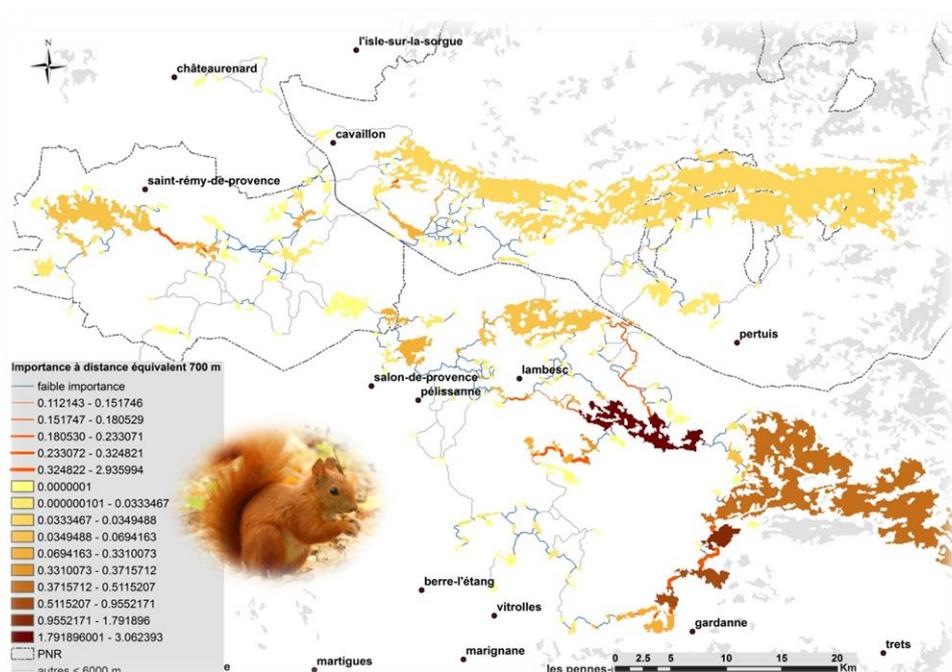


Diagnostic de la connectivité potentielle des trames forestières : cas d'étude en région méditerranéenne (Tâche 2)



Projet J Diacofor – Convention cadre Irstea – MEDDE DEB (2012-2014)

Test d'outils de diagnostic de la connectivité potentielle de la trame forestière

Laurent Bergès & Catherine Avon

UR EMAX - 3275 Route CEZANNE, CS 40061, 13182 AIX EN PROVENCE

Résumé

La trame verte et bleue en France repose sur un principe de conservation et de restauration des continuités écologiques des habitats au regard des exigences écologiques des espèces. En écologie du paysage, les approches issues de la théorie des graphes et les travaux de modélisation des déplacements des espèces par les chemins de moindre coût ouvrent des perspectives pour l'aménagement du territoire et la conservation de la biodiversité. Nous présentons d'abord les modèles de connectivité potentielle basés sur la théorie des graphes en expliquant pourquoi ils permettent de dépasser les approches précédentes. Puis nous illustrons la démarche par un exemple de diagnostic de connectivité potentielle dans la région PACA sur une espèce forestière généraliste, l'Ecureuil roux. Ces modélisations permettent d'identifier les secteurs connectés et ceux qui sont isolés du reste du réseau d'habitats ; elles hiérarchisent l'importance des taches et des corridors entre taches pour maintenir la connectivité globale du réseau ; elles analysent comment la connectivité varie en fonction de la distance de dispersion de l'espèce. Elles permettent de localiser les taches d'habitats et les corridors écologiques qu'il faut préserver en priorité pour maintenir les déplacements des individus au sein du réseau. Ces exemples illustrent en quoi ces nouvelles méthodes peuvent servir d'outils d'aide à la décision pour l'élaboration des trames vertes à différentes échelles spatiales.

Summary

The green and blue infrastructure in France is based on the conservation and restoration of ecological continuity of habitats in relation to species' biological requirements. Recent development in landscape ecology based on graph theory and species movement modelling using least-cost paths offer promising applications in terms of landscape management and biodiversity conservation. First, we present the model of potential connectivity based on graph theory and explain why it overcomes previous approaches. Then, we illustrate with an example of connectivity analysis in the region PACA for the Red Squirrel, a forest generalist species. The models identify the landscape areas that are connected or isolated from the rest of habitat network and prioritize the importance of patches and corridors; they analyse how connectivity varies according to species dispersal distance. They highlight the most important habitat patches and ecological corridors that must be protected to maintain habitat network connectivity. These examples clearly show that these original methods can form valuable decision support tools for the implementation of green infrastructures at different spatial scales.

Sommaire

Résumé.....	2
Summary.....	2
1 Introduction	4
2 Méthode d'analyse de la connectivité écologique	5
2.1 Apport des approches issues de la théorie des graphes	5
3.1 Les différentes étapes d'un diagnostic de connectivité potentielle.....	6
3 Diagnostic de connectivité potentielle aux échelles infrarégionale et régionale : cas d'une espèce forestière : l'écureuil roux.....	7
3.1 Choix de l'espèce et des échelles spatiales	7
3.2 Occupation du sol en région PACA.....	8
3.2 Définition de l'habitat pour l'Ecureuil roux.....	8
3.3 Modélisation des déplacements entre taches.....	9
3.4 Analyse de connectivité potentielle du réseau d'habitat	12
3.5 Diagnostic à l'échelle infrarégionale	13
3.6 Diagnostic à l'échelle régionale	18
4. Synthèse des diagnostics et cohérence entre échelles.....	27
5. Conclusions et perspectives	28
6. Références bibliographiques	29

1 Introduction

La connectivité écologique est devenue l'une des préoccupations majeures pour les politiques publiques d'aménagement du territoire et de conservation de la biodiversité pour répondre à la perte et à la fragmentation des habitats naturels engendrées par l'augmentation des pressions anthropiques (artificialisation des terres, intensification des pratiques de gestion...). La connectivité représente le degré selon lequel le paysage facilite ou contraint le mouvement des espèces (gènes, individus) entre taches d'habitats favorables (Taylor *et al.*, 1993).

La politique TVB a pour objectif de "rétablir les flux d'espèces de faune et de flore sauvages entre les zones de haute valeur écologique". Plusieurs guides méthodologiques ont été élaborés et fournissent des recommandations pour bâtir ces réseaux écologiques, avec une volonté affichée de cohérence entre les échelons locaux (SCoT), régionaux (SRCE) et national (Allag-Dhuisme *et al.*, 2010a).

Pourtant, la mise en œuvre de la TVB en France repose souvent sur des analyses cartographiques assez sommaires (zonage des habitats, zonage de la présence des espèces) et des analyses spatiales simples pour la détermination des continuités écologiques (méthode d'érosion-dilatation). Les méthodes utilisées manquent de reproductibilité et n'intègrent que très partiellement les concepts d'écologie du paysage.

Or, l'enjeu pour la construction des trames est bien de passer d'une simple analyse descriptive du paysage à une analyse fonctionnelle du paysage, tenant compte de l'écologie des espèces et de leurs capacités de dispersion (Garcia-Feced *et al.*, 2011).

La question centrale pour l'aménagement du territoire peut se formuler ainsi (Theobald *et al.*, 2000 ; Gurrutxaga *et al.*, 2010 ; Foltête *et al.*, 2014) : où doit-on agir de manière efficace au niveau d'un territoire pour maintenir ou restaurer la biodiversité ? Cette question générale peut être décomposée en trois points :

- (1) quelles taches et corridors sont importants pour la connectivité d'une espèce, c'est-à-dire quelles taches ou corridors faut-il conserver en priorité ?
- (2) où faut-il modifier le réseau écologique d'une espèce pour améliorer sa connectivité globale (restauration de taches ou de corridors entre taches) ?
- (3) quels vont être les impacts d'un changement d'occupation du sol ou d'une autre pression sur le réseau écologique d'une espèce (mesures d'aménagement) ?

Dans ce projet, nous présentons les approches récentes d'analyse de la connectivité écologique qui permettent d'aller plus loin que toutes les autres démarches et constituent de véritables outils d'aide à la décision pour les aménagistes et les gestionnaires. Dans ce rapport, nous détaillons un diagnostic de connectivité potentielle d'un réseau d'habitat (point 1 ci-dessus) mais n'abordons pas les deux autres points, qui nécessitent des analyses complémentaires. L'approche "théorie des graphes appliquée à l'écologie du paysage" a déjà été présentée en détail dans le rapport d'avancement Année 1 (Avon & Bergès, 2013). Cependant, nous en reprenons les points essentiels pour bien comprendre les différentes étapes de la démarche. Nous appliquons un diagnostic de connectivité potentielle à l'Ecureuil roux en région méditerranéenne à deux échelles spatiales emboîtées :

- (1) au niveau infrarégional dans un contexte d'habitat assez fragmenté (5100 km²) ;
- (2) à l'échelle de l'ensemble de région PACA (31400 km²).

Ces diagnostics de connectivité potentielle à deux échelles spatiales emboîtées permettent d'alimenter les réflexions sur la cohérence des trames à différentes échelles spatiales (PLU, SCoT, SRCE, TVB national).

2 Méthode d'analyse de la connectivité écologique

2.1 Apport des approches issues de la théorie des graphes

Les méthodes développées pour mesurer la connectivité des habitats peuvent être classées en trois grandes catégories : connectivité structurelle, réelle et potentielle. D'un côté du gradient, la connectivité structurelle a pour objet le paysage puisqu'elle repose sur l'analyse des attributs paysagers : la mise à disposition d'images aériennes et satellites et l'utilisation de Systèmes d'Information Géographique (SIG) de plus en plus élaborés ont permis d'établir des cartographies et de calculer des données d'habitat spatialement explicites sur de grandes surfaces (ex. taille des habitats, nombre de taches, taille d'habitat-cœur, longueur de lisières...). La connectivité structurelle est la plus facile à collecter, mais a un intérêt très limité puisqu'elle ne tient pas compte des caractéristiques et des besoins de l'espèce. La méthode de dilatation-érosion telle qu'exposée dans le Guide 2 du COMOP TVB peut être considérée comme de la connectivité structurelle, dans le sens où c'est la trame qui est mise en avant plus que les spécificités de l'espèce (Allag-Dhuisme *et al.*, 2010b). Cette méthode raisonne à l'échelle du voisinage de la tache mais pas au niveau du paysage global et ignore en grande partie l'écologie de l'espèce (qualité de l'habitat, capacité de dispersion selon la nature de la matrice).

De l'autre côté du gradient, la connectivité réelle repose sur l'observation des déplacements d'individus entre les taches, et donc sur une estimation réelle des liaisons entre les taches. La connectivité réelle, la plus informative, est aussi la plus coûteuse et la plus lourde à étudier, et ne peut être envisagée qu'à petite échelle. Elle s'appuie classiquement sur la radio-téléométrie établissant le cheminement des individus, des méthodes de capture-marquage-recapture, ou des mesures du taux de colonisation ou d'immigration au niveau de la tache. Elle peut aussi s'appuyer sur des données de génétique des populations qui renseignent sur la dispersion déjà réalisée des individus.

Entre ces deux types de connectivité, la connectivité potentielle, intermédiaire entre les deux précédentes, combine des attributs paysagers et une information plus limitée sur l'espèce notamment sa capacité de dispersion. L'analyse de la connectivité potentielle a connu ces dernières années d'importantes avancées grâce au développement d'outils performants et la formalisation de différents concepts. En particulier, la théorie des graphes appliquée à l'écologie du paysage constitue un bon compromis entre nature et quantité des données à intégrer dans la modélisation, temps de calcul et pertinence de l'information fournie en terme de connectivité (Calabrese & Fagan, 2004). L'habitat de l'espèce est représenté par un ensemble de nœuds (les taches d'habitat) qui sont reliés entre eux par des liens représentant la dispersion des individus, le tout constituant un graphe (Urban & Keitt, 2001). La vision adoptée est celle d'un réseau d'habitats pour une région donnée dont on cherche à mesurer la connectivité pour une espèce (ou un ensemble d'espèces). La connectivité du paysage dépend non seulement de la quantité et de la structuration de l'habitat dans le paysage, mais aussi de la capacité de l'espèce à l'utiliser.

Pascual-Hortal et Saura (2006) ont ainsi établi le concept d'habitat disponible ou atteignable, tenant compte à la fois de la connectivité intra-tache et de la connectivité inter-tache : d'une part, la taille et la qualité intrinsèque de la tache d'habitat contribuent au maintien de la population locale, et d'autre part les liaisons entre les taches d'habitat permettent les échanges d'individus (et de gènes), autorisent l'accès à d'autres ressources et facilitent la dispersion sur une plus longue distance, l'ensemble assurant la viabilité de la population à l'échelle du réseau d'habitat. La mise au point d'un ensemble d'indices rendant compte des propriétés fonctionnelles du réseau, et non plus seulement de ses propriétés topologiques, constitue une avancée méthodologique majeure pour analyser le degré de connectivité écologique d'un paysage (Saura & Pascual-Hortal, 2007b ; Saura & Rubio, 2010 ; Avon & Bergès, 2013). Ces indices permettent aussi de mesurer les changements de connectivité s'opérant en fonction des pressions anthropiques exercées sur le paysage : modification de l'occupation du sol, intensification des pratiques, création d'infrastructures

linéaires de transport, changements climatiques (Pascual-Hortal & Saura, 2008 ; Fu *et al.*, 2010 ; Gurrutxaga *et al.*, 2011 ; Clauzel *et al.*, 2013 ; Girardet *et al.*, 2013 ; Gurrutxaga & Saura, in press).

Un atout essentiel de ces indices réside dans la possibilité d'identifier les taches ou les liens les plus importants pour maintenir ou améliorer la connectivité globale du réseau pour une espèce (Urban *et al.*, 2009 ; Galpern *et al.*, 2011). C'est pourquoi ils sont de plus en plus utilisés dans les travaux de conservation et de restauration des réseaux d'habitats (Gurrutxaga *et al.*, 2011 ; Clauzel *et al.*, 2013 ; Girardet *et al.*, 2013). Combinée à d'autres approches existantes sous SIG, la démarche constitue un outil prometteur d'aide à la décision pour les gestionnaires, les aménagistes et les décideurs afin d'orienter les choix d'aménagement du territoire et les mesures de conservation, et prioriser les actions à une échelle plus locale : études écologiques fines, aménagement d'infrastructures, mesures de gestion adaptées (Foltête *et al.*, 2014).

