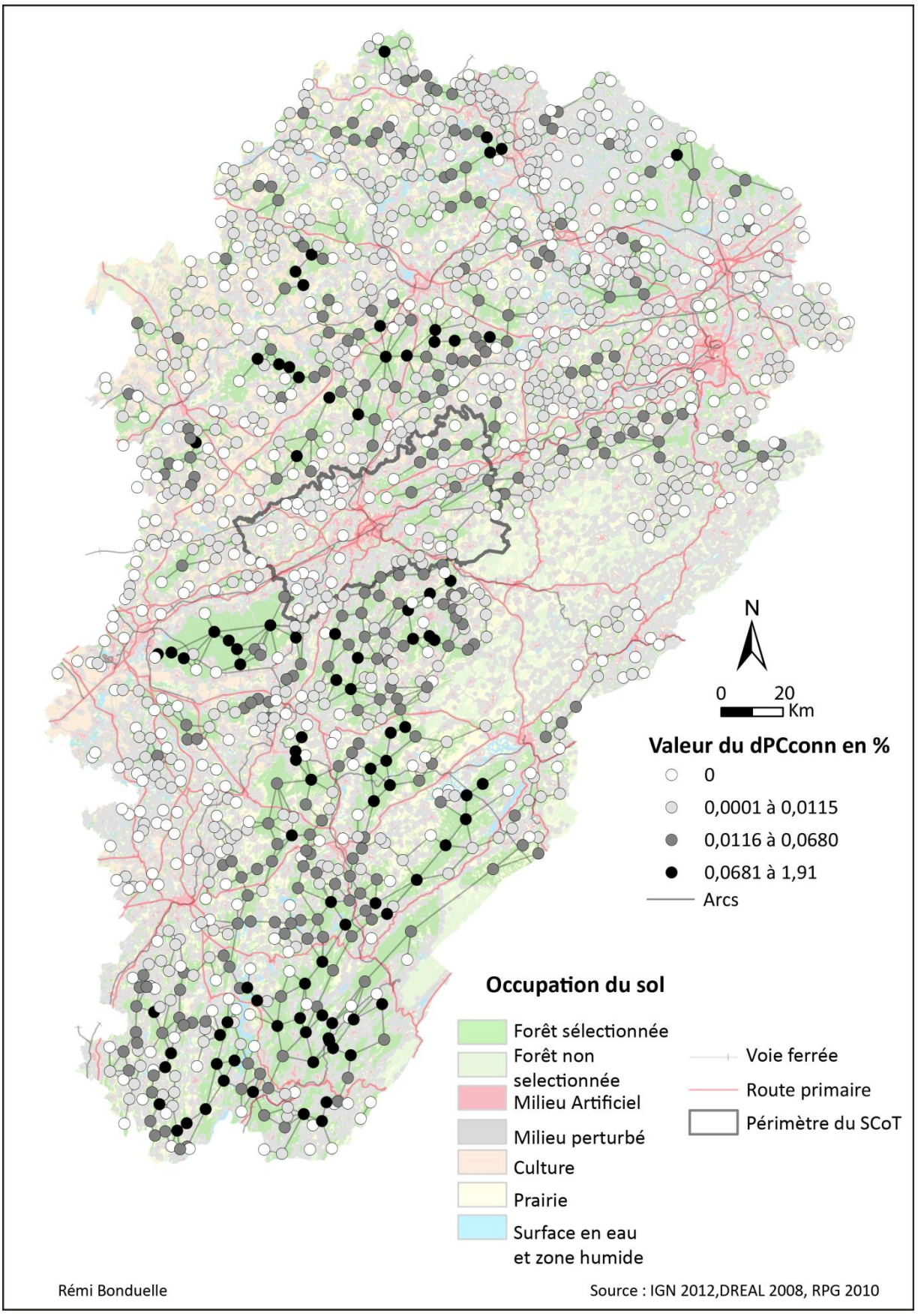


Figure 16 Graphe paysager des mammifères de la sous-trame forestière en Franche-Comté : favorabilité hydrologique et perturbations anthropiques des milieux

Synthèse des approches multicritères et comparaison avec l'approche espèce

L'ajout de critères successifs pour définir les taches d'habitats fait diminuer à chaque critère le nombre de nœuds identifiés ainsi que la surface d'habitats potentiels pour notre espèce. Ainsi, la mesure liée aux dPCconnector permet d'identifier certaines entités géographiques communes aux trois scénarii. Il s'agit du massif forestier du Jura, de la vallée de la Loue-Lison, de la forêt de Chaux et les bois et forêts entre Besançon et Vesoul. En revanche, d'autres ensembles géographiques comme le massif Vosgien, les forêts proches des aires urbaines de Besançon et Belfort-Montbéliard ont changé de statut, ils ne sont plus considérés comme des taches d'habitats.
Les scénarii multicritères font diminuer la surface forestière considérée comme habitats. Cette diminution a deux effets : le premier est la suppression de tache d'habitat au fur et à mesure que les critères se révèlent contraignants. Le second est l'augmentation du nombre de nœuds, en effet l'ajout de critère favorise la fragmentation des habitats. Les différences majeures entre ces scénarii sont : une connectivité importante entre le massif du Jura, le second et le premier plateau pour le scénario espèce, toutes les taches d'habitats possèdent des valeurs de dPC élevé 0,16 à 2,1% et un nombre de nœuds moins importants. Au contraire dans les scénarii multicritères, cette aire est entrecoupée de nœuds avec des valeurs de dPC proche de 0.

3.2 Identification des réservoirs à l'échelle du SCoT Bisontin

3.2.1 Approche espèce

Dans le périmètre d'étude du SCoT Bisontin les valeurs du dPCconn distinguent trois ensembles de connectivités (Figure 17). Un ensemble Avant-Monts et 1er plateau, il possède pour le dPCconn des valeurs se situant entre 0,83 et 8,89%. Les taches d'habitats les plus importantes pour la connectivité sont le long de la vallée de la Loue et du Doubs. La frange nord du SCoT entre la vallée de l'Ognon et les abords de l'agglomération Bisontine est déconnectée de l'ensemble du réseau, c'est un espace fragmenté entre l'autoroute A36 et la LGV. Au nord de la zone d'étude entre Gy et Rioz, le maintien de certaines taches d'habitats est essentiel pour permettre la connectivité de cette composante.

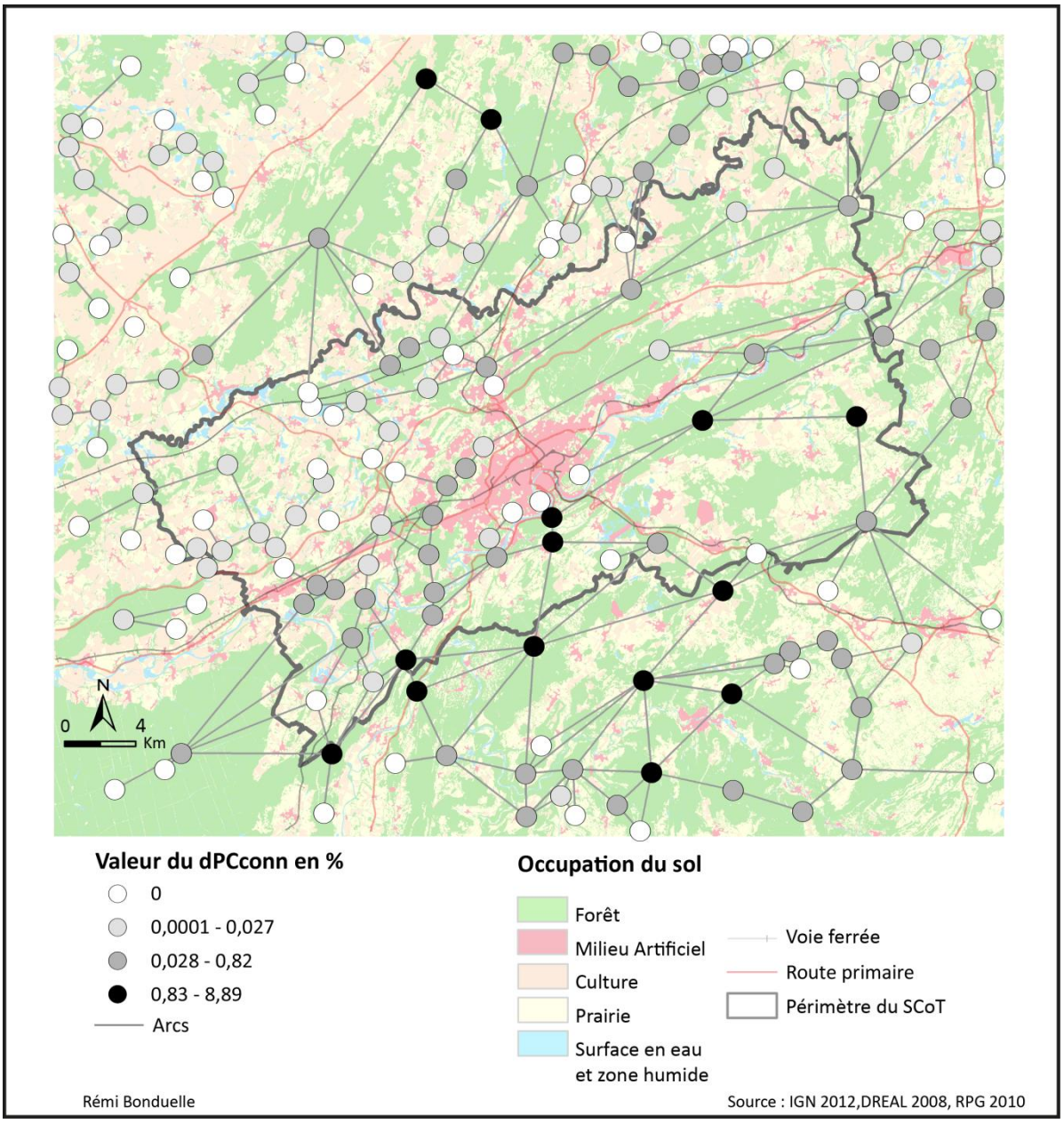


Figure 17 Graphe paysager des mammifères de la sous-trame forestière du SCoT Bisontin

3.2.2 Approche périmètres de protection

Les taches d'habitats déterminées par cette approche sont limitées, un axe est toujours présent permettant de connecté le SCoT avec l'extérieur du territoire (Figure 18). Il s'agit d'un axe Est/Sud-Ouest évalué par le dPCconn avec des valeurs entre 0,17 et 8,72%. Les zones forestières à proximité du Doubs sont connectées jusqu'à la forêt de Chaux et les forêts proche d'Ornans. Les autres taches d'habitats sont totalement déconnectées du réseau.

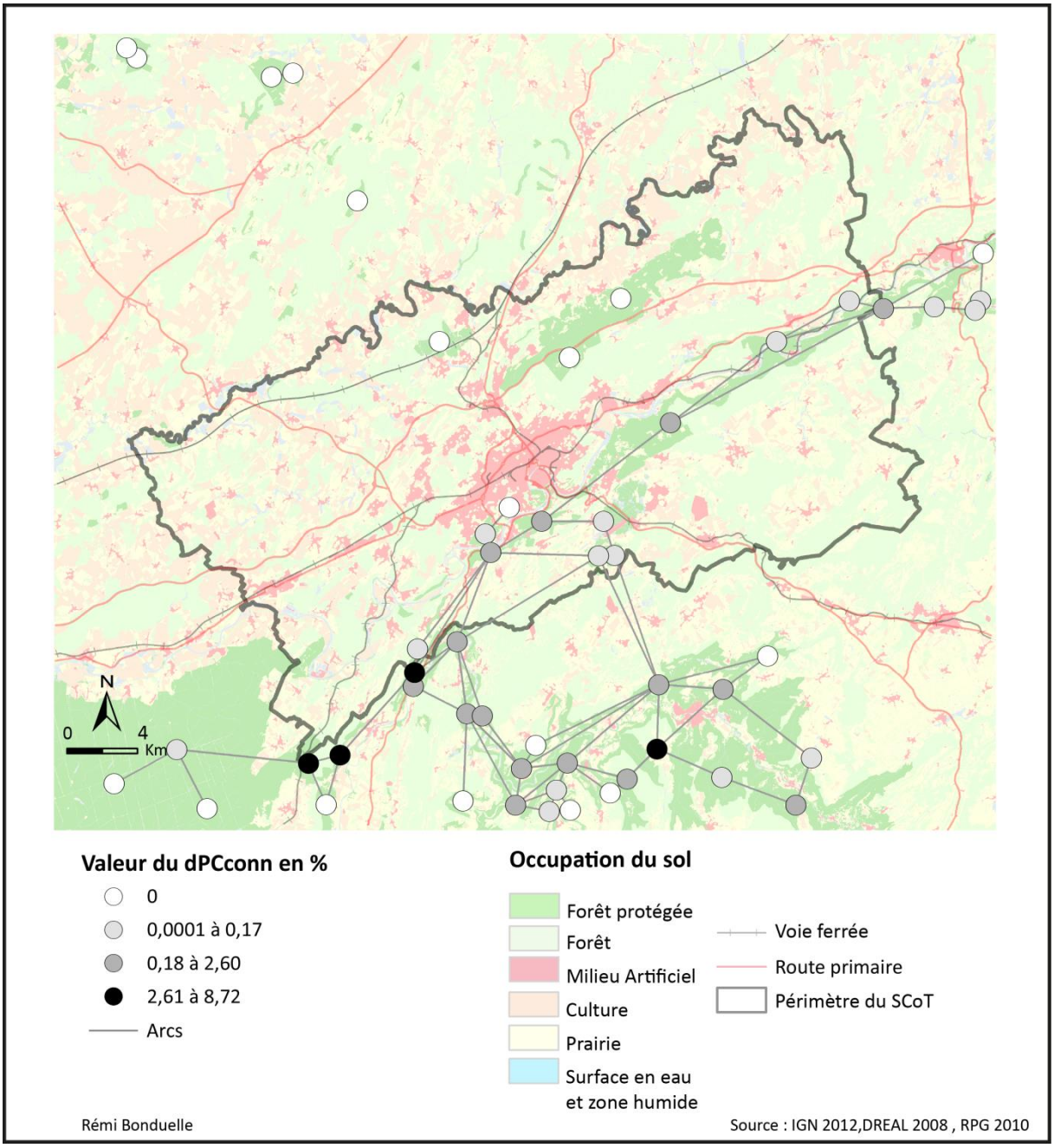


Figure 18 Graphe paysager des mammifères de la sous-trame forestière du SCoT Bisontin issues des périmètres de protection

Synthèse

Comme pour l'échelle régionale, la structure du graphe apparaît totalement différente. L'approche espèce permet de structurer l'ensemble de notre espace et de dégager les composantes structurantes. L'axe identifié dans le scénario des périmètres de protection est aussi visible dans l'approche espèce. Cependant, le faible nombre de taches d'habitats identifiés avec le scénario par périmètre de protection ne permet pas l'identification de composantes faiblement connectées. Le scénario met en évidence les zones où la connectivité doit être restaurée, notamment à l'approche des réseaux linéaires d'infrastructures de transports.

3.2.3 Approche multicritère

Critère de perturbation aux routes

La segmentation des espaces forestiers est visible, la fragmentation liée à l'ajout du critère de perturbation des routes à un impact direct sur le graphe (Figure 19). Toutes les taches d'habitats importantes pour la connectivité analysée par le dPC entre 0,28 et 1,22% sont situées à l'extérieur du SCoT ou à la limite de son territoire. La forêt de Chaux et les forêts proches de la vallée de la Loue et du Lison sont les plus importantes à maintenir.

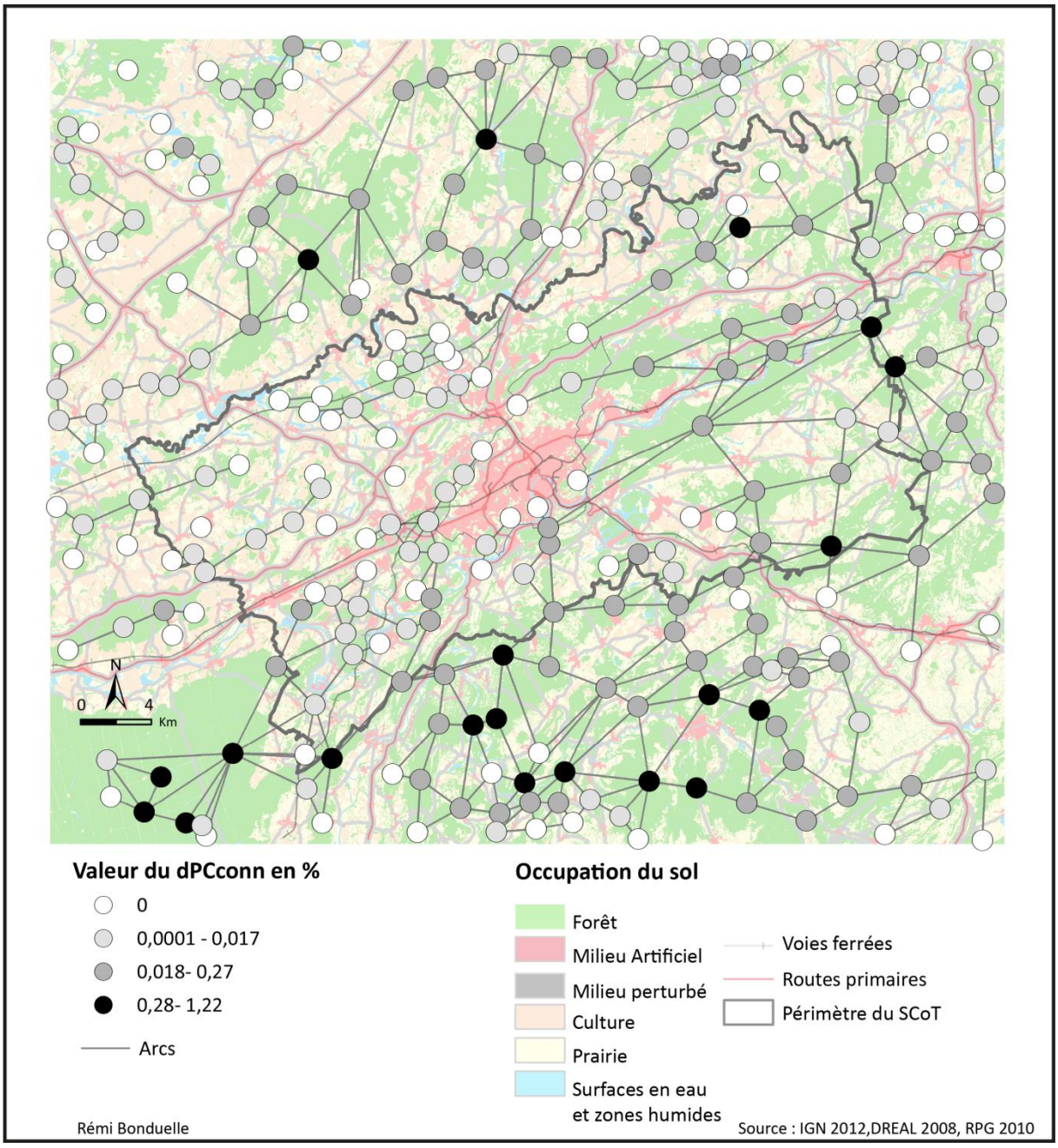


Figure 19 Graphe paysager des mammifères de la sous-trame forestière dans le SCoT Bisontin : perturbations des milieux par les routes

Critère de perturbation anthropique

L'ajout du critère lié aux surfaces d'activités anthropiques modifie considérablement le graphe (Figure20). Dans le SCoT deux aires sont identifiables : un secteur Est encore connecté avec le reste du réseau, les nœuds ont une valeur de dPCconn entre 0,039 et 0,29%. En revanche, le secteur Ouest est modifié, la suppression de taches d'habitats déconnecte cet ensemble du graphe. Les valeurs dPCconn calculées pour les nœuds restant sont proches de 0. Autre phénomène remarquable, la séparation en deux composantes de la forêt de Chaux et des forêts situées à proximité de la vallée de la Loue et du Lison. Cependant, le dPCconn identifie toujours ces deux composantes comme les plus importantes à protéger pour l'ensemble du réseau.