2.1 Les différentes étapes d'une analyse de connectivité potentielle

Pour quantifier la connectivité potentielle, le logiciel Conefor (www.conefor.org/, Saura & Torné, 2009) nécessite en entrée des données sur la connectivité structurelle (organisation spatiale des taches d'habitat) et sur les capacités de dispersion des espèces analysées (Figure 1). Les informations requises par Conefor comportent deux fichiers au format texte (un fichier de nœuds et un fichier de connexions) et d'autres paramètres que l'utilisateur doit spécifier dans l'interface du logiciel.

Le fichier de nœuds contient la liste des taches d'habitat existant dans le paysage et leurs attributs. L'attribut d'un nœud est la caractéristique qui est considérée comme pertinente pour l'analyse, à savoir : la superficie de l'habitat, la qualité de l'habitat, la qualité pondérée par la surface ou encore d'autres attributs (densité de population, surface d'habitat-cœur, capacité de charge).

Le fichier de connexions contient les informations nécessaires pour caractériser les liens entre chaque paire de nœuds dans le paysage, et peut se présenter de trois manières différentes : (1) fichier de lien, (2) fichier de distance ou (3) fichier de probabilité.

(1) le fichier de lien représente un modèle binaire de connexion : une connexion existe entre deux nœuds qui sont séparés par une distance inférieure à la distance de dispersion seuil spécifiée par l'utilisateur ;

(2) le fichier de distance est le moyen le plus courant pour les utilisateurs standard, qui indique la distance entre toutes les paires de nœuds. Ces distances peuvent être des distances euclidiennes (linéaire) ou des distances effectives (distance de moindre coût) qui tiennent compte des différentes capacités de mouvement et du risque de mortalité d'une espèce pour traverser les différents types d'occupation du sol (Adriaensen *et al.*, 2003 ; Theobald, 2006). Le logiciel autorise la saisie d'un fichier de connexion partiel (seules les paires de nœuds directement liées sont renseignées, les autres étant considérées comme non connectées) ;

(3) dans le modèle de connexion probabiliste, le logiciel calcule automatiquement les probabilités de dispersion entre toutes les paires de nœuds à partir d'une fonction exponentielle décroissante de la distance entre les nœuds (Saura & Pascual-Hortal, 2007b). La fonction utilisée est définie par l'utilisateur en précisant la valeur de probabilité de dispersion pour une certaine distance. L'utilisateur peut aussi calculer les probabilités de dispersion sans passer par le logiciel ou les mesurer directement par un suivi des déplacements entre taches ou des méthodes de capture-recapture, et les fournir ensuite en tant que fichier de probabilité d'entrée dans Conefor.

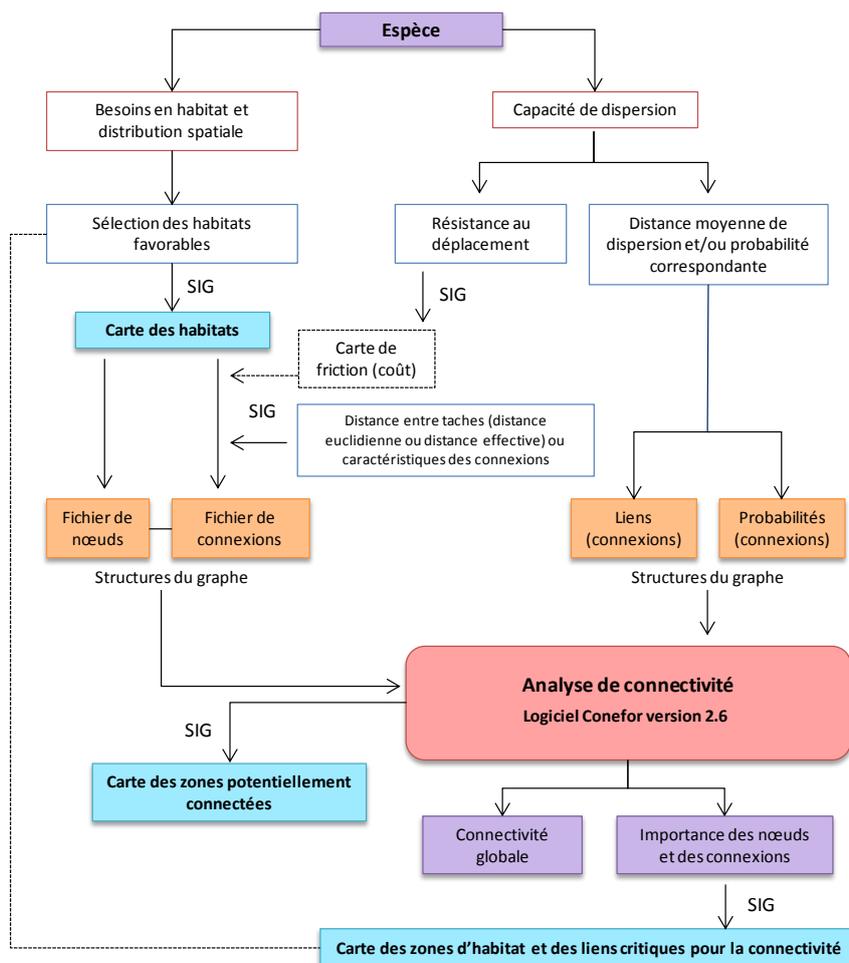


Figure 1. Schéma de la démarche d'analyse de connectivité potentielle d'un réseau de taches d'habitat pour une espèce avec le logiciel Conefor (tiré de Saura & Torné, 2009).

3 Diagnostic de connectivité potentielle aux échelles infrarégionale et régionale : cas d'une espèce forestière : l'écureuil roux

3.1 Choix de l'espèce et des échelles spatiales

L'analyse de connectivité potentielle a été appliquée à l'Écureuil roux (*Sciurus vulgaris* L. 1758), qui est un mammifère forestier généraliste : les choix faits dans les différentes étapes de l'analyse pour cette espèce peuvent s'appliquer à un ensemble d'autres espèces forestières¹. La démarche a été construite sur la base de la bibliographie, en mettant l'accent sur les articles scientifiques traitant de la connectivité des habitats pour l'écureuil, des effets du paysage environnant et de la codification de la résistance du paysage (Verbeylen *et al.*, 2003a ; Verbeylen *et al.*, 2003b ; Verbeylen *et al.*, 2009 ; Wauters *et al.*, 2010).

Dans un premier temps, nous avons modélisé la connectivité potentielle pour l'Écureuil roux dans l'ouest de la région PACA (≈5100 km²), comprenant le PNR² des Alpilles à l'ouest, le PNR du Lubéron au nord et la Montagne Sainte-Victoire au sud-est (rectangle rouge sur la Figure 2). Cette zone dispose d'un couvert forestier plus faible que l'ensemble de la région

¹ Il faut veiller à ce que les préférences d'habitats, la distance de dispersion et la capacité de dispersion à travers la mosaïque d'habitats soient proches pour assimiler d'autres espèces aux résultats de l'analyse réalisée pour l'écureuil.

² Parc naturel régional.

PACA (et où la surface d'habitat potentiel pour l'Ecureuil roux représente 8% de la surface totale), de larges plaines agricoles et urbanisées, et de nombreuses infrastructures à fort impact sur les déplacements d'espèces (LGV, autoroutes, lit et canal de la Durance). Cette analyse à une échelle infrarégionale permet d'identifier finement les zones d'habitat restant isolées du reste du réseau et les éléments charnières permettant le maintien des flux d'individus entre populations.

Ensuite, nous avons étendu la modélisation pour la même espèce à l'ensemble de la région PACA, soit une zone de 31400 km² sur laquelle la surface d'habitat de l'espèce représente 26,5% (Figure 2). La modélisation a été effectuée à partir des mêmes fonds cartographiques (donc de même résolution) et en suivant la même démarche, permettant de dresser une image de la connectivité du réseau d'habitat à plus large échelle.

3.2 Occupation du sol en région PACA

D'après la carte d'occupation du sol "ocsol 2006"³ (www.crige-paca.org/), la forêt constitue la première occupation du sol en région PACA (37,8%, Tableau 1). L'urbain continu et discontinu représente 3,1% et le bâti diffus, très caractéristique de la région PACA, couvre près de 2,3%. Le réseau routier et ferroviaire et ses dépendances couvrent une faible surface (0,3%) comme les cours et voies d'eau (0,3%). Les autres occupations majeures sont les maquis et garrigues (10,3%), les pelouses et pâturages (6,5%) la végétation clairsemée (6,5%) et la forêt et la végétation arbustive en mutation (5,9%). On peut noter que les zones incendiées ne représentent qu'une infime surface (0,01%) à la date de la carte.

Tableau 1. Taux de couverture des différents types d'occupation du sol en région PACA selon la carte "ocsol 2006" (nomenclature CRIGE PACA). Les types sont rangés par ordre croissant de numérotation.

Code	Intitulé CRIGE PACA 2006	Taux de couverture
111	Tissu urbain continu	0,2%
112	Tissu urbain discontinu	2,9%
113	Bâti diffus	2,3%
121	Zones industrielles ou commerciales	0,7%
122	Réseau routier et ferroviaire et espaces associés	0,3%
311	Forêts de feuillus	12,8%
312	Forêts de conifères	19,8%
313	Forêts mélangées	5,2%
321	Pelouses et pâturages naturels	6,5%
322	Landes subalpines	0,9%
323	Maquis et garrigues	10,3%
324	Forêts et végétation arbustive en mutation	5,9%
332	Roches nues	4,3%
333	Végétation clairsemée	6,5%
334	Zones incendiées	0,01%
511	Cours et voie d'eau	0,3%

3.2 Cartographie de l'habitat potentiel de l'Ecureuil roux

Tout d'abord, les taches d'habitat et la distance entre les taches ont été préparées sous SIG (Figure 2) : l'habitat de l'écureuil a été défini à l'échelle de la région PACA comme les taches forêt de plus de 10 ha (codes 311, 312 et 313), situées à moins de 2100 m d'altitude et couverte à 100% par la forêt sur un pixel de 100 m de résolution. L'habitat potentiel de l'espèce représente 8417 km², soit 26,5% du territoire étudié.

³ Cette carte est une carte dérivée de la couverture Corine Land Cover à une résolution plus fine et qui intègre de types d'occupation du sol spécifiques à la région, comme le bâti diffus (code 113).

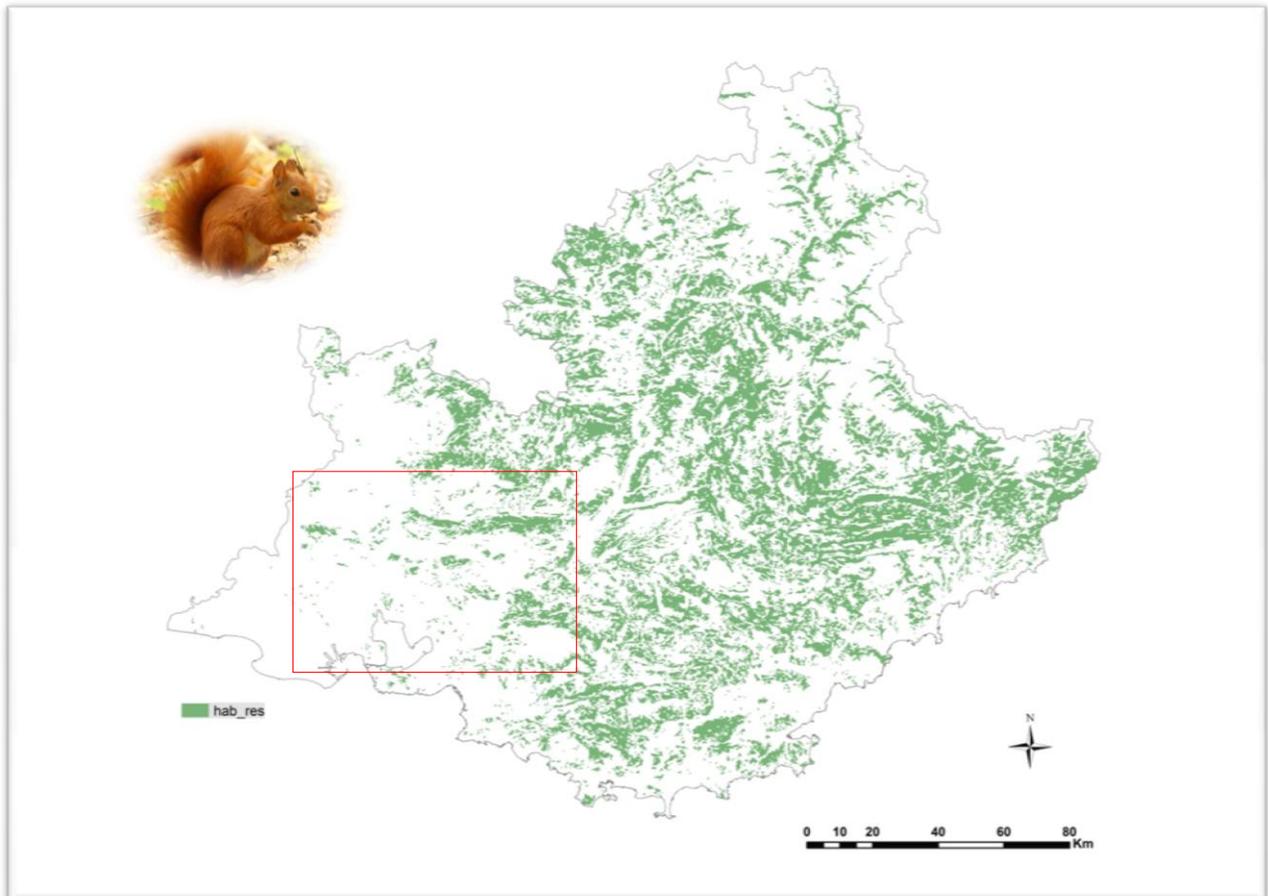


Figure 2. Carte de l'habitat potentiel de l'Écureuil roux (*Sciurus vulgaris* L. 1758) sur la région PACA. L'habitat de l'écureuil a été défini à l'échelle de la région PACA comme les taches forêt de plus de 10 ha (code 311, 312 et 313), situées à moins de 2100 m d'altitude et couverte à 100% par de la forêt sur un pixel de 100 m de résolution. Le rectangle rouge localise la zone d'analyse infrarégionale.