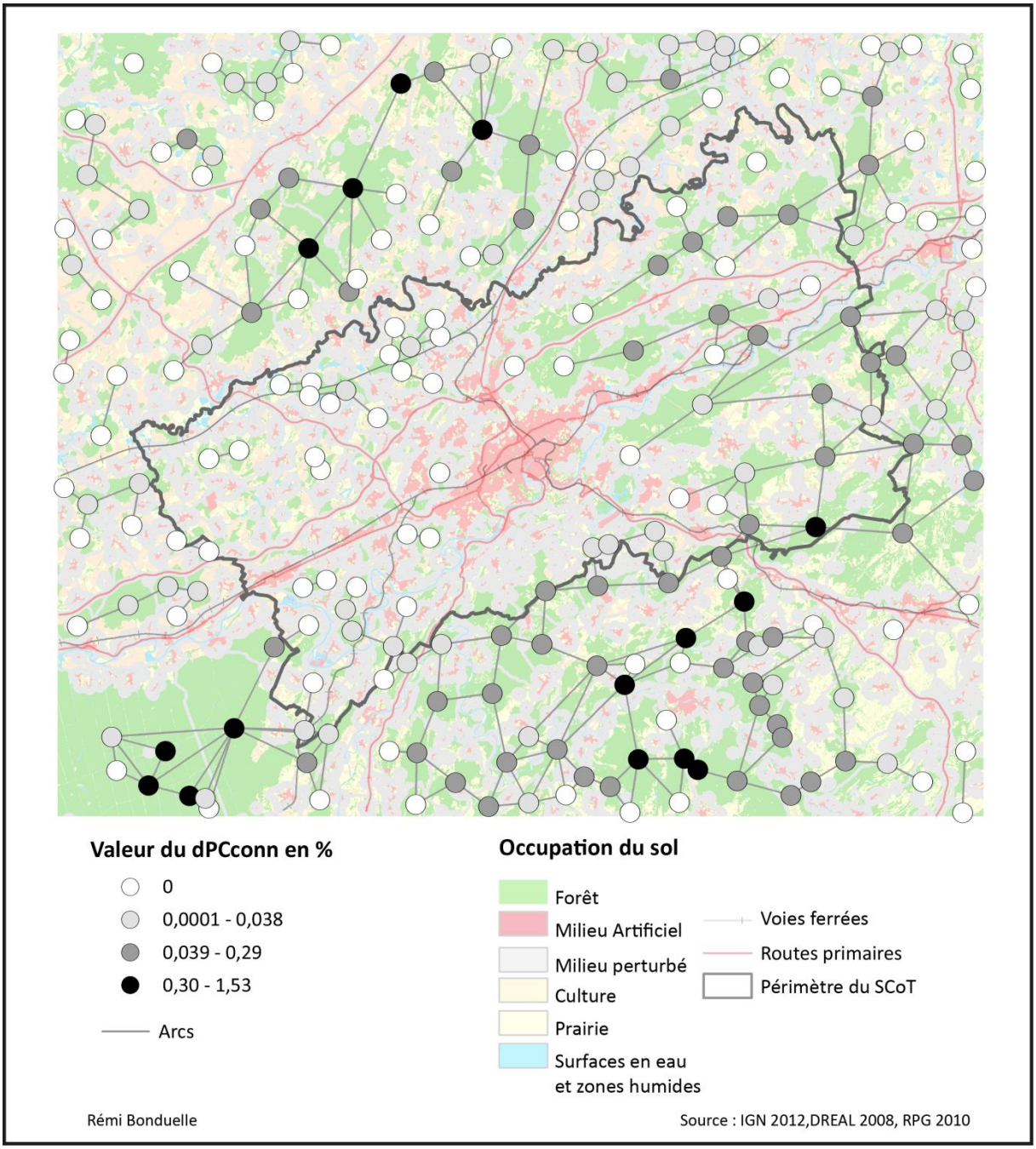


Figure 20 Graphe paysager des mammifères de la sous-trame forestière en Franche-Comté : perturbations anthropiques des milieux

Critère hydrographique

A l'échelle du SCoT, l'ajout du critère hydrographique supprime au Sud-Est de la zone d'étude des taches d'habitats mais il ne modifie pas la structure des principales composantes déjà identifiées (Figure 21). La forêt de Chaux, les forêts de la zone du Loue-Lison et les forêts au nord du SCoT entre Gy et Rioz demeurent à préserver, les nœuds détiennent les valeurs de dPCconn le plus élevées entre 0,33 et 1,68% essentiel pour la connectivité du réseau. Cependant, le critère hydrographique restreint les chemins possibles, cela entraîne des modifications des valeurs issues du dPC pour les nœuds à proximité des taches d'habitats supprimées.

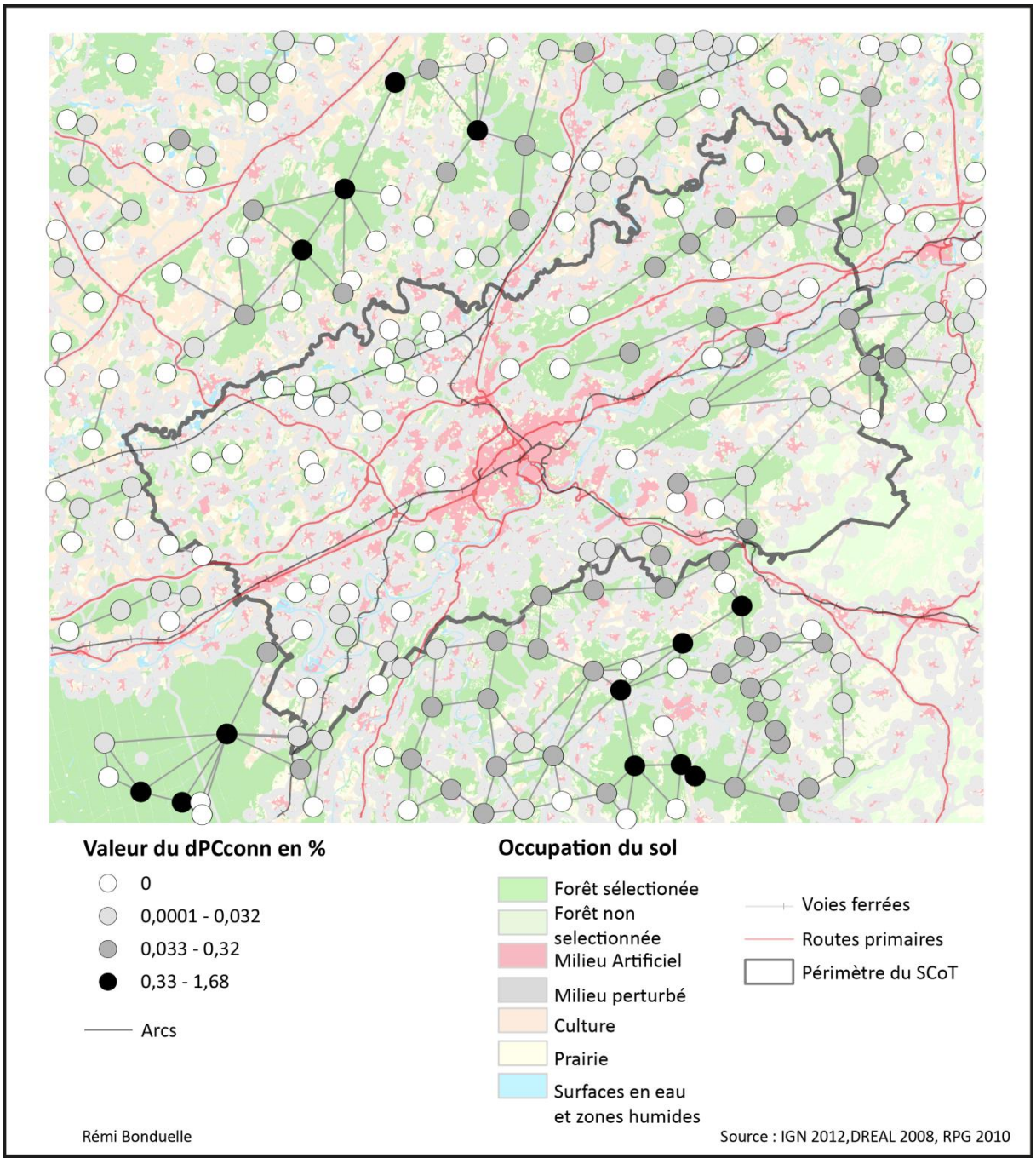


Figure 21 Graphe paysager des mammifères de la sous-trame forestière du SCoT Bisontin : favorabilité hydrologique et perturbations anthropiques des milieux

Synthèse des scénarii multicritères et comparaison avec le scénario espèce

Des différences notables existent entre les deux types de scénarii. Tout d'abord, les scénarii multicritères font diminuer la surface forestière pouvant servir d'habitat. De plus, l'ajout successif de critères restrictifs fait diminuer d'autant plus la surface d'habitat. Cependant, la segmentation du réseau contribue à l'augmentation du nombre de taches d'habitats. Ces différences modifient la structuration du réseau, en effet les valeurs de connectivité issues du dPCconn n'ont pas les mêmes variations entre le scénario espèce avec un taux de variation compris entre 0 et 8,89% et des scénarii multicritères avec des taux de variation compris entre 0 et 1,68%. L'application des critères a deux effets majeurs à l'échelle du SCoT : l'ajout de critère accentue la fragmentation du réseau mais permet d'avoir une précision quant aux taches d'habitats à maintenir en priorité.

3.3 – Synthèse entre les échelles d'analyses

Les graphes permettent le calcul de métrique de connectivité aux deux échelles étudiées : la Franche-Comté et le SCoT Bisontin. Cette possibilité permet d'identifier les enjeux liés aux changements d'échelles, l'objectif est d'observer la connectivité du SCoT Bisontin et de la Franche-Comté.
Les valeurs du dPCconn entre les échelles régionales et locales n'ont pas le même taux de variation, la maille d'analyse régionale explique un taux de variation plus faible puisque l'une des variables dPC est calculée à partir du nombre de taches présentes dans le graphe. Les graphes régionaux possèdent un taux de variation compris entre 0 et 3,20% et les scénarii du SCoT Bisontin ont un taux de variation compris entre 0 et 8,89%. Cependant, les taux de variation tirés des scénarii multicritères par leur nature fragmentée possèdent des taux de variations plus proches des scénarii régionaux avec des valeurs de dPC ne dépassant pas les 2%. L'observation de la zone d'étude du SCoT à l'échelle régionale montre une cohérence entre les taches d'habitats identifiées entre les deux échelles. Dans l'ensemble, une tache d'habitats possédant une valeur de dPCconn élevé à l'échelle du SCoT aura une valeur élevée à l'échelle régionale. Néanmoins, des différences subsistent d'une échelle à l'autre.

3.4-Apport d'une analyse quantitative : ACP

L'utilisation de l'Analyse en Composante Principale (ACP) a pour objectif de comparer les différentes mesures issues du dPC (dPCintra, dPCflux et dPCconn) et de comparer les différents scénarii à l'échelle régionale afin d'observer leur degré de proximité.
Lors de la création de l'ACP sur Xlstat (2010), le cercle des corrélations a été créé avec le facteur (F1) significatif à 40,83%, les facteurs (F2) significatif à 16,30%. Cette méthode d'analyse permet de définir deux points majeurs : une corrélation positive entre les scénarii multicritères et une opposition entre les scénarii multicritères fortement corrélés à l'axe 1 et un scénario espèce corrélé à l'axe 2. Le scénario par périmètre de protection est plus difficile à définir puisque le dPCintra et le flux sont corrélés à l'axe 1 alors que le dPCcon est corrélé à l'axe 2, mais il est peu significatif. D'autres phénomènes sont difficilement explicables dans cette ACP : la proximité des variables pour les scénarii multicritères issues du dPC (intra, flux et connector) dans le cercle des corrélations. L'autre phénomène est l'opposition entre le scénario multicritère 2 et les scénarii multicritère 1 et 3.

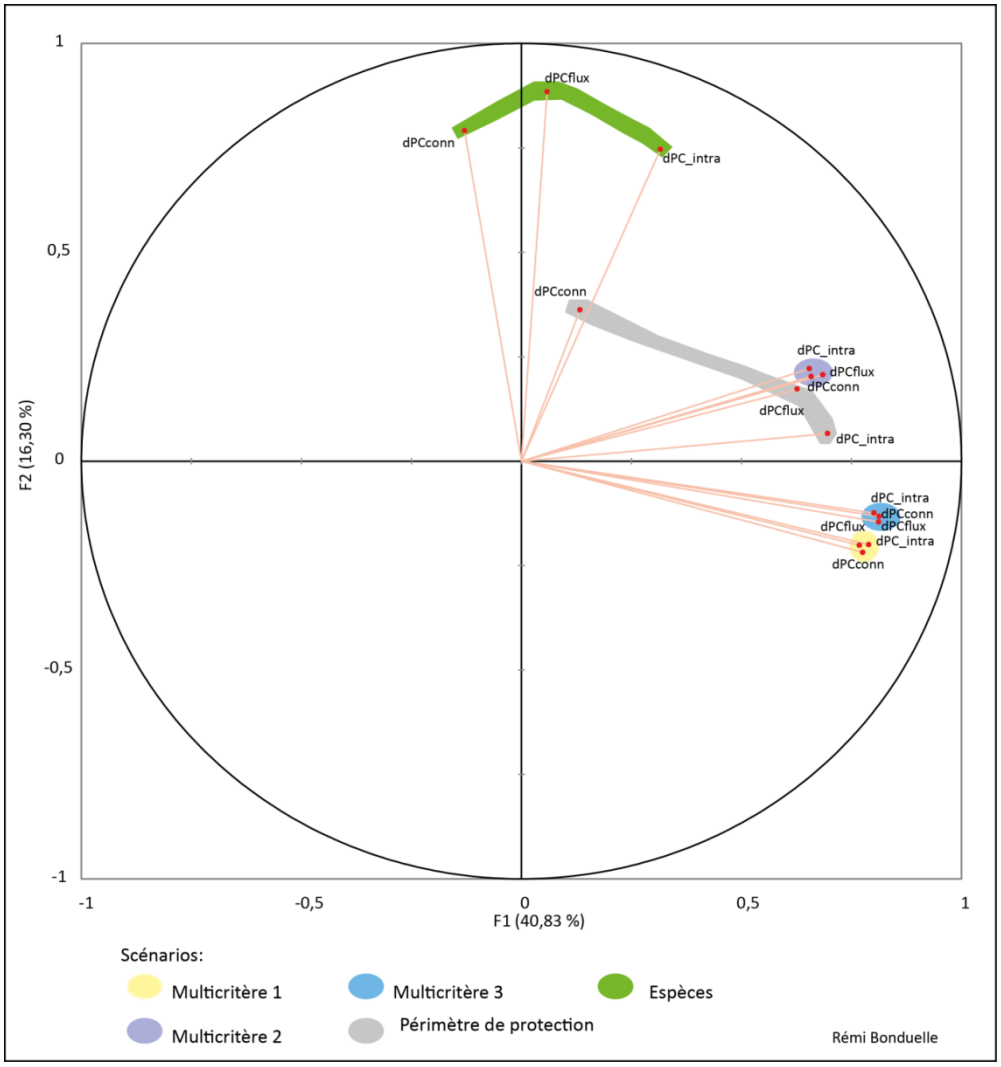


Figure 22 Cercle des corrélations issu des valeurs du dPC à l'échelle régionale

3.5- La modélisation des corridors par le chemin de moindre coût

La création des corridors est fondée sur le scénario « espèce », l'objectif est d'observer à une échelle fine les impacts de la modélisation des taches d'habitats et la conséquence de celles-ci sur la modélisation des corridors. L'utilisation de la fonction corridor de Graphab a permis de modéliser les connexions possibles entre les différentes taches d'habitats à condition d'avoir une distance-coût inférieure à 4500.

La forêt est omniprésente à l'échelle régionale et SCoT Bisontin (Figure 23). Les taches d'habitats sont déjà fortement connectées les unes aux autres. De plus, il est difficile de hiérarchiser les corridors, l'ensemble du domaine forestier semble connecté. Il est nécessaire d'affiner l'échelle d'étude pour distinguer l'enjeu représenté par les corridors.

Un zoom a été réalisé sur un ensemble communal entre Loulans-Verchamps en Haute-Saône (70) et Cendrey dans le Doubs (25). L'application à cette échelle des corridors issus de Graphab et de la continuité du bâti déterminé par la BD TOPO permet de déterminer les aires de conflit entre les zones urbanisées et les corridors. L'intersection de ces deux couches met en évidence des zones à protéger et des zones à restaurer afin d'assurer la meilleure connectivité possible pour les espèces.