3.3 Modélisation des déplacements entre taches

Nous avons analysé une gamme de dispersion, ce qui a plusieurs avantages : (a) tenir compte de la disparité de l'information ou de l'incertitude sur la distance de dispersion, (b) recouvrir plusieurs types de dispersion (juvénile ou autre), (c) appliquer les résultats aux autres espèces entrant dans la gamme de dispersion, et (d) analyser les changements de connectivité du réseau selon la distance de dispersion (Saura & Rubio, 2010).

La distance de dispersion de l'écureuil est bien renseignée dans la littérature, et nous avons retenu 5 distances allant de 200 m (déplacements journaliers) à 6000 m (distance maximale des individus dispersant loin), 700 m étant la médiane de dispersion de l'écureuil. Les liens potentiels entre taches sont donc retenus pour des taches distantes au maximum de 6000 m. Le paysage en dehors des taches d'habitat n'est pas une simple matrice hostile mais une mosaïque d'habitats dans laquelle l'espèce disperse plus ou moins facilement. L'espèce atteindra d'autant plus facilement une autre tache que le parcours pour l'atteindre sera court et peu coûteux (reflet de l'énergie dépensée, de la mortalité...). Il est donc préférable de tenir compte d'une distance de coût plutôt que d'une distance euclidienne entre taches (Verbeylen *et al.*, 2003a ; Magle *et al.*, 2009 ; Fu *et al.*, 2010 ; Gurrutxaga *et al.*, 2011).

La carte d'habitat est donc convertie en carte de friction en attribuant un coefficient de résistance à chaque type d'habitat, sur la base de la bibliographie (Adriaensen *et al.*, 2003). Nous avons utilisé un travail préalable (Verbeylen *et al.*, 2003a) en adaptant les informations fournies à la nomenclature régionale "ocsol". L'étude citée avait évalué la performance du codage de la friction des différents types d'occupation du sol en testant quelles combinaisons

de codages de friction prédisaient au mieux la présence de l'espèce, par comparaison de modèles statistiques. Dans le cas où aucune étude préalable n'est disponible, le codage de la friction peut être réalisé par avis d'expert ou par comparaison avec d'autres espèces proches. Mais dans ce cas, un test de sensibilité des coefficients de friction utilisé est nécessaire pour vérifier la stabilité des résultats (par ex. en faisant varier de $\pm 50\%$ la valeur chaque coefficient).

Pour l'Ecureuil roux, nous avons obtenu une carte de coût en cinq classes (1, 10, 300, 800 et 1000), où une friction de 1 est attribuée à l'habitat de l'espèce et une friction de 1000 est affectée aux zones les plus difficiles à traverser pour l'écureuil : autoroutes, urbain dense, neiges éternelles,... (Figure 3 et Figure 7). Un coefficient de 10 à 800 a été affecté aux autres types d'occupation du sol selon que ceux-ci étaient végétalisés et contenaient des arbres. A partir de cette carte, un calcul de chemin de moindre coût (cmc) a été effectué sous SIG pour fournir la distance de coût entre toutes les taches d'habitat (Figure 4).

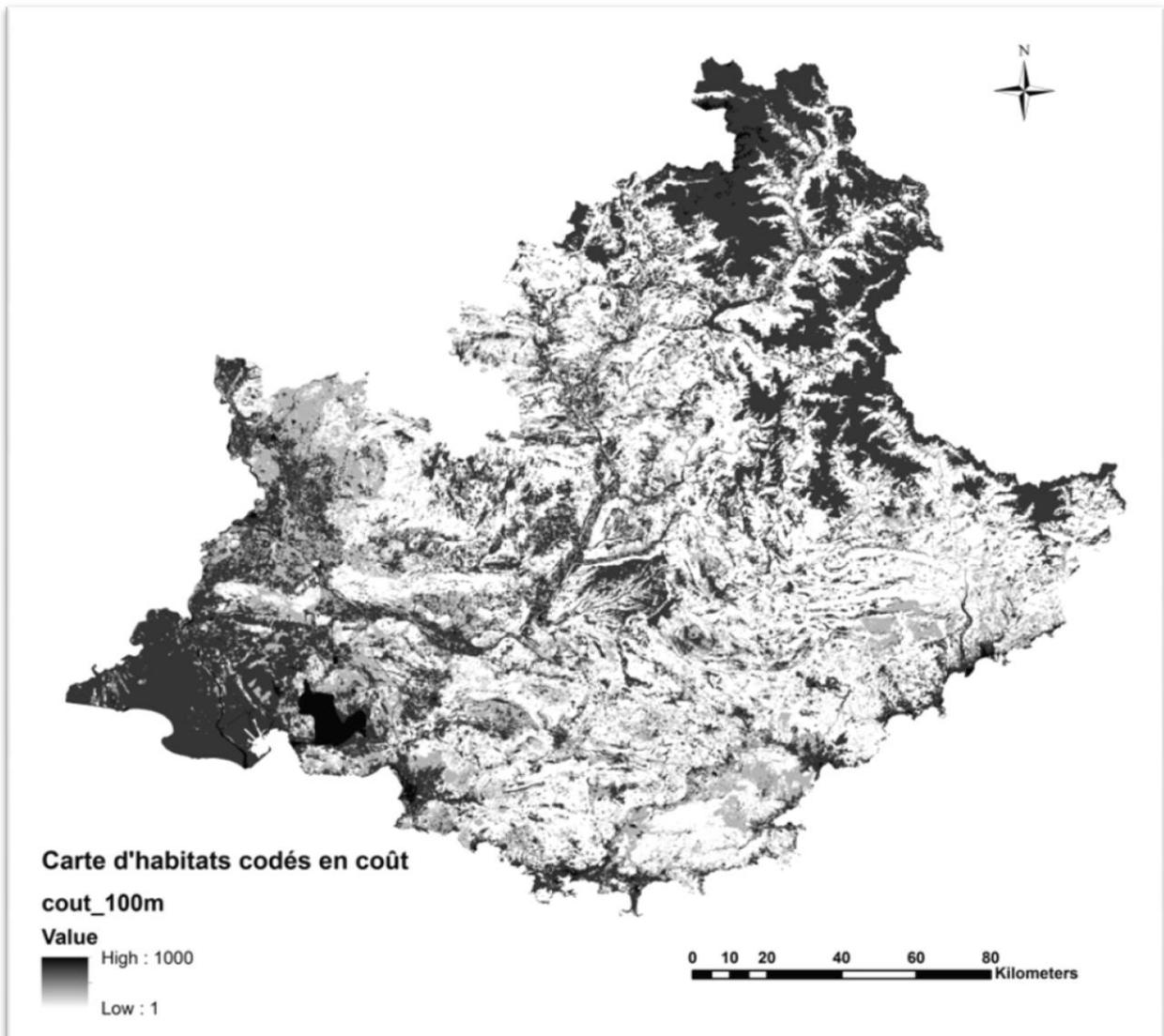


Figure 3. Carte de résistance au déplacement pour l'Ecureuil roux à l'échelle de la région PACA. Le coût de déplacement est représenté par un dégradé de blanc à noir reflétant un gradient croissant de difficulté de déplacement selon l'habitat de la typologie "ocsol 2006" : une friction de 1 (zones en blanc) a été attribuée à l'habitat de l'espèce et une friction de 1000 (zones en noir) aux zones les plus difficiles à traverser (autoroutes, urbain dense notamment).

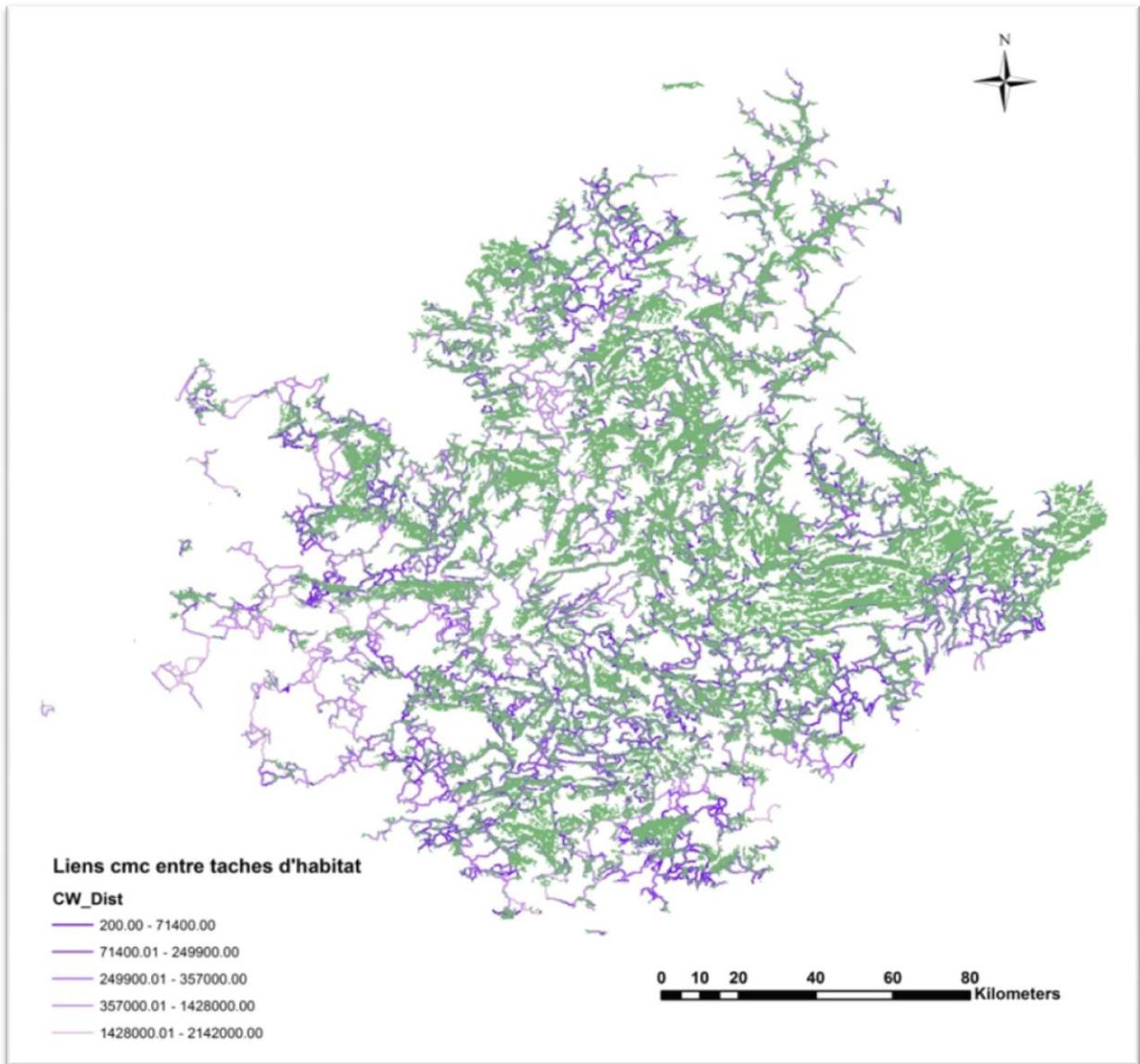


Figure 4. Carte des chemins de moindre coût (cmc) entre les taches d'habitat potentiel pour l'Ecureuil roux à l'échelle de la région PACA. Les cmc courts sont représentés en figuré foncé et les cmc longs sont représentés en figuré clair. Sont représentés les cmc entre taches situées à moins de 6000 m en distance équivalente de coût. L'échelle des valeurs de distance affichées correspond aux distances de coût, c'est-à-dire qu'elles intègrent la résistance du paysage : un déplacement sur la carte de 1 m dans une occupation du sol ayant une friction de 1 équivaut à une distance de coût de 1, alors qu'un déplacement de 1 m dans une occupation du sol ayant une friction de 1000 équivaut à une distance de coût de 1000.

3.4 Analyse de connectivité potentielle du réseau d'habitat

Les taches⁴ et les liens sous forme de distances de moindre coût sont injectés dans le logiciel Conefor pour analyser la connectivité potentielle, selon les différentes distances de dispersion (Figure 5). Le logiciel calcule un indice global de connectivité pour l'ensemble du réseau et la contribution de chaque tache à la connectivité globale. Dans cette analyse, nous avons utilisé l'indice intégral de connectivité *IIC* (Pascual-Hortal & Saura, 2006), qui considère les connections établies (en deçà d'un certain seuil de distance) entre deux taches *i* et *j* au sein d'un paysage de surface A_L : le calcul du *IIC* tient compte de la taille des taches (a_i et a_j), et du nombre de liens pour le plus court chemin les reliant (nl_{ij}), selon la formule suivante :

$$IIC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i a_j}{1 + nl_{ij}}}{A_L^2} \quad (1)$$

La contribution de chaque tache *k* à la connectivité globale du réseau est calculée par la différence relative entre la valeur du réseau intact *IIC* et la valeur du réseau après enlèvement de la tache *IIC'* ($dIIC_k$).

Ensuite, cette valeur $dIIC_k$ est elle-même décomposée selon les trois rôles distincts d'une tache qui intègrent dans un même cadre conceptuel quantité et structuration spatiale de l'habitat (Saura & Rubio, 2010) : la contribution à la connectivité intra-tache, c'est-à-dire la capacité d'habitat ($dIIC_{intra}$), la contribution aux flux entre taches, c'est-à-dire la capacité d'émettre ou recevoir des individus ($dIIC_{flux}$), et la contribution comme relais ("stepping stones"), c'est-à-dire le rôle de la tache comme étape dans la dispersion ($dIIC_{conn}$).

$$dIIC_k = dIIC_{intra_k} + dIIC_{flux_k} + dIIC_{conn_k} \quad (2)$$

- $dIIC_{intra_k}$ ne tient compte que des qualités intrinsèques de la tache *k* et correspond à $a_i a_j$ où $i = j$ dans l'équation (1), c'est-à-dire a_k^2 ; $dIIC_{intra_k}$ est donc le même que la tache soit connectée ou isolée ;

- $dIIC_{flux_k}$ dépend à la fois de l'attribut de la tache *k* et de sa position au sein du réseau et correspond à la somme des $\frac{a_i a_j}{1 + nl_{ij}}$ dans l'équation (1) où $i \neq j$. Les liens n'entrent pas en ligne de compte en tant que tels dans le sens où c'est le rôle d'habitat émetteur ou d'habitat récepteur qui est évalué, à savoir si la tache *k* est bien reliée aux autres taches du réseau ;

- $dIIC_{conn_k}$ au contraire mesure si la tache ou le lien *k* contribue à connecter le réseau, donc ne dépend que de la position de la tache/liens *k* dans le réseau. Ceci correspond donc à une partie de la somme des $\frac{a_i a_j}{1 + nl_{ij}}$ dans l'équation (1) où $i \neq k \neq j$. La tache ou le lien *k* contribue seulement s'il fait partie du meilleur chemin reliant *i* et *j* (donné par nl_{ij}).

L'importance respective de chaque part de l'indice varie selon que la connectivité ou au contraire la quantité d'habitat compte beaucoup pour l'espèce et selon les facultés de dispersion de celle-ci.

⁴ Dans notre analyse, la tache est caractérisée par sa surface, mais des indices de qualité d'habitat plus fins peuvent être employés.

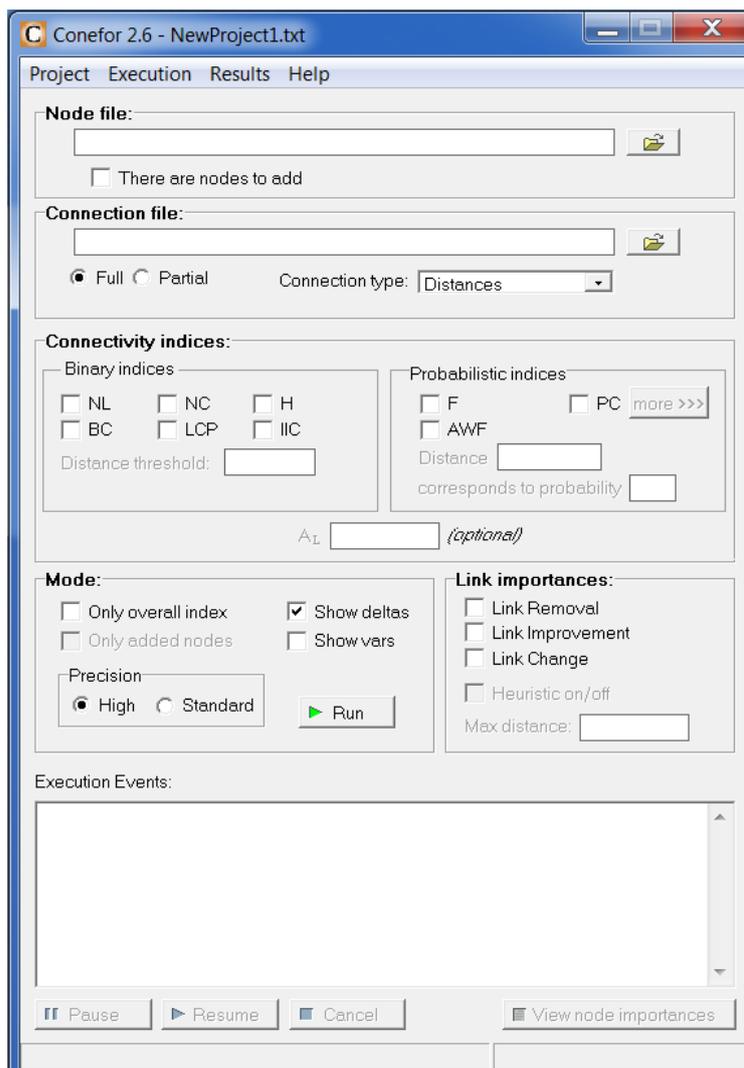


Figure 5. Interface du logiciel Conefor 2.6 (Saura & Torné, 2009) montrant les données d'entrée (fichiers de nœuds et de liens), les différentes options de calcul (types d'indices, choix de calcul) et les différentes sorties possibles (calcul de l'indice total, des deltas, de l'importance des liens). Les fichiers de sortie sont sauvegardés dans le répertoire de travail choisi.

3.5 Diagnostic à l'échelle infrarégionale

A cette échelle, le diagnostic de connectivité a porté sur 194 taches et 216 connexions effectives⁵ entre taches pour une distance équivalente de coût de 700 m.

Les informations issues du diagnostic de connectivité pour une distance de coût équivalente à 700 m ont été synthétisées sur la Figure 6. Les taches d'habitat intégrées dans l'analyse de connectivité sont figurées en dégradé de jaune à marron foncé selon l'importance croissante de la tache pour la connectivité globale du réseau ($dIIC_{conn}$). Les taches non conservées dans l'analyse sont figurées en gris. Seuls les 15% de liens les plus importants comme éléments connecteurs assurant les déplacements des individus entre taches sont représentés avec un figuré orange, d'autant plus épais que leur contribution est élevée. En bleu, figurent les liens de moindre importance et en gris les liens qui n'ont pas été intégrés parce que la distance de coût était supérieure à 700 m. Les pointillés noirs indiquent les limites des deux Parcs Naturels Régionaux (Luberon et Alpilles).

⁵ Parmi les $(n \times n - 1) / 2$ liens théoriques entre les n taches, soit 18721.

Seuls 2% des taches d'habitats et 2% des liens assurent à eux seuls les connections majeures pour le réseau à la distance équivalente à 700 m. Le réseau de taches est structuré en quatre composantes principales⁶ (Figure 6) :

- (a) les taches d'habitats du PNR des Alpilles à l'ouest de la zone ;
- (b) celles du PNR du Luberon au nord ;
- (c) un ensemble de taches assez nombreuses comprenant le massif de la Sainte-Victoire et les massifs de taille plus modestes situées à la fois au sud-ouest en direction de Gardanne et à l'ouest vers Lambesc et Salon-de-Provence ;
- (d) un ensemble de petites taches connectées au nord de Vitrolles et de l'étang de Berre.

Il reste enfin des taches isolées dans trois secteurs : entre Chateaurenard et Cavaillon, au sud de Pélissanne et au sud des Alpilles. Dans ce dernier secteur, une tache d'assez grande taille (520 ha) est isolée entre la composante Alpilles et la composante Sainte-Victoire Lambesc (flèche 1). On comprend l'isolement de cette tache en regardant l'environnement de la tache sur la carte de friction (Figure 7) : cette tache est bordée à l'est par le village de Lamanon, deux départementales, l'autoroute A7, le canal de la Durance et une voie ferrée, alors qu'elle est très proche à vol d'oiseau de massifs situés à l'est.

L'isolement des populations des Alpilles est lié en premier lieu à un éloignement des taches d'habitat par rapport aux autres taches du graphe (Luberon et Lambesc), mais il est nettement accentué par la présence de plusieurs obstacles linéaires de friction maximale : l'autoroute A7, une route nationale, la voie ferrée, la LGV Avignon-Marseille et le lit de la Durance (Figure 7). Des analyses de connectivité pour d'autres distances de dispersion indiquent que les populations ne seraient en contact avec les autres populations importantes (sud du Luberon et plaine de Lambesc) que par des individus dispersant à plus longue distance (au moins 4000 m).

Un autre constat intéressant est l'absence de connexions entre les deux composantes Luberon et Saint-Victoire - Lambesc. Là aussi, l'éloignement géographique des deux composantes associé à une résistance élevée dans la plaine de la Durance (au sud de Pertuis) explique l'absence de connexions. Néanmoins, les connections entre le massif de la Sainte-Victoire et le Luberon peuvent aussi s'établir par le réseau de taches situées à l'est de Pertuis, mais notre analyse ne les a pas incorporées à cette échelle (cf. analyse à l'échelle régionale).

Le calcul des parts "connecteur" de l'indice $dIIC$ ($dIIC_{conn}$) met en évidence les éléments charnières pour assurer la dispersion à travers le réseau de taches d'habitats, et dont la perte augmenterait de manière très importante l'isolement des populations⁷ (Figure 6):

- (a) deux liens sont très importants pour connecter l'est et l'ouest des taches des Alpilles (flèche 2) ; le maintien de la connexion ne pose *a priori* pas de problème dans ce secteur, non urbanisé et assez boisé ;
- (b) la partie sud-est de la zone d'analyse contient plusieurs liens et taches très importantes pour la connectivité : au sud-est du massif de la Sainte-Victoire vers Gardanne, un chapelet de liens et de taches ont une forte contribution parce qu'ils connectent la Sainte-Victoire et toutes les taches situées en fin de réseau à l'est de Vitrolles (flèche 3). Le maintien de ces connexions apparaît donc comme primordial dans cette zone en périphérie d'Aix-en-Provence, sachant que le secteur est fortement urbanisé et que plusieurs voies de circulation le découpent d'est en ouest ;
- (c) la tache la plus importante du réseau est située au sud-est de Lambesc et relie par un chemin unique les deux parties est et ouest de cette composante (flèche 4). Cette tache

⁶ La *composante* d'un graphe est un sous-ensemble de taches connectées entre elles mais non connectées aux autres composantes.

⁷ Une tache ou un lien est d'autant plus important qu'il est le chemin unique entre plusieurs taches du réseau.

est donc l'une de celles à conserver en priorité. Le lien entre cette tache et le reste de la composante (massif de la Sainte-Victoire) ne ressort pas comme un lien prioritaire (puisque'il est figuré en bleu sur la carte, flèche 5). Il s'agit en fait de deux liens reliant deux taches distinctes situées à l'est du côté Sainte-Victoire. Dans l'algorithme utilisé, une part connecteur existe si le lien est un meilleur chemin entre deux taches comparé à d'autres liens. La part connecteur est d'autant plus importante que le lien fait partie du meilleur chemin ou du chemin unique reliant plusieurs taches. Or, dans notre exemple, il existe un chemin alternatif quasiment équivalent lorsqu'on enlève un des deux liens. L'analyse de connectivité sur les liens du graphe montre ici ses limites car dans le graphe il n'est pas possible de traiter deux liens distincts comme un lien unique : il faut donc compléter par une analyse cartographique établissant des corridors pour faire ressortir les zones communes de liaisons partagées par plusieurs taches d'habitats (Avon *et al.*, 2014). Toutefois l'analyse de connectivité sur les taches a bien mis en évidence l'importance de cette zone, car de part et d'autre se situent les taches les plus importantes pour le maintien de la connectivité globale du réseau. Cette zone de connexion entre la Sainte-Victoire à l'est et le massif de Rognes à l'ouest constitue un passage stratégique dans le paysage ; cette zone est moins défavorable que le secteur de Lamanon commenté plus haut car la résistance de la matrice est moindre (zone faiblement urbanisée et assez boisée), mais les espèces doivent néanmoins franchir l'autoroute A51 et deux départementales. L'implantation d'un passage à faune serait tout à fait justifiée car il n'y a aucun passage empruntable (pont ou tunnel) par la faune dans ce secteur.

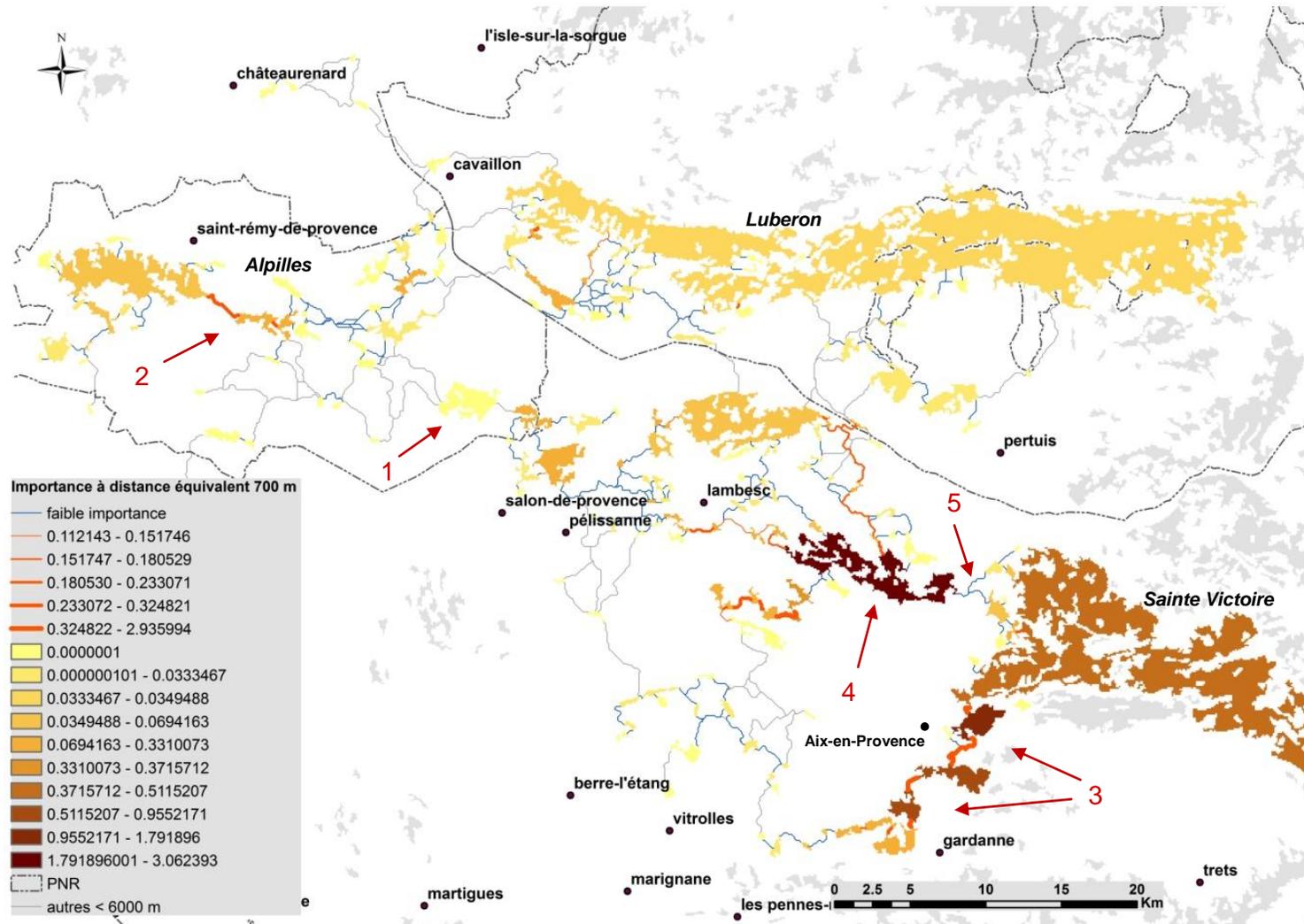


Figure 6. Diagnostic de connectivité potentielle pour l'Écureuil roux à une échelle infrarégionale, dans une zone d'environ 5100 km² couvrant les Alpilles, le sud du Luberon et la Sainte-Victoire. La carte montre l'importance des taches d'habitat (de jaune à marron foncé) et des liens (les plus importants sont en orange épais) comme éléments connecteurs assurant les déplacements des individus, en considérant une distance de coût équivalent la médiane de dispersion (700 m). En bleu figurent les liens de moindre importance et en gris les liens de plus de 700 m.