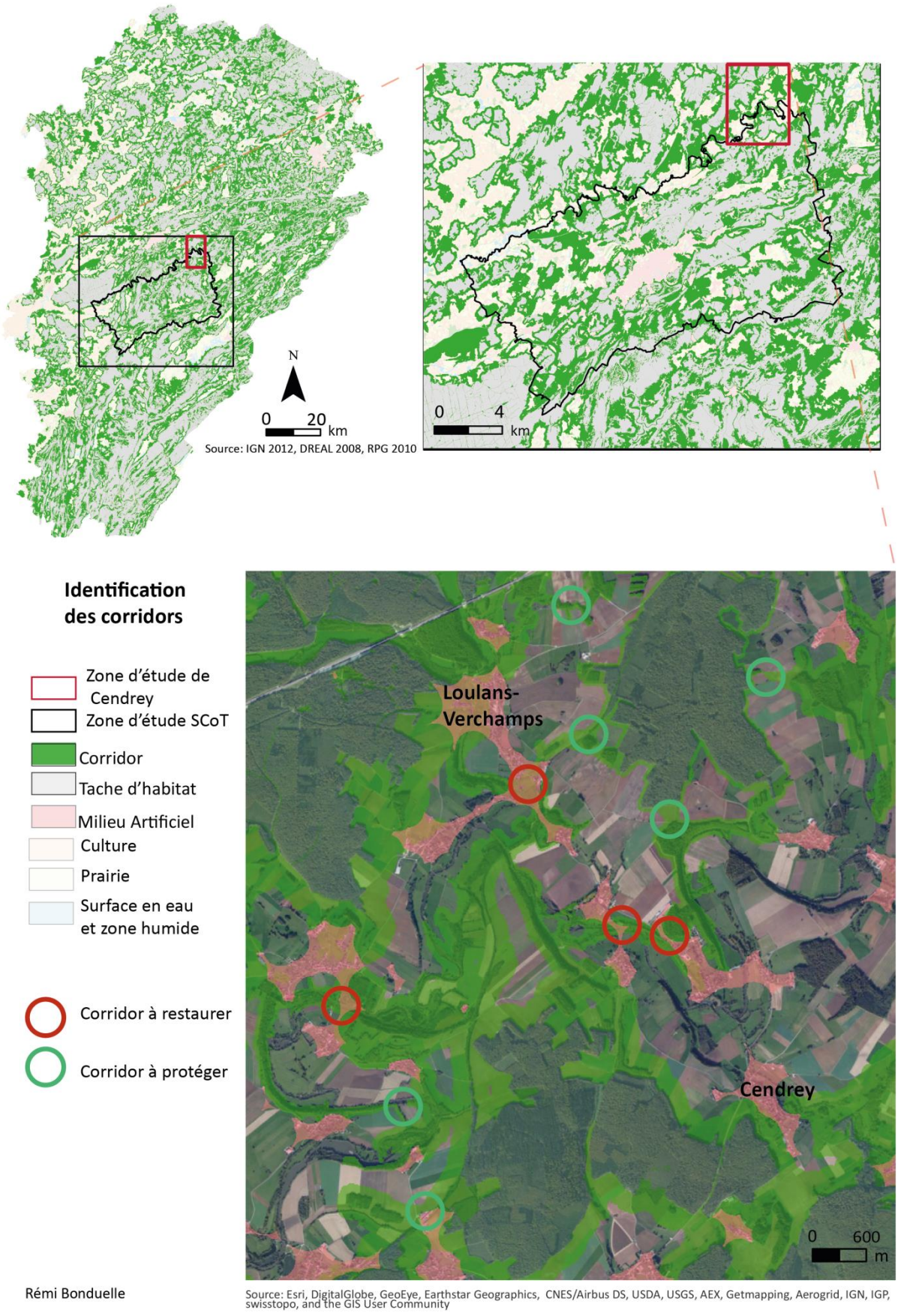


Figure 23 Modélisation des corridors par la méthode du chemin de moindre coût

4 – Discussion

L'identification des composantes des réseaux écologiques demeure la principale priorité pour l'identification des TVB. L'approche développée vise à tester la pertinence de critère pour la mise en place de réservoirs de biodiversité à partir de la modélisation par les graphes paysagers. L'utilisation de métrique de connectivité permet une analyse quantitative de l'apport de chaque scénario à l'identification des taches d'habitats à préserver. L'enjeu majeur pour les graphes repose sur leur utilisation opérationnelle dans les principaux documents d'aménagements.

4.1 – Apports des scénarii à l'identification des composantes pour les réseaux écologiques

Les scénarii ont été fondés sur différents critères : tout d'abord, une approche espèce est développée à partir des caractéristiques biologiques d'une espèce cible. Puis une autre approche à partir des systèmes de protection déjà mis en place comme le réseau Natura 2000, les ZNIEFF, les arrêtés de protection du biotope. Enfin, une démarche multicritère où l'ajout de critère restrictif à l'habitat potentiel de l'espèce cible modifie la structure de son habitat. L'utilisation des graphes paysagers a donc permis de créer plusieurs scénarii. La possibilité d'effectuer des calculs de métrique de connectivité par l'intermédiaire des graphes aboutit à deux éléments importants :

- l'ajout de critère modifie la structure des graphes.
- Identification des taches d'habitats les plus importantes pour la connectivité.

L'approche espèce permet de connecter l'ensemble des taches d'habitats en fonction des caractéristiques de l'espèce cible et de distinguer les composantes de ce réseau. Dans le cas étudié ici, les intérêts de cette approche sont de développer un scénario de référence pour permettre la comparaison avec les scénarii périmètre de protection et les scénarii multicritères. Le scénario espèce offre une vision « complète » du système étudié quelque soit l'échelle utilisée. Il permet de distinguer l'ensemble du réseau, les connexions pouvant être faites entre les taches d'habitats. De plus, l'application du dPCconn aux graphes fait émerger les nœuds les plus importants pour la connectivité faisant ressortir des zones-axes.
Le scénario par périmètre de protection apparaît comme le plus contraignant pour la sélection des taches d'habitats. La structure minimaliste du graphe ne permet pas de rendre compte d'une connectivité globale de la sous-trame forestière seulement, un axe majeur également déterminé par le scénario espèce. Il s'agit de l'axe massif Jurassien, vallée de la Loue-Lison et vallée du Doubs. L'approche par périmètre de protection apporte l'identification d'une branche du réseau régional, mais n'est pas suffisante pour une mise en réseau généralisé du système forestier.
Les scénarii multicritères développés à partir du scénario espèce font évoluer la structure du graphe. Dans chaque scénario, l'ajout d'un nouveau critère restreint le nombre de taches d'habitats tout en augmentant le nombre de nœuds du graphe, le réseau apparaît donc plus segmenté. Cette segmentation volontaire du réseau tient compte d'aspect lié à la création de zone de perturbation et de zone favorable pour la présence d'espèces cibles dans le domaine forestier. L'apport lié à l'identification de ces zones permet de modifier la structure du graphe et d'offrir une vision plus fragmentée de celui-ci. De plus, le calcul de métrique de connectivité détermine les nœuds les plus

importants à préserver pour ce nouveau réseau. Ainsi, les scénarii multicritères permettent d'identifier avec plus de précision, les taches d'habitats à préserver (Figure 24 et 25).

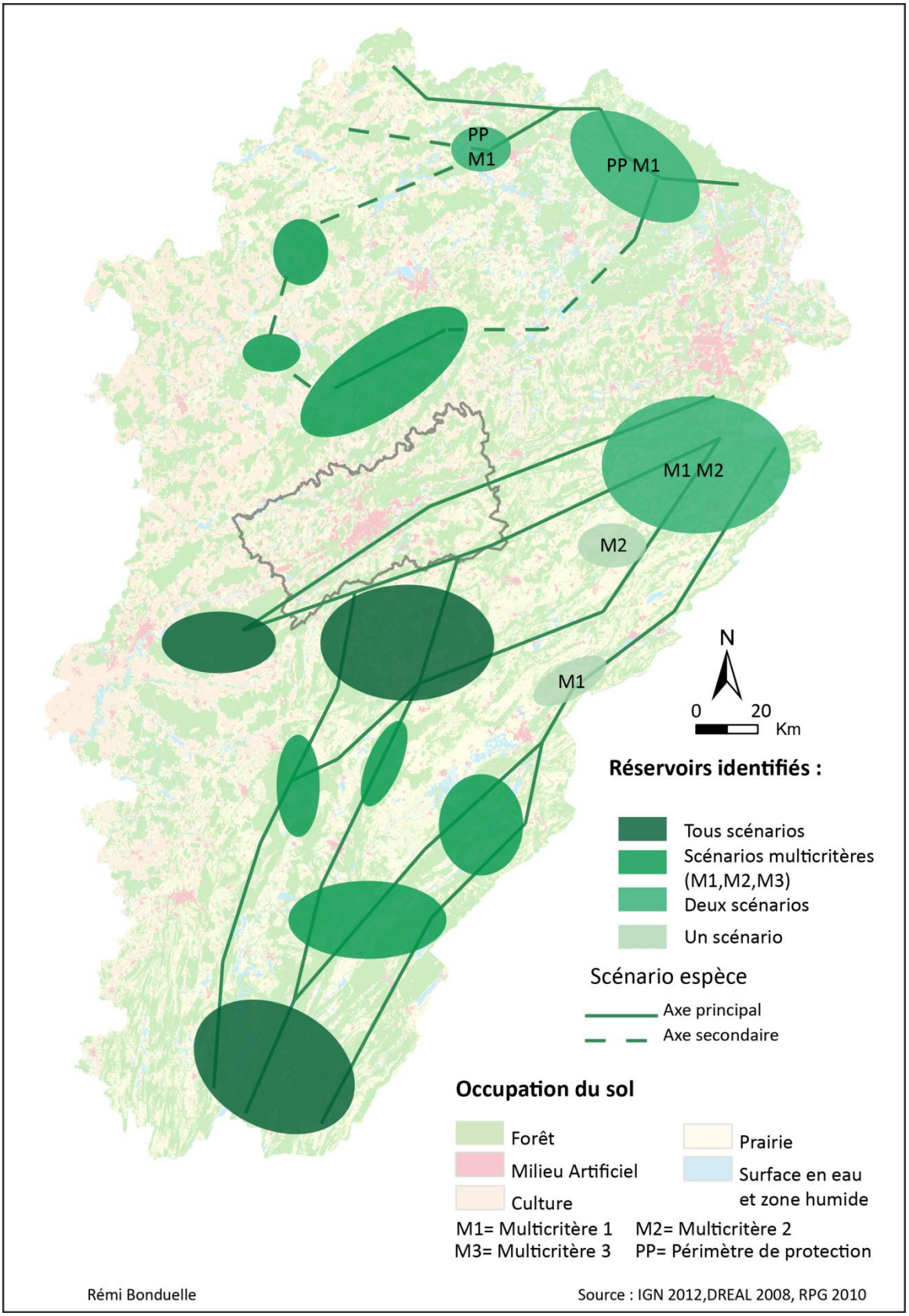


Figure 24 Identification des réservoirs de biodiversité à l'échelle régionale

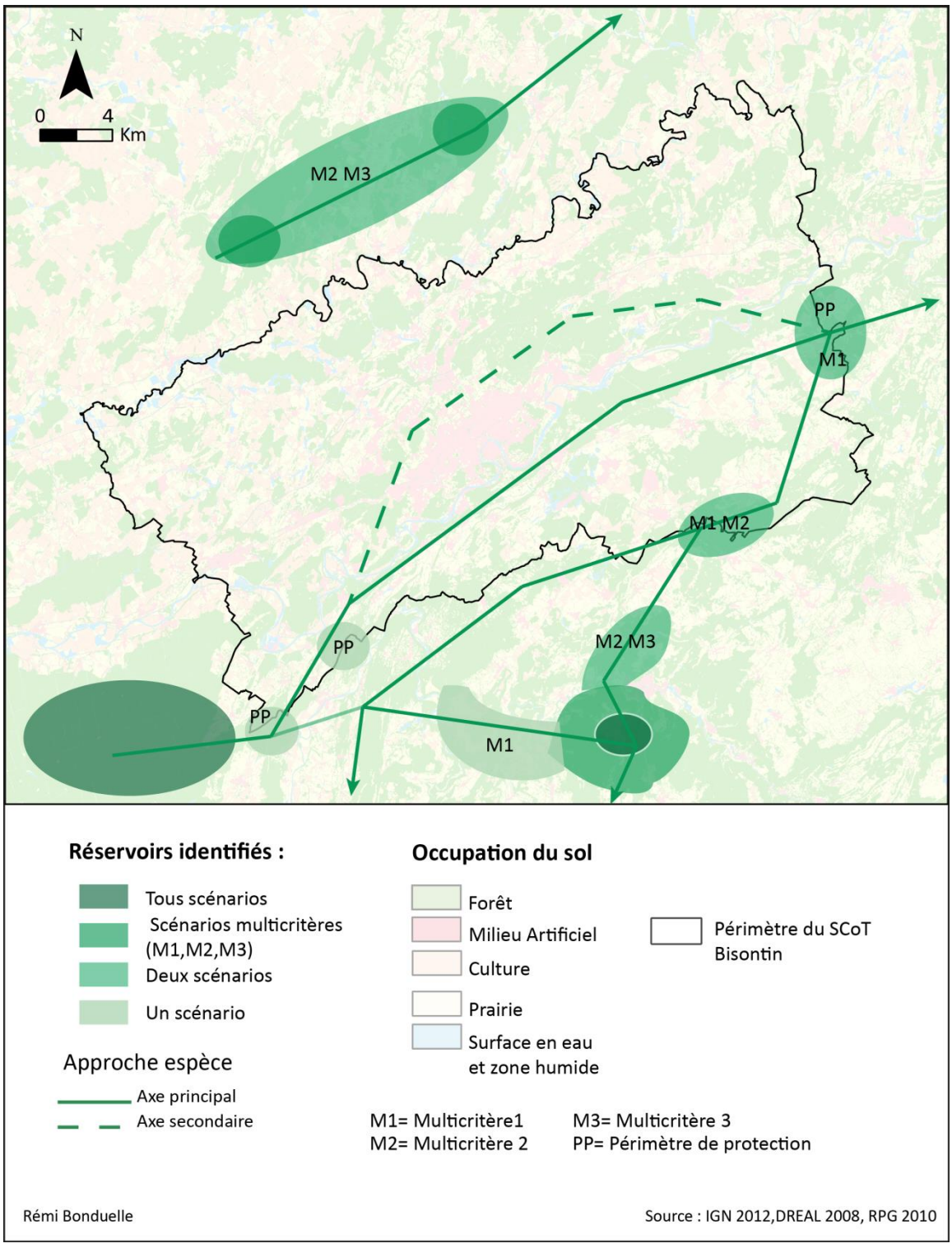


Figure 25 Identification des réservoirs de biodiversité à l'échelle du SCoT Bisontin

L'intérêt des graphes est leur possibilité d'application à toutes les échelles territoriales, l'utilisation de métrique de connectivité permet l'exploitation du graphe à l'échelle régionale et locale du moment qu'elle demeure en cohérence avec l'espèce étudiée. Dans notre cas, le profil d'espèce identifié correspond aux échelles de la région et du SCoT Bisontin. Le calcul par les métriques de connectivité offre la possibilité de déterminer les nœuds les plus importants pour la connectivité selon l'échelle utilisée. Le dPCconn est la métrique appliquée pour définir le rôle d'une tache

d'habitat pour la connectivité globale du réseau. Les aménageurs souhaitant identifier les réservoirs de biodiversité peuvent s'appuyer sur les calculs effectués par ce type de métrique puis hiérarchiser les taches d'habitats de la sous-trame identifiée. Cette métrique est utilisable aussi à l'échelle régionale et locale.

4.2 – Des possibilités à explorer

Pour une démarche opérationnelle, les graphes paysagers apparaissent comme un bon moyen de déterminer les réseaux écologiques. Le calcul de métrique semble être une possibilité pour identification des taches d'habitats pouvant être retenues comme réservoirs de biodiversité. De plus, le processus de modélisation favorise la visualisation des composantes pour la création de réseau écologique. Cependant, cette méthode peut être complétée par des données de terrains, des dires d'experts afin de valider les résultats obtenus.

Les graphes paysagers peuvent également répondre aux besoins d'identification et de création d'autres sous-trames paysagères comme les milieux herbacés, les milieux humides. Mais des précautions doivent être prises quant à l'identification de l'espèce utilisée pour la mise en place de ses différentes sous-trames. Une attention particulière doit être portée sur le choix de l'espèce ou du groupe d'espèces cible pour le milieu identifié, sur les coûts attribués à la carte paysagère et sur les valeurs seuils appliquées lors de la création de graphe seuillé. Ces paramètres doivent être les plus « justes » possible afin que l'approche par les graphes paysagers soit valide. Par ailleurs, des précautions doivent être prises pour l'analyse des métriques notamment lors de la création de la zone d'étude afin de limiter les effets de bord, il est préférable de choisir un périmètre d'étude plus important quand cela est possible.

Lors d'une démarche opérationnelle de type TVB, l'autre composante des réseaux écologiques doit être également déterminée : les corridors. Dans le cadre de ce travail, l'approche par le chemin de moindre coût est critiquable, mais elle offre un bon compromis entre la précision pour l'identification des corridors et un temps de calcul relativement court. D'autres approches peuvent être envisagées permettant de mieux prendre en compte les zones de connexion biologique possible pour l'espèce cible. L'utilisation d'autres méthodes à la théorie des graphes s'avère particulièrement intéressante pour l'identification des corridors, le calcul de ces distances peut être réalisé par la théorie des circuits (McRae et al., 2008). Dans cette étude, un apport supplémentaire pourrait être réalisé sur la modélisation des corridors. L'utilisation des méthodes précédemment cités afin de comparer différentes méthodes de modélisations des corridors à partir d'un même scénario visant à définir les taches d'habitats.

De plus, l'approche par les graphes paysagers peut être utilisée dans d'autres domaines de compétence en lien avec l'aménagement du territoire. L'utilisation des graphes peut donc être intégrer dans une démarche opérationnelle pour définir les réseaux écologiques. Pour développer dans le domaine opérationnel, l'utilisation des graphes paysagers des paramètres techniques extérieurs doivent être pris en considération et les outils développés doivent être accessibles et compréhensibles pour les aménageurs.

Conclusion

Les enjeux de la modélisation des réseaux écologiques sont cruciaux pour permettre de lutter contre la perte de biodiversité due à la fragmentation du paysage. La modélisation par les graphes paysagers peut être l'une des solutions optimales à la représentation cartographique des TVB. Quant à elle, l'utilisation de métrique de connectivité apporte des mesures quantitatives à la réalisation de la démarche donnant l'opportunité aux acteurs du territoire de s'appuyer sur des chiffres pour la mise en place de TVB. Les TVB ont des impératifs dans le temps et dans l'espace qu'elles protègent. Le besoin pour ces documents opérationnels d'être structuré à l'ensemble des échelles du territoire va dans le sens d'une modélisation par les graphes paysagers. L'utilisation des graphes paysagers en écologie est récente Urban an Keitt (2001), cependant cette méthode est encore peu utilisée en aménagement du territoire. Il est nécessaire de communiquer sur les possibilités liées à l'application de la théorie des graphes afin de donner aux aménageurs les clés d'utilisation de cet outil.

Dans ce contexte, les réflexions de ce mémoire autour du sujet ont cherché à montrer: (1) la pertinence de l'application de critères restrictifs pour l'identification des taches d'habitats. (2) la mise en place de scénarii pour l'identification de réservoirs de biodiversité et de corridors écologiques de la sous-trame forestière à l'échelle de la Franche-Comté et du SCoT Bisontin. (3) l'utilisation possible de ces méthodes dans un but opérationnel.