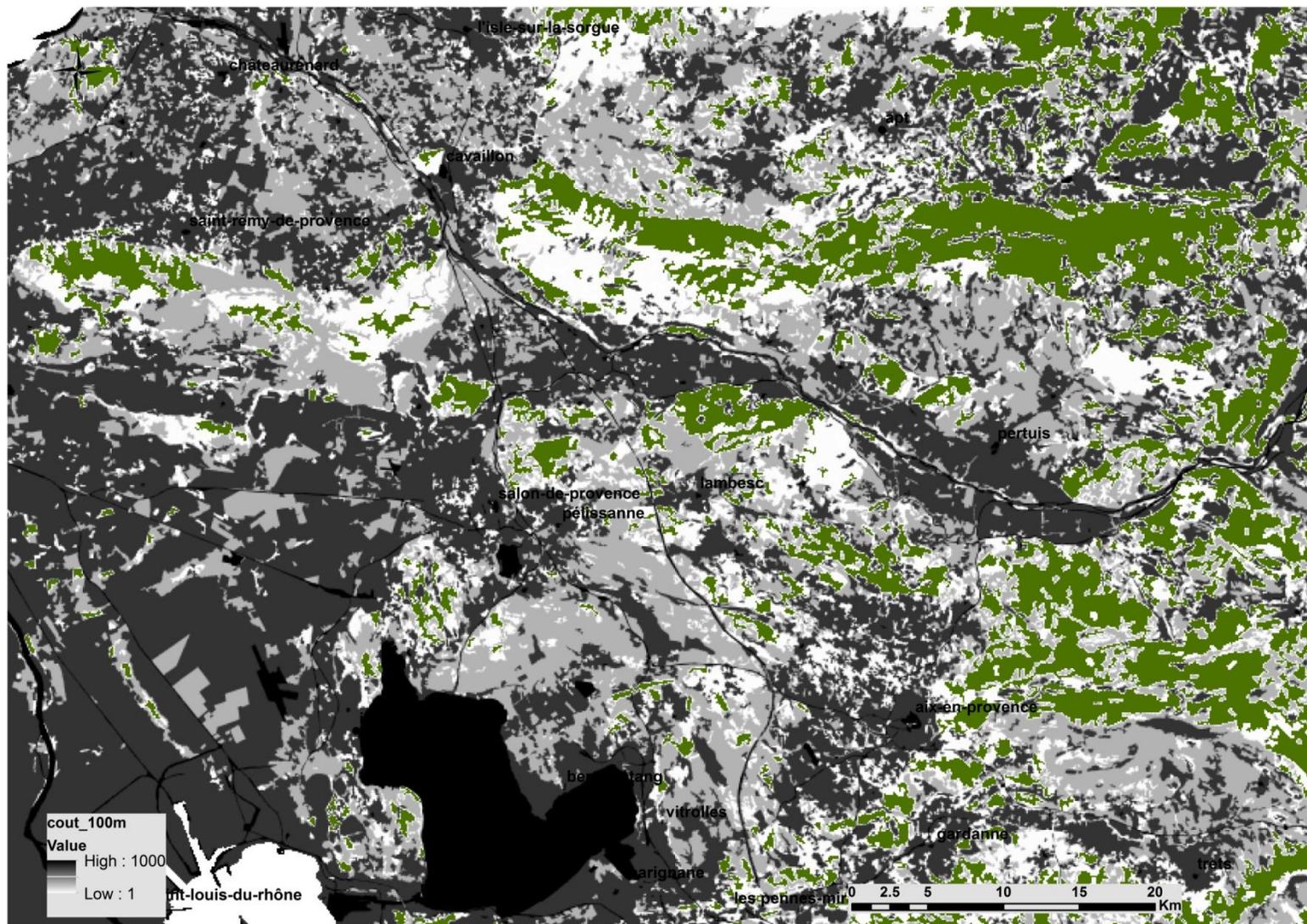


Figure 7. Taches habitats pour l'Ecureuil roux (en vert) superposée avec la carte de friction du paysage à l'échelle infrarégionale : les zones les moins favorables (urbains denses, infrastructures linéaires de transport : routes, autoroutes, LGV) sont figurées en noir et les zones les plus favorables (forêt) en blanc.

3.6 Diagnostic à l'échelle régionale

A cette échelle, le diagnostic de connectivité a porté sur 2482 tâches et 3406 liens pour une distance équivalente de coût de 6000 m. À la différence de l'analyse infrarégionale, les capacités de calcul de notre station de travail étant insuffisantes pour calculer la contribution de chaque lien à la connectivité globale (part connecteur), car le nombre très élevé de liens et de nœuds étaient trop élevés. Nous n'avons calculé que la décomposition des trois parts de l'indice $\Sigma dIIC$ pour les tâches.

La décomposition de ces trois parts a été effectuée pour les cinq distances de dispersion (Figure 8). La part "intra" reste proche de 12%. La part "flux" augmente et passe de 39% à 200 m à 55% à 1000 m puis n'augmente presque plus ensuite (58% à 6000 m). La part "connector" représente 49% de la variation totale à 200 m puis ne cesse de diminuer pour atteindre 30% dès 4000 m. L'interprétation des changements des trois parts de l'indice $\Sigma dIIC$ en fonction de la distance de dispersion permet de faire les commentaires suivants (Saura & Rubio, 2010) :

(a) la part "connector" du graphe est importante au regard des deux autres parts : cela indique qu'un nombre important de tâches joue un rôle de tâches relais pour connecter d'autres tâches du réseau situées à des distances importantes ;

(b) la maximum de la part "connector" est obtenue pour une distance de coût équivalente à 200 m : ceci indique que les tâches charnières pour la connectivité globale du réseau sont reliées à partir de cette valeur de distance effective ; en dessous de cette distance⁸, les tâches charnières ne sont pas encore toutes reliées, mais en dessus d'une distance de coût équivalente à 700 m, les chemins commencent à devenir redondants et certaines tâches relais à des distances inférieures voient leur part "connector" s'annuler (et donc la somme des parts "connector" pour l'ensemble des tâches diminue).

(c) la part "flux" augmente en passant de 200 à 1000 m puis augmente très peu au-delà : cela signifie que le flux d'individus entre tâches connectées est maximal à partir de 700 m et stagne au-delà de 1000 m, c'est-à-dire qu'il n'y a plus de nouvelles liaisons qui s'établissent entre des tâches qui n'étaient pas connectées à distance moindre, ou que ces liaisons concernent des tâches de petite taille et n'impactent pas les flux à cette échelle.

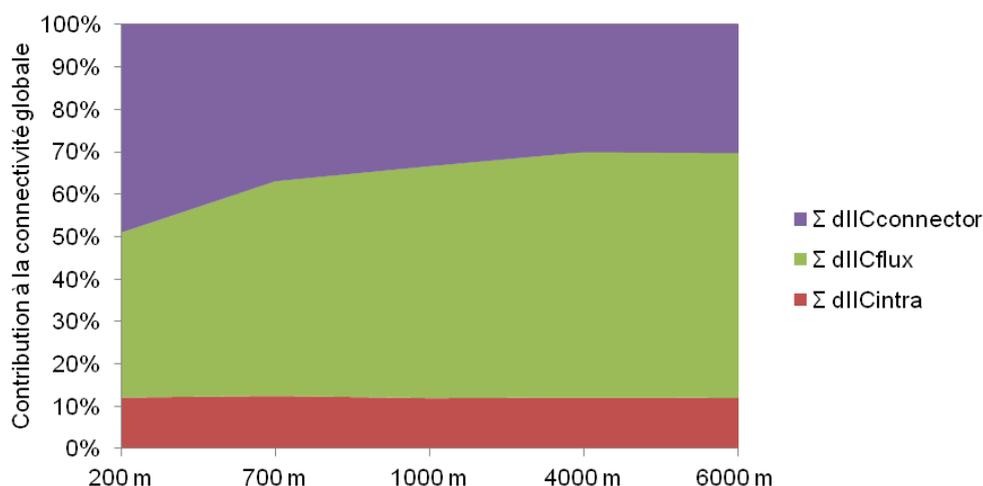


Figure 8. Variation de la décomposition des trois parts de l'indice $\Sigma dIIC$ ($\Sigma dIIC_{intra}$, $\Sigma dIIC_{flux}$ et $\Sigma dIIC_{connector}$) sommés pour l'ensemble des tâches du réseau d'habitat de l'Écureuil roux à l'échelle de la région PACA en fonction de 5 distances de dispersion utilisées dans la modélisation.

⁸ Nous n'avons pas pu tester de distance inférieure à 200 m car la résolution du fond cartographique utilisé est de 100 m. Nous avons pris une première distance supérieure à la résolution, ce qui est raisonnable.

Les Figure 9 et suivantes identifient les 50 taches les plus importantes à l'échelle de la région en termes d'éléments connectant pour l'Ecureuil roux, considérant la distance de coût équivalente à 700 m : ces taches d'habitat assurent la majorité des déplacements des individus au sein du réseau d'habitat, ce qui permet de maintenir les flux entre populations sur le long terme. L'analyse détaillée des zones qui sont connectées ou déconnectées et la contribution de chaque tache à la connectivité globale du réseau permet de hiérarchiser les enjeux de conservation en ciblant sur les zones de fragilité du réseau. Rappelons que la part "connecteur" d'une tache est par construction indépendante de sa taille et ne dépend que de sa position dans le réseau et des liens qui la relient aux autres taches. Néanmoins, à cette échelle d'analyse, la plupart des taches importantes au regard de la connectivité sont de très grandes taches.

A l'est de la région, la fragmentation de l'habitat pour l'Ecureuil roux est plus faible qu'à l'ouest (Figure 9). Plusieurs taches dont une immense couvrant près de 168000 ha s'étendent des Alpes Maritimes au Var et aux Alpes de Haute-Provence. Cette tache située au nord de Nice (Figure 9) est extrêmement découpée mais relie un nombre très élevé d'autres taches ; sa contribution en tant que connecteur est majeure car c'est par elle que passent beaucoup de chemins les moins coûteux. Un peu plus à l'ouest dans le secteur de Draguignan (au nord du rectangle zoom 5 sur la Figure 9), d'autres taches importantes relient les parties est et ouest du réseau dont une tache de 27800 ha et une autre de 7400 ha. De même, au nord de cette tache de 168000 ha et remontant jusqu'à Gap (Hautes-Alpes), plusieurs taches assurent un rôle de relai au sein du réseau pour connecter les taches entre le nord et le sud, mais aussi pour connecter les nombreuses taches adjacentes.

La partie nord-est du réseau montre une structure dendritique liée au relief des Hautes-Alpes et à la limite altitudinale de l'habitat de l'Ecureuil roux (Figure 10, zoom 1 de la Figure 9). On voit bien les taches charnières se dessiner le long de la haute vallée de la Durance vers le Briançonnais et le Queyras, ainsi que le rôle clé des taches situées au sud de Gap.

La partie centre-ouest du réseau s'individualise car elle très faiblement connectée au reste du réseau d'habitat (Figure 11, zoom 2 de la Figure 9). Le massif du Luberon (15200 ha), les Monts de Vaucluse (27600 ha) et le Mont Ventoux (3600 ha) forment la colonne vertébrale de connexion de cette partie centre-ouest de la région PACA : le massif du Luberon connecte fortement le nord et le sud (cf. point suivant), les Monts de Vaucluse connecte l'est et l'ouest et le Mont Ventoux connecte les taches qui sont situées à l'extrémité nord-ouest de cette zone. On note que la connexion avec le secteur Montagne de Lure (au nord de Forcalquier) passe par les Monts de Vaucluse et le Luberon et qu'il n'existe aucune connexion par l'est (vallée de la Durance) ou le nord (vallée du Jabron) de la région PACA. Cependant, il pourrait exister des connexions qui passent au nord par la Drôme qui ne sont pas prises en compte dans l'analyse qui s'arrête aux limites administratives de la région.

La zone située entre la Sainte-Victoire et le Luberon concentre les connexions entre la partie centre-ouest (Ventoux, Monts du Vaucluse et Lure) et le reste du réseau régional (Figure 12, zoom 3 de la Figure 9) : les chemins de moindre coût passent par plusieurs massifs de taille variable entre le nord et le sud ; une très petite tache au centre de la Figure 12 (flèche 1) a en particulier une très forte contribution au regard de sa taille, car elle concentre tout le passage (secteur de Beaumont-de-Pertuis, Grambois et La Bastide-des-Jourdans). De plus, le franchissement de la vallée de la Durance (deux RD, l'autoroute A51 et la Durance) n'est possible qu'en deux points de passage (ces passages sont indiqués par deux flèches 2 et 3 sur la Figure 12). Tout ceci rend le maintien de la connectivité entre ces deux grandes composantes nord et sud du réseau régional extrêmement fragile. Ce secteur devrait faire l'objet d'une attention particulière en prévoyant la conservation des taches d'habitat favorables actuelles accompagnée de l'installation d'écoponts et de corridors écologiques.