L'application de critères à une démarche espèce a permis l'accentuation de la fragmentation des territoires d'études. Cette fragmentation volontaire des taches d'habitats par l'ajout de zone de perturbation des milieux permet de mieux identifier les taches d'habitats à préserver dans la sous-trame forestière à l'échelle régionale ou locale. Les calculs réalisés à partir des métriques de connectivité (dPCconn) rendent possible la détermination des nœuds à protéger en priorité pour garantir la connectivité de l'ensemble de réseau. Les différents scénarii proposés offrent tous la possibilité de déterminer les taches d'habitats pour l'espèce cible sélectionnée mais la confrontation de ces scénarii permet de mieux visualiser les différentes zones ou axes à enjeux. Cependant, les scénarii privilégiant une connectivité optimale du réseau sont à privilégier. C'est la mise en relation de l'ensemble des taches d'habitats qui permettra de protéger la biodiversité par le maintien d'un réseau écologique structurant et connecté. L'application de ces méthodes a donc permis d'identifier les taches d'habitats essentielles pour la connectivité du réseau. Les graphes paysagers peuvent donc être utilisés pour une démarche opérationnelle visant à l'identification des composantes des réseaux écologiques s'appuyant sur des données quantitatives.

Bibliographie

ADEME et Conseil régional de Franche-Comté (2011). Schéma régional du climat, de l'air et de l'énergie. 174 p

Adriaensen F, Chardon JP, De Blust G, et al. (2003). The application of « least-cost » modelling as a functional landscape model. Landscape and Urban Planning 64(4):233—247.

Agence d'urbanisme de l'agglomération de Besançon, (2011). Etat initial de l'environnement.159 - 199p

Agreste (2014). La statistique agricole : Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt Service Régionale de l'information Statistique et économique : 196 114p.

Allen TFH, Starr TB (1982). Hierarchy. Perspectives for ecological complexity. University of Chicago Press.

Amsallem J, Deshayes M, Bonnevialle M (2010). Analyse comparative de méthodes d'élaboration de trames vertes et bleues nationales et régionales. Sciences Eaux & Territoires (n°3) :40-45

Belmont L, Etienne R, Bordas C (2010). Guide méthodologique de prise en comtpe de la trame verte et bleue SCoT et Biodiversité en Midi-Pyrénées. DREAL Midi-Pyrénnées. 356p. [En ligne] Disponible sur : www.trameverteetbleue.fr/sites/default/files /reference_bibliographiques/ trame_verte_et_bleue_d'urbanisme_-_guide_methodologique.pdf.

Bennett AF (1999). Linkages in the landscape: the role of corridors and connectivity in wildlife conservation. IUCN, Gland, Suisse and Cambridge, Royaume-Unis, 254 p.

Bennett G, and Wit P (2001). The development and application of ecological networks: a review of proposals, plans and programmes. Amsterdam: AIDEnvironment.

Bennett, G. (2004). Integrating biodiversity conservation and sustainable use: lessons learned from ecological networks. Gland, Switzerland and Cambridge, UK: IUCN

Bennett G & Mulongoy K-J (2006). Review of experience with ecological networks, corridors and buffer zones. Montreal: Secretariat of the Convention on Biological Diversity.

Bergsten A, Zetterberg A (2013) To model the landscape as a network: A practitioner's perspective. Landscape and Urban Planning 119: 35-43.

Berthoud G, Lebeau R, Righetti A (2004). Réseau écologique national REN. Rapport final. Berne, 132 p.

Berthoud G (2010) : Guide méthodologique des réseaux écologiques hiérarchisés. 139 p.

Burel F, Baudry J (1999) Écologie du paysage : concepts, méthodes et applications. Tec & doc, Paris, France, 359 p.

Burel F et Baudry J, (2006). Gestion des milieux et des espèces. Mémento de terrain n°83. Pöle de ressources & compétences pour la nature. [En ligne] Disponible sur : ct83.espaces-naturels.fr/ecologie-du-paysage.

Calabrese JM, Fagan WF (2004). A comparison-shopper's guide to connectivity metrics. Frontiers in Ecology and the Environment 2(10):529—536.

Dale MRT, Fortin M-J (2010) From graphs to spatial graphs. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics 41(1):21—38.

Delcourt HR, Delcourt PA (1988). Quaternary landscape ecology: Relevant scales in space and time. Landscape Ecology, 2(1):23—44.

Conseil Régional d'Auvergne, DREAL Auvergne et Ecovia (2014). Schéma Régionale de Cohérence Ecologique. Annexe 2 : Méthodologie d'identification de la Trame Verte et Bleue.53 p.

Conseil régional de Franche-Comté (2013). Actualisation du Schéma Régional d'Aménagement et de Développement durable du territoire de la Franche-Comté. 71 p.

Conseil Régional de Franche-Comté (2014). Schéma Régional de cohérence écologique. Tome 1 : Diagnostic des enjeux régionaux, interrégionaux et transfrontaliers. 243 p.

Conseil Régional de Poitou-Charentes et Agence MIDA (2013). Fiche méthodologique sur la sélection des réservoirs de biodiversité, sous-trames « Forêts et Landes ». 15 p.

DRE, 2000. Atlas des paysages de Franche-Comté : Doubs, Neo Editions, 380p.

Fahrig L (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics, 34: 487–515.

Farina A, (2006). Principles and Methods in Landscape Ecology : Towards a Science of the Landscape. Springer Landscape Series, New York, Etats-Unis, 412 p.

Ferretti V, Pomarico S (2013). Ecological land suitability analysis through spatial indicators: An application of the Analytic Network Process technique and Ordered Weighted Average approach. Ecological Indicators 34: 507– 519

Foley, J-A., DeFries R., Asner G- P., Barford C., Bonan, G, Carpenter, S- R, et al.(2005). Global consequences of land use. Science, 309: 570–574.

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

Forêt Privée Française (2006). Schéma Régional de Gestion Sylvicole. 122 p

Forman RTT, Godron M, (1986). Landscape ecology. J. Wiley & sons, New York, Etats-Unis, 619 p.

Girardet X. (2013). Paysage & infrastructures de transport: modélisation des impacts des infrastructures sur les réseaux écologiques. Thèse de doctorat en géographie, Université de Franche-Comté. 261 p.

Jaffeux H (2010). La longue et passionnante histoire des parcs nationaux français. Revue du comité d'histoire du ministère de l'Ecologie, 9 : 138-163

Jongman R.H, Kristiansen Ib (2001).National and Regional Approaches for Ecological Networks in Europe. Nature and Environment, 18-110.p86

Jolivet L (2014).Modélisation des déplacements d'animaux dans un espace géographique - Analyse et simulation. Thèse de doctorat en géographie, Paris 1 Panthéon Sorbonne.

Loroa M, Ortega E, Arcea RM, Geneletti D (2015). Ecological connectivity analysis to reduce the barrier effect of roads. An innovative graph-theory approach to define wildlife corridors with multiple paths and without bottlenecks. Landscape and Urban Planning 139: 149–162

MacArthur RH, Wilson EO (1967). The theory of island biogeography. Princeton University Press, Princeton, Etats-Unis, 203 p.

McRae B, Dickson BG, Keitt TH, Shah VB (2008) Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. Ecology 89(10):2712—2724.

MEDDE (2013). Trame Verte et bleue- Guide méthodologique. Rapports direction de l'eau et de la biodiversité.54p. [En lligne]
Disponible sur : www.trameverteetbleue.fr/sites/default/files /reference_bibliographiques/ trame_verte_et_bleue_d'urbanisme_-_guide_methodologique.pdf.

Mikel Gurrutxaga, Pedro J. Lozano, Gabriel del Barrio (2010). GIS-based approach for incorporating the connectivity of ecological networks into regional planning. Journal for Nature Conservation, 18: 318–326

Mougenot C, Melin E (2000) Entre science et action: le concept de réseau écologique. Nature Sciences Sociétés 8(3):20—30.

Opdam P., 1990. Dispersal in fragmented populations: the key to survival. In R.G.H. Bunce & D.C. Howard: Species dispersal in agricultural habitats. Belhaven Press., Londres, 3-17.

Opdam P, Foppen R, Vos CC (2001). Bridging the gap between ecology and spatial planning in landscape ecology. Landscape Ecology 16(8):767—779.

Pascual-Hortal L, Saura S (2006) Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the priorization of habitat patches and corridors for conservation. Landscape Ecology 21(7):959—967.

Krauss J, Bommarco R, Guardiola M,…, Steffan-Dewenter I (2010). Habitat fragmentation causes immediate and time-delayed biodiversity loss at different trophic levels. Ecology Letters, 13(5): 597–605

Rayfield B, Fortin M-J, Fall A (2011) Connectivity for conservation: a framework to classify network measures. Ecology 92(4):847—858.

Sacca C, Mazagol P-O, Etlicher B, (2010).Note méthodologique sur les réservoirs de biodiversité. Trame écologique du Massif central, IPAMAC.

Saura S, Pascual-Hortal L (2007) A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: Comparison with existing indices and application to a case study. Landscape and Urban Planning 83(2-3):91—103.

Saura S, Rubio L (2010). A common currency for the different ways in whichpatches and links can contribute to habitat availability and connectivity in thelandscape. Ecography, 33: 523–537.

Sordello R, Comolet-Tirman J, Da Costa H,…, Touroult J (2011). Critères Nationaux de cohérence. Services du Patrimoine Naturel Muséum National d'Histoire Naturelle. 94p.