La partie centre sud de la région est assez bien connectée et la connexion s'opère par des taches d'assez grande taille (Figure 13, zoom 4 de la Figure 9) : massif de la Sainte-

Victoire au nord (10300 ha), Mont Aurélien au centre et une grande tache qui inclut le massif de la Sainte-Baume au sud : l'ensemble des taches situées au sud d'Aix-en-Provence et au nord-ouest de Marseille sont assez bien connectées entre elles et les liaisons avec le reste du réseau s'effectuent par le nord ou par l'est *via* les trois taches précédemment citées. L'analyse à l'échelle régionale nuance les diagnostics présentés à l'échelle infrarégionale, car les taches situées au sud d'Aix-en-Provence ne sont plus aussi isolées et plusieurs chemins alternatifs permettent de s'y rendre. En revanche, la tache la plus importante dans l'analyse infrarégionale reste identifiée comme une tache relai significative dans l'analyse régionale, tout en perdant un peu d'importance.

L'analyse régionale indique enfin que le grand Massif des Maures (Figure 14, zoom 5 de la Figure 9) est formé d'un grand nombre de taches bien connectées entre elles. Mais cette composante se trouve complètement isolée du reste du réseau régional, en grande partie par la présence de la dépression permienne qui entoure le Massif des Maures depuis Toulon jusqu'à Fréjus et qui est très urbanisée, très cultivée et parcourue par plusieurs routes et autoroutes (A57 et A8). La mise en place d'un ou plusieurs corridors reliant les Maures à la tache d'importance la plus proche située au nord-ouest serait une bonne stratégie d'amélioration de la connectivité globale du réseau.

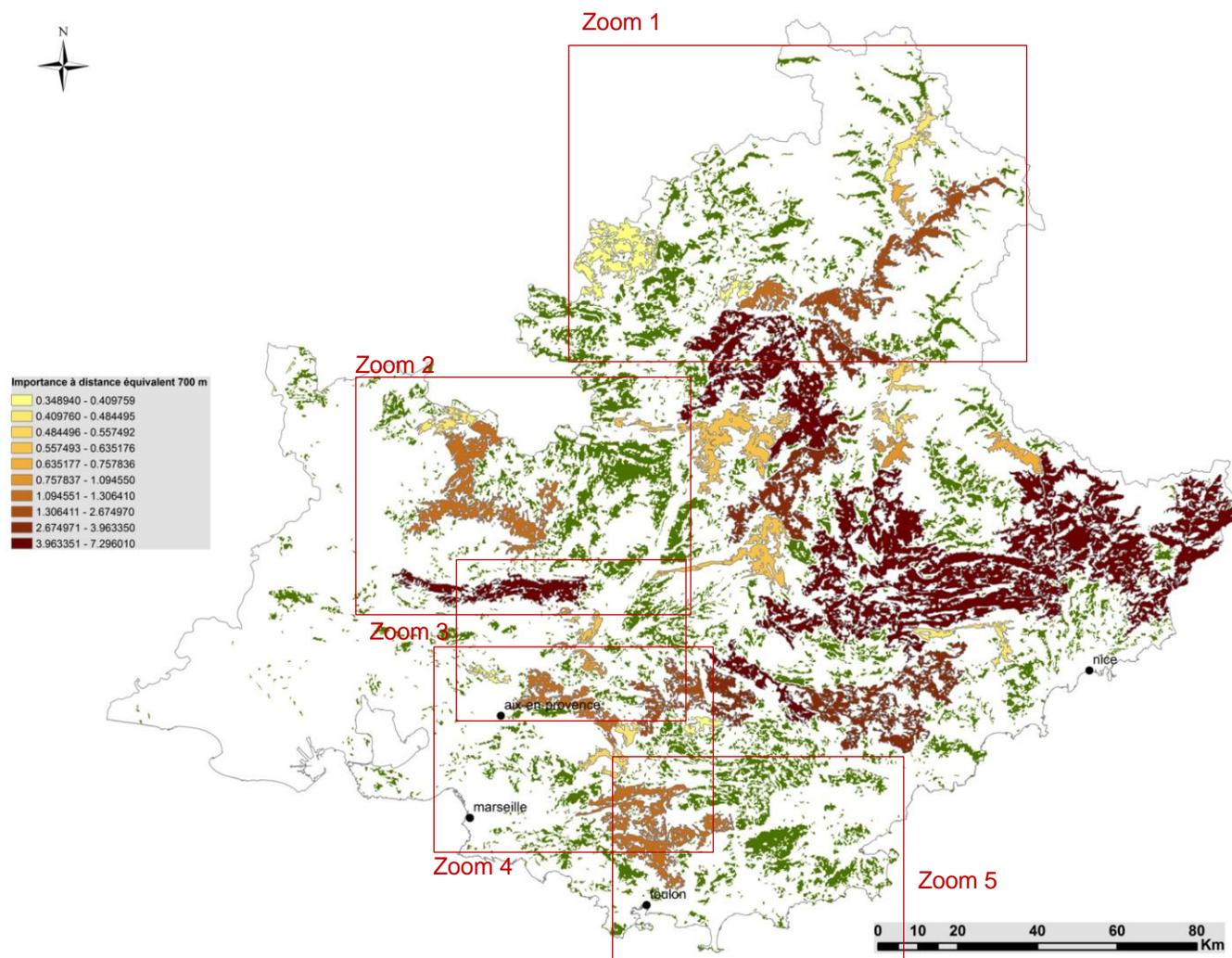


Figure 9. Diagnostic de connectivité potentielle pour l'Écureuil roux à l'échelle de la région PACA. La carte illustre les 50 taches d'habitat les plus importantes (dégradé de marron) pour assurer les déplacements des individus à travers le réseau d'habitats sur le long terme (en vert, les autres taches forêt), considérant une distance de coût équivalent à 700 m.

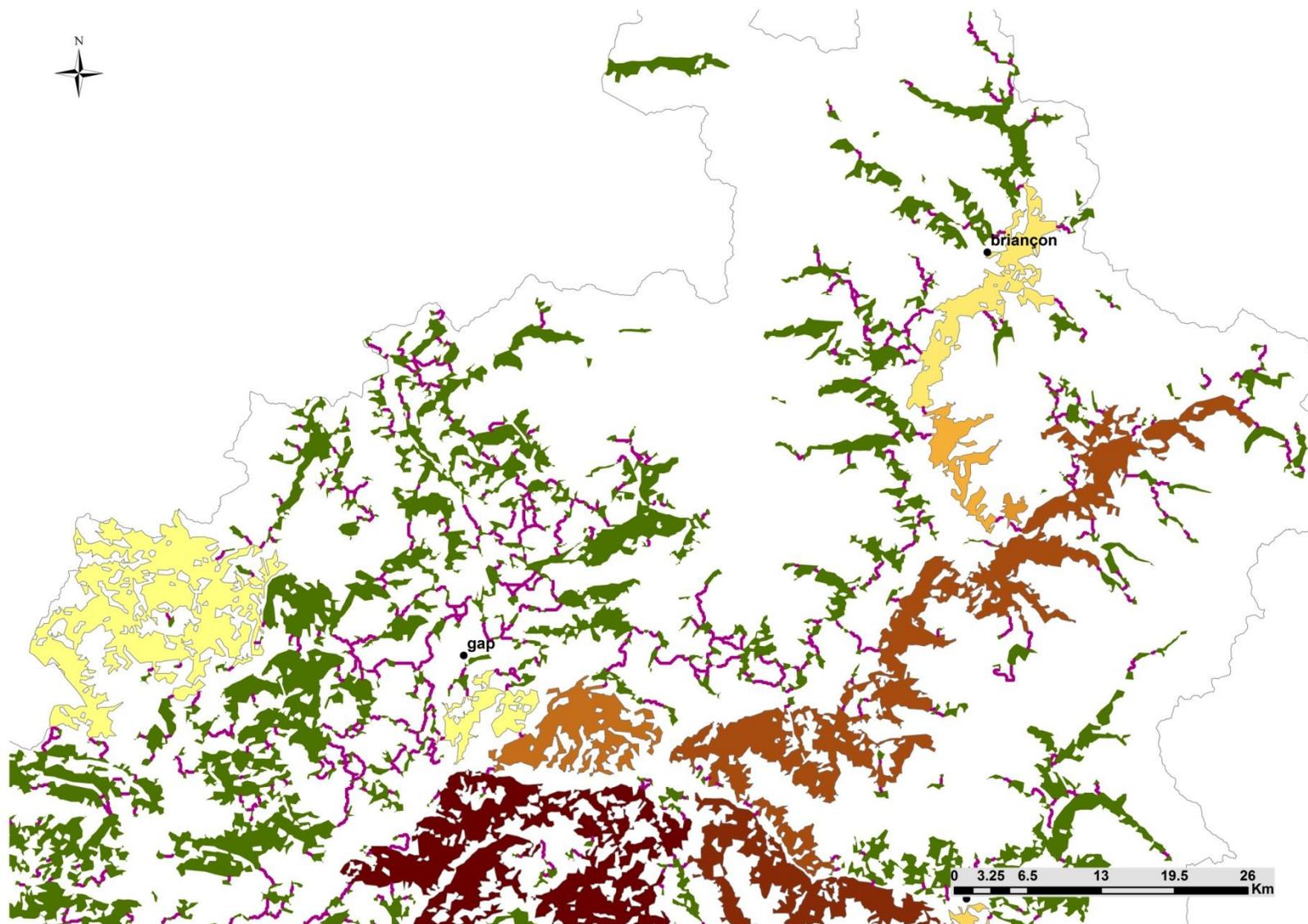


Figure 10. Diagnostic de connectivité potentielle pour l'Écureuil roux à l'échelle de la région PACA : agrandissement du zoom 1 de la Figure 9. Même légende que Figure 9.

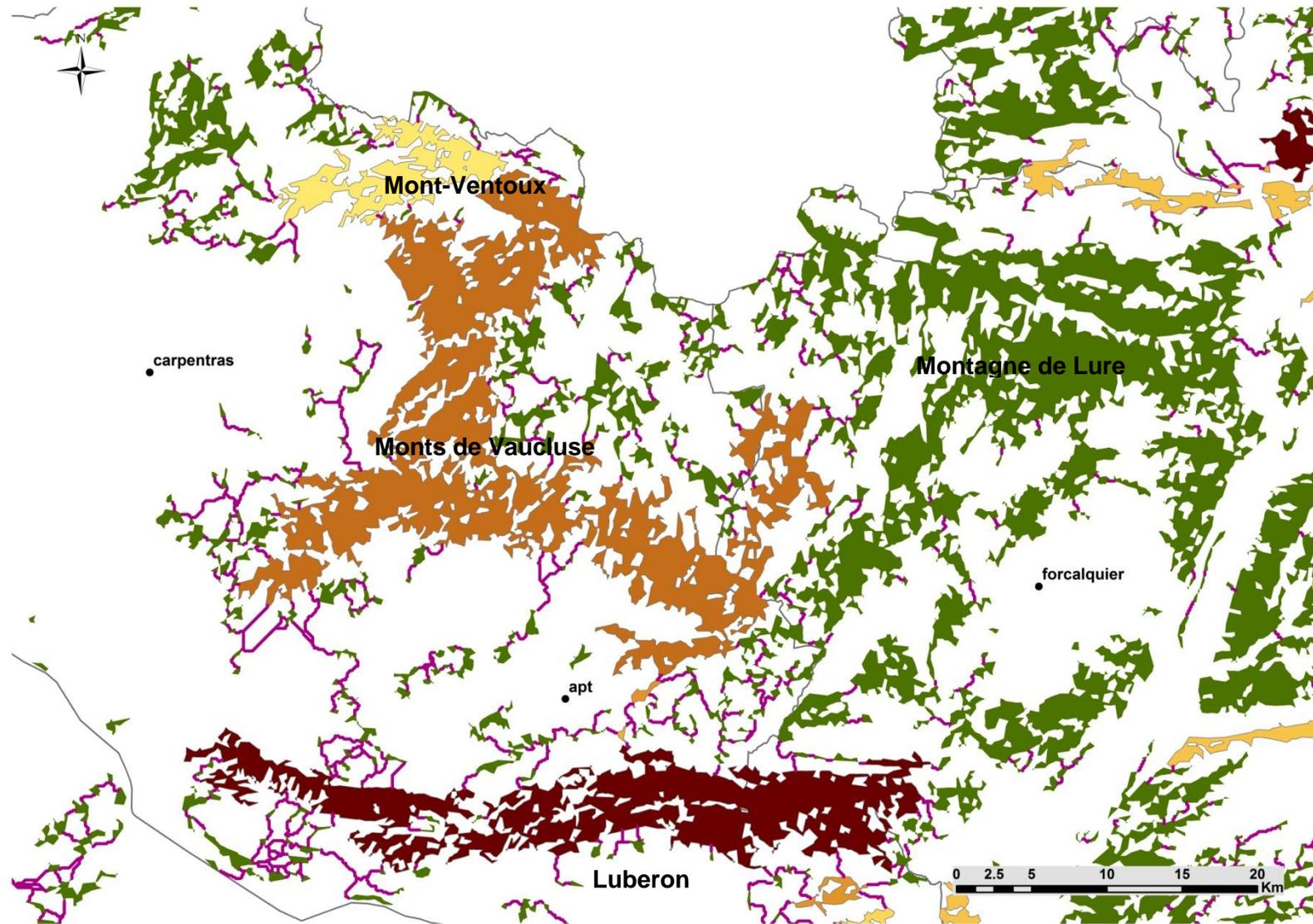


Figure 11. Diagnostic de connectivité potentielle pour l'Écureuil roux à l'échelle de la région PACA : agrandissement du zoom 2 de la Figure 9. Même légende que Figure 9.

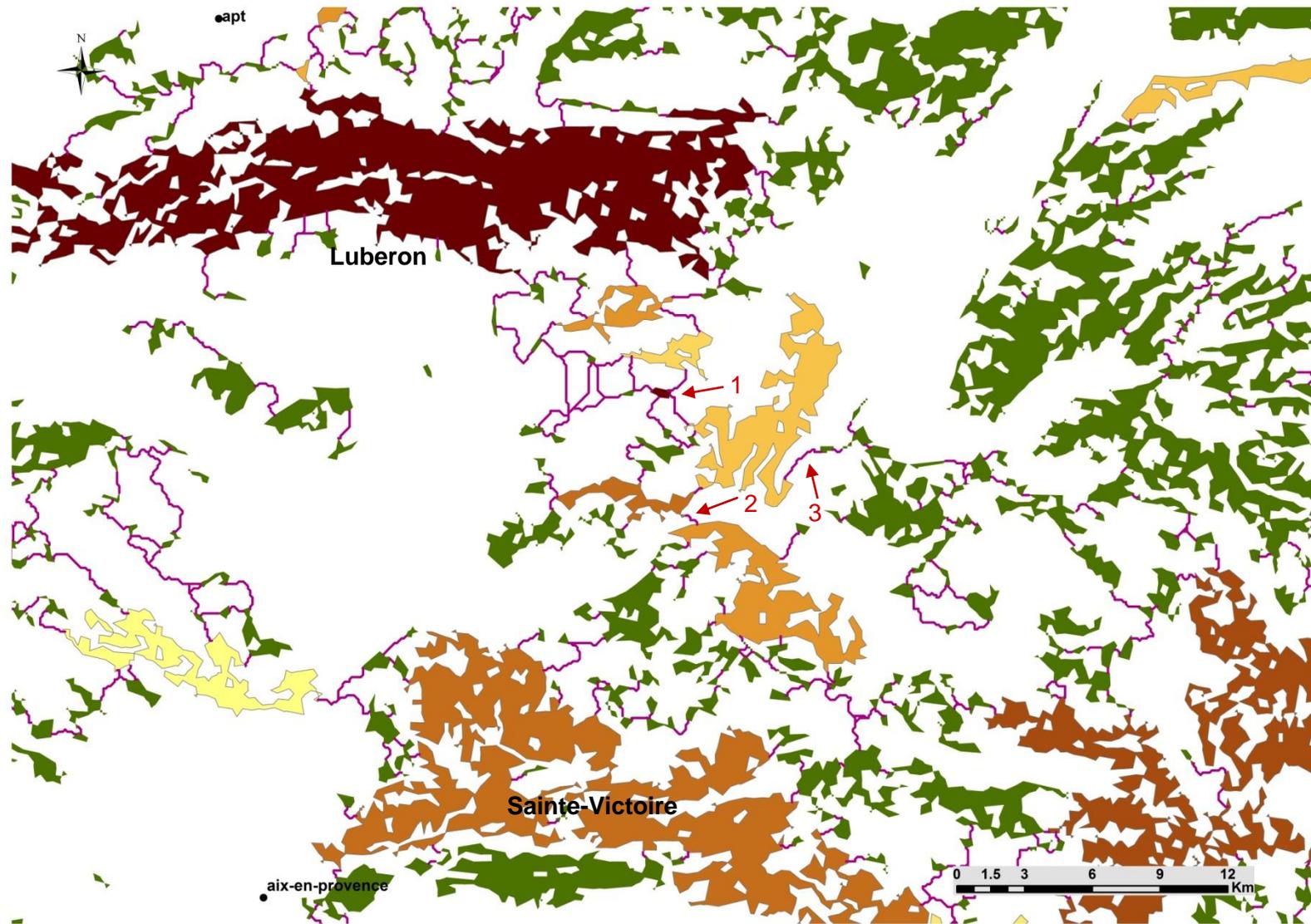


Figure 12. Diagnostic de connectivité potentielle pour l'Écureuil roux à l'échelle de la région PACA : agrandissement du zoom 3 de la Figure 9. Même légende que Figure 9.

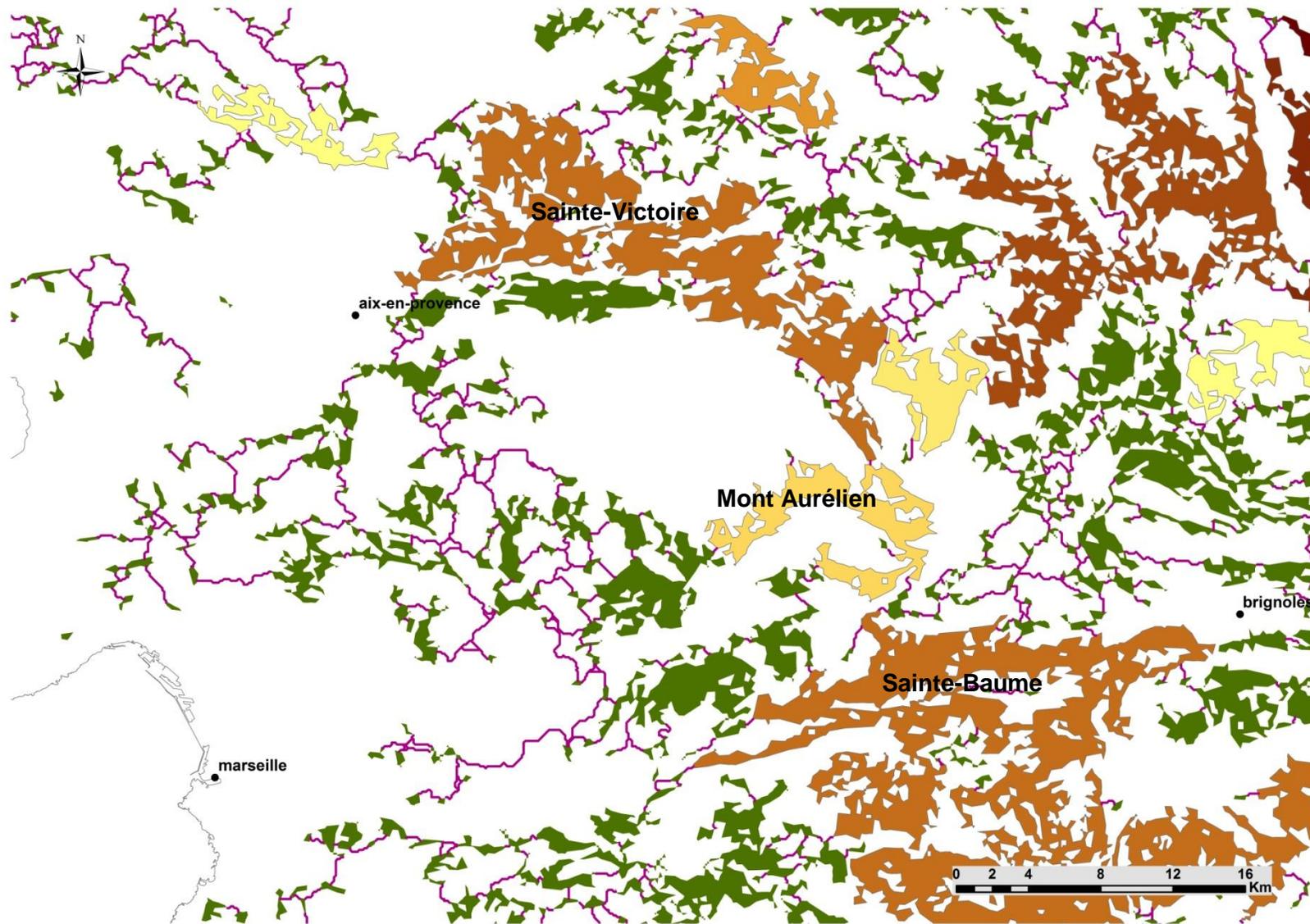


Figure 13. Diagnostic de connectivité potentielle pour l'Écureuil roux à l'échelle de la région PACA : agrandissement du zoom 4 de la Figure 9. Même légende que Figure 9.

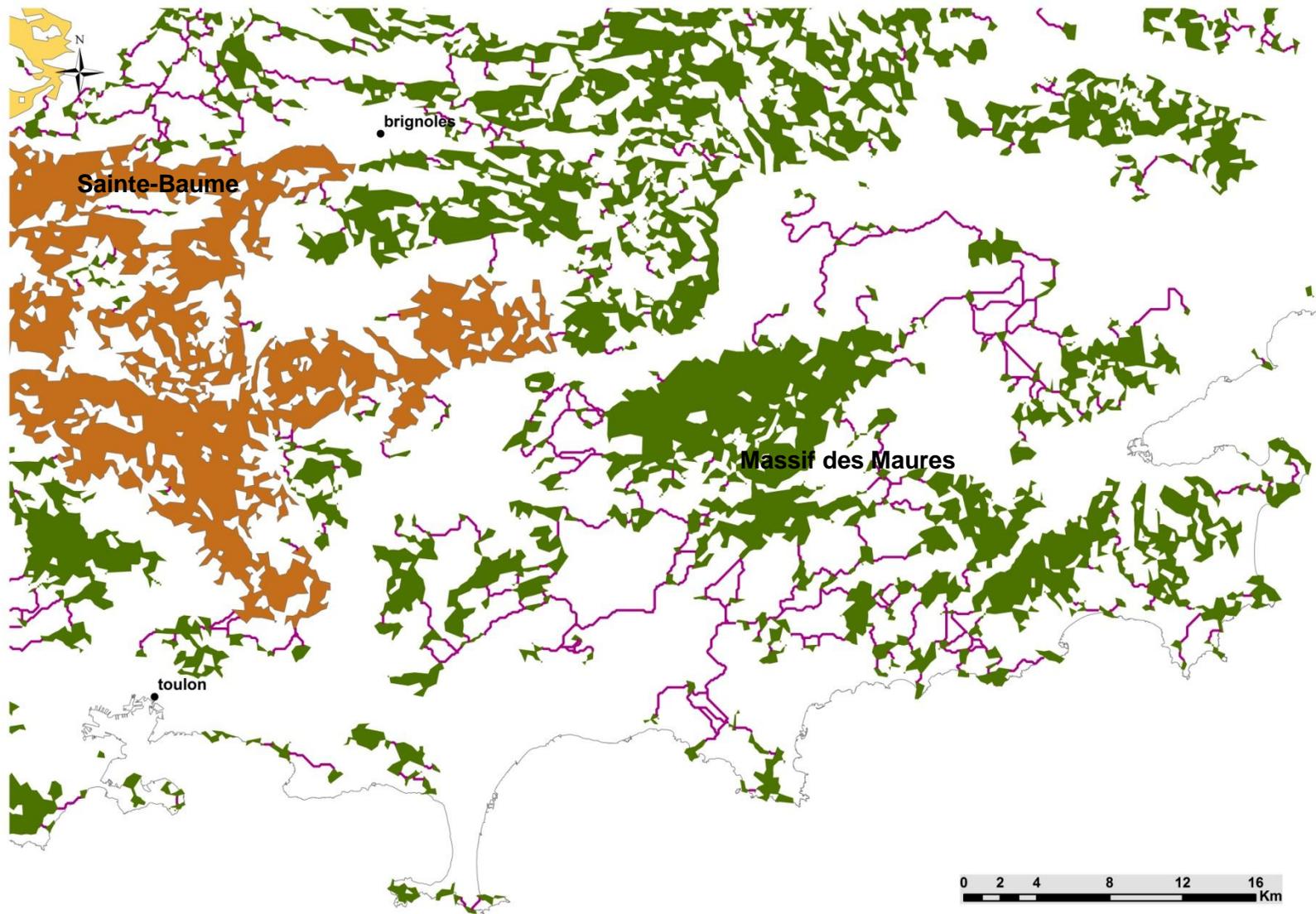


Figure 14. Diagnostic de connectivité potentielle pour l'Écureuil roux à l'échelle de la région PACA : agrandissement du zoom 5 de la Figure 9. Même légende que Figure 9.

4. Synthèse des diagnostics et cohérence entre échelles

Nous avons présenté un diagnostic de connectivité potentielle appliquée à un petit mammifère forestier généraliste, l'Ecureuil roux. Nous avons conduit l'analyse à deux échelles spatiales, au niveau infrarégional et au niveau régional. Les diagnostics de connectivité aux deux échelles sont cohérents, même si quelques différences sont perceptibles. Pour évaluer davantage la cohérence, nous avons calculé le coefficient de corrélation de rang de Spearman⁹ pour les taches communes aux deux échelles d'analyse : la corrélation se monte à 0,93 pour la part "connecteur" et à 0,92 pour la part "flux", ce qui indique que les écarts de classement de taches entre échelles d'analyse sont tout à fait minimes.

Les analyses de connectivité potentielle livrent des informations très utiles sur les connexions entre taches à l'échelle du paysage. L'utilisation de l'indice de connectivité IIC couplée à des distances de chemins de moindre coût permet de calculer la contribution de chaque tache et de chaque lien à la connectivité globale du réseau, ce que les indices antérieurs étaient incapables de faire. D'autres indices de connectivité comme l'indice PC ou l'EC (Saura *et al.*, 2011) peuvent aider à porter le même genre de diagnostic et nous les utiliserons par la suite. La valeur de la part "connecteur" de la tache ou du lien met en évidence le rôle de la tache comme étape dans la dispersion au sein du réseau.

Nous avons construit une représentation cartographique sous SIG des résultats issus du diagnostic de connectivité (Figure 6 et Figure 9) qui soit la plus synthétique possible, de manière à servir de support d'aide à la décision pour les aménagistes, gestionnaires et décideurs. Cette carte résume l'ensemble des informations importantes du diagnostic, à savoir : quelles zones du graphe sont connectées ou ne le sont pas, quelles taches et corridors faut-il préserver en priorité pour maintenir la connectivité.

Quelques résultats saillants ressortent de ces diagnostics pour l'Ecureuil roux pour une distance de dispersion de 700 m. L'analyse infrarégionale met en lumière une tache très importante qui assure la connexion entre l'est et l'ouest de la composante Sainte-Victoire – Lambesc, qui mériterait une attention particulière, car cette zone n'a aucun statut de protection particulier. L'analyse montre aussi l'isolement du PNR des Alpilles par rapport au reste du réseau d'habitat, isolement qui est principalement lié à la concentration d'infrastructures de transport terrestre et de voies d'eau à l'est des Alpilles. La création de passage à faune dans ce secteur serait bénéfique, avec probablement un choix à faire entre reconnecter les Alpilles au Luberon ou reconnecter les Alpilles au secteur boisé de Lambesc et Pélissanne.