Sordello R. (2012). Synthèse bibliographique sur les traits de vie du Chat forestier (Felis silvestris Schreber, 1775) relatifs à ses déplacements et à ses besoins de continuités écologiques. Service du patrimoine naturel du Muséum national d'Histoire naturelle. Paris. 10 p.

Sordello R, Rogeon G, Touroult J (2014). La fonctionnalité des continuités écologiques - Premiers éléments de compréhension. Service du patrimoine naturel, Muséum national d'histoire naturelle, Paris. 32 p.

Théau J, Bernier A, Fournier R.A (2015). An evaluation framework based on sustainability-related indicators for the comparison of conceptual approaches for ecological networks Ecological Indicators 52: 444–457.

Turner, M.G., Gardner R.H., and O'Neill R.V. (2001). Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process. Springer, New York. 403 p.

Urban DL, Keitt TH (2001) Landscape connectivity: a graph theoretic approach. Ecology 82(5):1205—1218.

Vos CC, Verboom J, Opdam P, Ter Braak CJ (2001).Toward ecologically scaled landscape indices. The American Naturalist 157(1):24—41.

Wauters L, Verbeylen G, Preatoni D, Martinoli A et Matthysen E (2010). Dispersal and habitat cuing of Eurasian red squirrels in fragmented habitats. Population Ecology 52:527–536

Wauters L, Casale P and Dhondt AA (1994): Space use and dispersal of red squirrels in fragmented habitats. OIKOS69:140-146.

Zalewski A, Jedrzejewski W and Jedrzejewska B (2004): Mobility and home range use by pine martens (Martes martes) in a Polish primeval forest. Ecoscience 11(1):113-122.

Zetterberg A, Mörtberg UM, Balfors B (2010) Making graph theory operational for landscape ecological assessments, planning, and design. Landscape and Urban Planning 95(4):181—191.

Table des illustrations

FIGURE 1 LA CREATION ET L'INTEGRATION DU RESEAU NATURA 2000 EN FRANCE 6
FIGURE 2 LES DIFFERENTS TYPES DE MOUVEMENTS DANS LES RESEAUX ECOLOGIQUES, EXTRAIT DE GIRARDET (2013) 10
FIGURE 3 AMENAGEMENTS DES RESEAUX ECOLOGIQUES, D'APRES BENNETT (2004) 12
FIGURE 4 ARTICULATION DES ECHELLES A LA MISE EN PLACE DES RESEAUX ECOLOGIQUES : DE LA STRATEGIE PAN-EUROPEENNE AUX DOCUMENTS D'URBANISME 16
FIGURE 5 OCCUPATION DU SOL EN FRANCHE-COMTE 22
FIGURE 6 PRINCIPALES UNITES PAYSAGERES EN FRANCHE-COMTE 23
FIGURE 7 OCCUPATION DU SOL DANS LA ZONE D'ETUDE DU SCOT BISONTIN 25
FIGURE 8 TACHES D'HABITATS IDENTIFIEES A PARTIR DES PERIMETRES DE PROTECTION AUX ECHELLES DE LA FRANCHE-COMTE ET DU SCOT BISONTIN 35
FIGURE 9 CRITERE DE PERTURBATION DES ROUTES AUX ECHELLES DE LA FRANCHE-COMTE ET DU SCOT BISONTIN 36
FIGURE 10 CRITERES CUMULES DE PERTURBATION AUX ROUTES ET AUX SURFACES D'ACTIVITES DE LA FRANCHE-COMTE ET DU SCOT BISONTIN 38
FIGURE 11 CRITERES CUMULES DE PERTURBATION ANTHROPIQUES ET EXCLUSION DES FORETS LES MOINS HYDROGRAPHIEES AUX ECHELLES DE LA FRANCHE-COMTE ET DU SCOT BISONTIN 39
FIGURE 12 GRAPHE PAYSAGER DES MAMMIFERES DE LA SOUS-TRAME FORESTIERE EN FRANCHE-COMTE 45
FIGURE 13 GRAPHE PAYSAGER DES MAMMIFERES DE LA SOUS-TRAME FORESTIERE EN FRANCHE-COMTE ISSUES DES PERIMETRES DE PROTECTION 46
FIGURE 14 GRAPHE PAYSAGER DES MAMMIFERES DE LA SOUS-TRAME FORESTIERE EN FRANCHE-COMTE : PERTURBATIONS DES MILIEUX PAR LES ROUTES 48
FIGURE 15 GRAPHE PAYSAGER DES MAMMIFERES DE LA SOUS-TRAME FORESTIERE EN FRANCHE-COMTE : PERTURBATIONS ANTHROPIQUES DES MILIEUX 49
FIGURE 16 GRAPHE PAYSAGER DES MAMMIFERES DE LA SOUS-TRAME FORESTIERE EN FRANCHE-COMTE : FAVORABILITE HYDROLOGIQUE ET PERTURBATIONS ANTHROPIQUES DES MILIEUX 50
FIGURE 17 GRAPHE PAYSAGER DES MAMMIFERES DE LA SOUS-TRAME FORESTIERE DU SCOT BISONTIN 52
FIGURE 18 GRAPHE PAYSAGER DES MAMMIFERES DE LA SOUS-TRAME FORESTIERE DU SCOT BISONTIN ISSUES DES PERIMETRES DE PROTECTION 53
FIGURE 19 GRAPHE PAYSAGER DES MAMMIFERES DE LA SOUS-TRAME FORESTIERE DANS LE SCOT BISONTIN : PERTURBATIONS DES MILIEUX PAR LES ROUTES 55
FIGURE 20 GRAPHE PAYSAGER DES MAMMIFERES DE LA SOUS-TRAME FORESTIERE EN FRANCHE-COMTE : PERTURBATIONS ANTHROPIQUES DES MILIEUX 56
FIGURE 21 GRAPHE PAYSAGER DES MAMMIFERES DE LA SOUS-TRAME FORESTIERE DU SCOT BISONTIN : FAVORABILITE HYDROLOGIQUE ET PERTURBATIONS ANTHROPIQUES DES MILIEUX 57
FIGURE 22 CERCLE DES CORRELATIONS ISSU DES VALEURS DU DPC A L'ECHELLE REGIONALE 59
FIGURE 23 MODELISATION DES CORRIDORS PAR LA METHODE DU CHEMIN DE MOINDRE COUT 61
FIGURE 24 IDENTIFICATION DES RESERVOIRS DE BIODIVERSITE A L'ECHELLE REGIONALE 63
FIGURE 25 IDENTIFICATION DES RESERVOIRS DE BIODIVERSITE A L'ECHELLE DU SCOT BISONTIN 64

Index des tableaux

TABLEAU 1 SELECTION DES ESPECES 31
TABLEAU 2 COUTS ATTRIBUES A L'OCCUPATION DU SOL 32
TABLEAU 3 DISTANCE METRIQUE CONVERTIE EN UNITE DE COUT 33

Tables des matières

Remerciements 1

Introduction 2

1 – Les origines et les concepts des réseaux écologiques 4

1.1- L'origine des systèmes de protection 4

1.1.1 – Création et évolutions de protections nécessaires à la gestion des ressources naturelles et paysagères 4

1.1.2 Les inventaires de protection… 5

1.1.3. … aux réseaux écosystémiques 5

1.2– Les apports de l'écologique du paysage 7

1.2.1 Les théories de l'écologie du paysage 7

1.2.2 Le rôle de la connectivité 7

1.3 – Application des concepts issus des réseaux écologiques à l'aménagement du territoire 11

1.3.1 Les théories issues des réseaux écologiques 11

1.3.2 – Les programmes de protection de l'environnement de l'échelle interrégionale à l'échelle locale. 13

1.3.3 La méthode française de représentation des réseaux écologiques : la trame verte et bleue 14

1.4 - La modélisation des réseaux écologiques 17

1.4.1 L'intérêt de la modélisation par les graphes paysagers 17

1.4.2 – L'apport des graphes paysagers pour les réseaux écologiques : une aide à la gestion des TVB 18

2 – Méthodologie : Contextualisation et présentation de la démarche 20

2.1. Les terrains d'études 20

2.1.1 Deux échelles d'études 20

2.1.2 Un carrefour écologique 26

2.1.3 Un choix : La sous-trame forestière 27

2.2 – Les données d'occupation du sol 29

2.3 - Identification d'un groupe d'espèce 30

2.4 – Modélisation des réseaux écologiques par les graphes paysagers 31

2.4.1 Constructions des graphes paysagers 31

2.4.2 La sélection des réservoirs selon différents types de critères 34

2.4.3 Utilisation des métriques de connectivité pour la comparaison des scénarii 40

2.4.4 Comparaison des scénarii : le rôle des critères d'entrée 42
2.5 Réalisation des corridors de moindre coût 42
3 – Résultats 44
3.1- Identification des réservoirs de biodiversité en Franche-Comté 44
3.1.1 L'approche « espèce » 44
3.1.2 L'approche périmètres de protection 44
3.1.3 L'approche multicritère 47
3.2 Identification des réservoirs à l'échelle du SCoT Bisontin 52
3.2.1 Approche espèce 52
3.2.2 Approche périmètres de protection 53
3.2.3 Approche multicritère 55
3.3 – Synthèse entre les échelles d'analyses 58
3.4-Apport d'une analyse quantitative : ACP 59
3.5- La modélisation des corridors par le chemin de moindre coût 60
4 – Discussion 62
4.1 – Apports des scénarii à l'identification des composantes pour les réseaux écologiques 62
4.2 – Des possibilités à explorer 65
Conclusion 66
Bibliographie 67
Table des illustrations 71
Index des tableaux 71
Tables des matières 72