A l'échelle régionale, le diagnostic repose sur plusieurs cartes qui zooment sur des secteurs de la région, afin de mieux voir les taches et la position des chemins de moindre coût. De plus, à cette échelle, nous avons calculé l'importance des liens, mais pas celui des taches. Nous avons mis en évidence que la structure du réseau d'habitat pour l'Ecureuil roux s'articulait autour d'un nombre restreint de très grandes taches dans la partie est de la région, où la quantité d'habitat atteignable est assez élevée et où la fragmentation est modérée. L'analyse rend compte d'un continuum forestier pour les Alpes Maritimes, le Haut-Var et les Alpes de Haute-Provence. En revanche, le Massif des Maures se trouve déconnecté du reste du réseau régional et la mise en place de corridors dans cette zone est préconisée. Mais nous avons surtout identifié que la partie centre ouest de la région (Luberon, Ventoux, Montagne de Lure) était mal connectée au reste du réseau régional. Le

⁹ En statistique, la corrélation de Spearman est étudiée lorsque deux variables statistiques semblent corrélées sans que la relation entre les deux variables soit de type affine. Elle consiste à trouver un coefficient de corrélation non pas entre les valeurs prises par les deux variables mais entre les rangs de ces valeurs.

secteur de Beaumont-de-Pertuis, Grambois et La Bastide-des-Jourdans et le franchissement de la vallée de la Durance au niveau de Mirabeau concentrent toutes les voies de passage entre nord et sud du réseau régional. Des aménagements sur ce secteur (corridors, écoponts) sont là aussi préconisés pour garantir la pérennité des déplacements d'individus au sein du réseau régional.

A l'échelle régionale, nous n'avons pas calculé l'importance de chaque lien du réseau du fait d'un trop grand nombre de liens et de taches, dépassant les capacités de calcul du logiciel Conefor. Nous travaillons pour résoudre ce problème de capacité de calcul. Néanmoins, cette limite informatique pourrait être contournée si nous confirmons dans la suite du projet que (a) l'ordre d'importance des taches pour la connectivité du réseau est peu variable lorsqu'on passe d'une petite fenêtre à une fenêtre plus grande, et ce pour les taches présentes dans la petite fenêtre (Tâche 3) et (b) les résultats sont peu sensibles à la surface minimale de cartographie des taches (Tâche 4), comme cela a été montré en partie dans une étude antérieure (Saura & Pascual-Hortal, 2007a).

5. Conclusions et perspectives

Sous réserve que les indices utilisés ($d//C$) sont peu sensibles à la taille de la fenêtre et au seuil de cartographie minimal, les diagnostics de connectivité potentielle pourraient être appliqués selon la démarche suivante :

(1) choisir les espèces sur lesquelles portera l'analyse de connectivité et préparer les données nécessaires pour la mettre en œuvre ; dans ce rapport, nous n'avons pas approfondi cette étape importante préalable au diagnostic de connectivité (Decout *et al.*, 2012) et nous nous sommes limités à donner les étapes de construction : (a) détermination des exigences écologiques des espèces (avis d'expert, bibliographie) et élaboration de la cartographie de la distribution potentielle des habitats de l'espèce (la plupart du temps, c'est une carte d'occupation du sol qui est utilisée) ; (b) recueil d'informations sur les capacités de dispersion des espèces : perméabilité de la mosaïque d'habitats au déplacement et gamme de distance de dispersion (avis d'expert, bibliographie), ce qui permet de calculer des distances de coût entre taches (issues des chemins de moindre coût). Ces éléments permettent de préparer pour chaque espèce les fichiers de nœuds et de liens du graphe qui sont utilisés à l'étape suivante ; il est important de préciser que les choix faits dans les différentes étapes de l'analyse pour une espèce peuvent s'appliquer à d'autres espèces à condition que les préférences d'habitats, la distance de dispersion et la capacité de dispersion à travers la mosaïque d'habitats soient proches de celles de l'espèce (notion de profilage d'espèces, cf. Opdam *et al.*, 2008) ; les outils de modélisation des habitats potentiels d'espèces sont abordés en détail dans le projet I MOCHAB¹⁰ ;

(2) conduire un diagnostic de connectivité potentielle à une échelle régionale (voire interrégionale) en prenant soin de poser un buffer autour de la zone d'étude et en choisissant un seuil de résolution et une surface minimale de tache en adéquation avec l'échelle de travail et les capacités de calcul du logiciel ; cela signifie de notre point de vue que descendre en dessous d'une résolution de 25 ha et d'une surface minimale de tache de 100 ha n'apporte rien à une échelle régionale ; mais ces valeurs restent indicatives et nous devons préconiser des seuils plus précis grâce aux résultats apportés par les Tâches 3 et 4 du projet ; cette analyse de connectivité permet d'identifier les grands ensembles de taches connectées (*i.e.* les composantes du graphe) et ceux qui sont déconnectés ou mal connectés, et de localiser les zones à enjeux pour le déplacement de l'espèce au sein du réseau (taches et corridors) ;

¹⁰ MOCHAB : Modélisation de la distribution des espèces : un outil pour l'évaluation, la conservation des habitats d'espèces et des continuités écologiques.

(3) conduire un diagnostic de connectivité potentielle à une échelle infrarégionale en ciblant les secteurs à enjeux identifiés à l'étape précédente ; il faut prendre soin là aussi d'élargir la zone en prenant un buffer autour de la zone d'étude et de ne garder les informations pour l'interprétation que dans la zone d'étude stricte ; l'analyse de connectivité à cette échelle permet de diminuer les seuils de résolution et de taille minimale de tache, mais aussi de calculer la contribution des liens pour aboutir à un rendu cartographique plus fin ; cette analyse permet de hiérarchiser les taches d'habitat et les corridors vis-à-vis de leur contribution au maintien de la connectivité globale du réseau ; une confrontation de la localisation de ces taches et de ces liens au regard de l'occupation humaine, notamment l'urbain et les infrastructures de transport (cf. Figure 6 et Figure 7) permet *in fine* de déterminer les taches et les corridors qu'il faut protéger ou restaurer en priorité.

(4) appliquer les deux étapes précédentes pour une gamme de distance de dispersion, ce qui permet de comprendre comment la quantité d'habitat atteignable par l'espèce change avec la variation de ses capacités de dispersion. Cela permet par extrapolation de proposer d'ajuster les programmes d'aménagement du territoire selon la gamme des espèces pour lesquelles l'on souhaite préserver ou améliorer la connectivité (Opdam *et al.*, 2008). Par exemple, dans le cas d'espèces ayant une distance médiane de dispersion de l'ordre de 1 km, la mise en place d'un écopont ou d'un corridor à un endroit précis du paysage permet de reconnecter les taches de part et d'autre de cet aménagement pour ces espèces-là ; cet aménagement sera bénéfique pour les espèces ayant des exigences écologiques proches et qui se dispersent sur de plus longues distances, mais il n'apportera rien pour d'autres espèces ayant des distances de dispersion bien inférieures.

De manière plus générale, le choix des espèces, la connaissance et les données dont on dispose, l'enjeu de développement économique du territoire et l'enjeu de conservation des espèces sont les éléments clés qui vont déterminer la construction de la démarche (Opdam *et al.*, 2008). Ces modèles de connectivité potentielle issus de la théorie des graphes permettent de réaliser des diagnostics de l'état du réseau écologique d'une manière objective et reproductible et constituent une aide précieuse à l'élaboration des trames vertes (Urban *et al.*, 2009 ; Foltête *et al.*, 2014). Ces modèles permettent de comparer l'importance de la quantité des habitats et de leur agencement spatial au niveau du paysage selon les capacités de dispersion des espèces. Pour des espèces dispersant sur de très faibles distances (moins de 100 m), il est sans doute plus pertinent que les choix d'aménagement s'orientent vers la conservation de la quantité et de la qualité des habitats. Quant aux espèces se dispersant sur de plus grandes distances, la démarche permet de comparer des scénarios privilégiant la quantité d'habitats et ceux privilégiant la connectivité (Bergès *et al.*, 2010 ; Hodgson *et al.*, 2011).

6. Références bibliographiques

- Adriaensen, F., Chardon, J.P., De Blust, G., Swinnen, E., Villalba, S., Gulinck, H. & Matthysen, E. 2003. The application of 'least-cost' modelling as a functional landscape model. *Landscape and Urban Planning* 64: 233-247.
- Allag-Dhuisme, F., Amsallem, J., Barthod, C., Deshayes, M., Graffin, V., Lefeuvre, C., Salles, E., Barnetche, C., Brouard-Masson, J., Delaunay, A., Garnier, C.C. & Trouvilliez, J., 2010a. Choix stratégiques de nature à contribuer à la préservation et à la remise en bon état des continuités écologiques – premier document en appui à la mise en œuvre de la Trame verte et bleue en France. Proposition issue du comité opérationnel Trame verte et bleue. 74 p.
- Allag-Dhuisme, F., Amsallem, J., Barthod, C., Deshayes, M., Graffin, V., Lefeuvre, C., Salles, E., Barnetche, C., Brouard-Masson, J., Delaunay, A., Garnier, C.C. & Trouvilliez, J., 2010b. Guide méthodologique identifiant les enjeux nationaux et transfrontaliers relatifs à la préservation et à la remise en bon état des continuités écologiques et comportant un volet

- relatif à l'élaboration des schémas régionaux de cohérence écologique – deuxième document en appui à la mise en oeuvre de la Trame verte et bleue en France. Proposition issue du comité opérationnel Trame verte et bleue. MEEDDM.
- Avon, C. & Bergès, L., 2013. Outils d'analyse de la connectivité des habitats. Rapport projet DIACOFOR Convention DEB-MEDDE / Irstea. In. Irstea, Aix-en-Provence, 31 p.
- Avon, C., Bergès, L. & Roche, P. in press. Comment analyser la connectivité écologique des trames vertes ? Cas d'étude en région méditerranéenne. *Sciences Eaux et Territoires*.
- Bergès, L., Roche, P. & Avon, C. 2010. Corridors écologiques et conservation de la biodiversité, intérêts et limites pour la mise en place de la Trame verte et bleue. *Sciences Eaux et Territoires* 3: 34-39.
- Calabrese, J.M. & Fagan, W.F. 2004. A comparison-shopper's guide to connectivity metrics. *Frontiers in Ecology and the Environment* 2: 529-536.
- Clauzel, C., Girardet, X. & Foltete, J.C. 2013. Impact assessment of a high-speed railway line on species distribution: Application to the European tree frog (*Hyla arborea*) in Franche-Comte. *Journal of Environmental Management* 127: 125-134.
- Decout, S., Manel, S., Miaud, C. & Luque, S. 2012. Integrative approach for landscape-based graph connectivity analysis: a case study with the common frog (*Rana temporaria*) in human-dominated landscapes. *Landscape Ecology* 27: 267-279.
- Foltête, J.C., Girardet, X. & Clauzel, C. 2014. A methodological framework for the use of landscape graphs in land-use planning. *Landscape and Urban Planning*.
- Fu, W., Liu, S.L., Degloria, S.D., Dong, S.K. & Beazley, R. 2010. Characterizing the "fragmentation-barrier" effect of road networks on landscape connectivity: A case study in Xishuangbanna, Southwest China. *Landscape and Urban Planning* 95: 122-129.
- Galpern, P., Manseau, M. & Fall, A. 2011. Patch-based graphs of landscape connectivity: A guide to construction, analysis and application for conservation. *Biological Conservation* 144: 44-55.
- Garcia-Feced, C., Saura, S. & Elena-Rossello, R. 2011. Improving landscape connectivity in forest districts: A two-stage process for prioritizing agricultural patches for reforestation. *Forest Ecology and Management* 261: 154-161.
- Girardet, X., Foltête, J.C. & Clauzel, C. 2013. Designing a graph-based approach to landscape ecological assessment of linear infrastructures. *Environmental Impact Assessment Review* 42: 10-17.
- Gurrutxaga, M., Lozano, P.J. & del Barrio, G. 2010. GIS-based approach for incorporating the connectivity of ecological networks into regional planning. *Journal for Nature Conservation* 18: 318-326.
- Gurrutxaga, M., Rubio, L. & Saura, S. 2011. Key connectors in protected forest area networks and the impact of highways: A transnational case study from the Cantabrian Range to the Western Alps (SW Europe). *Landscape and Urban Planning* 101: 310-320.
- Gurrutxaga, M. & Saura, S. in press. Prioritizing highway defragmentation locations for restoring landscape connectivity. *Environmental Conservation*.
- Hodgson, J.A., Moilanen, A., Wintle, B.A. & Thomas, C.D. 2011. Habitat area, quality and connectivity: striking the balance for efficient conservation. *Journal of Applied Ecology* 48: 148-152.
- Magle, S.B., Theobald, D.M. & Crooks, K.R. 2009. A comparison of metrics predicting landscape connectivity for a highly interactive species along an urban gradient in Colorado, USA. *Landscape Ecology* 24: 267-280.
- Opdam, P., Pouwels, R., van Rooij, S., Steingrover, E. & Vos, C.C. 2008. Setting biodiversity targets in participatory regional planning: introducing ecoprofiles. *Ecology and Society* 13.
- Pascual-Hortal, L. & Saura, S. 2006. Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation. *Landscape Ecology* 21: 959-967.

- Pascual-Hortal, L. & Saura, S. 2008. Integrating landscape connectivity in broad-scale forest planning through a new graph-based habitat availability methodology: application to capercaillie (*Tetrao urogallus*) in Catalonia (NE Spain). *European Journal of Forest Research* 127: 23-31.
- Saura, S., Estreguil, C., Mouton, C. & Rodriguez-Freire, M. 2011. Network analysis to assess landscape connectivity trends: Application to European forests (1990-2000). *Ecological Indicators* 11: 407-416.
- Saura, S. & Pascual-Hortal, L. 2007a. Impact of spatial scale on the identification of critical habitat patches for the maintenance of landscape connectivity. *Landscape and Urban Planning* 83: 176-186.
- Saura, S. & Pascual-Hortal, L. 2007b. 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: 91-103.
- Saura, S. & Rubio, L. 2010. A common currency for the different ways in which patches and links can contribute to habitat availability and connectivity in the landscape. *Ecography* 33: 523-537.
- Saura, S. & Torné, J. 2009. Conefor Sensinode 2.2: A software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity. *Environmental Modelling & Software* 24: 135-139.
- Taylor, P.D., Fahrig, L., Henein, K. & Merriam, G. 1993. Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos* 68: 571-573.
- Theobald, D.M., 2006. Exploring the functional connectivity of landscapes using landscape networks. In: Crooks, K.R., Sanjayan, M. (Eds.), *Connectivity Conservation*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 416-444.
- Theobald, D.M., Hobbs, N.T., Bearly, T., Zack, J.A., Shenk, T. & Rielsame, W.E. 2000. Incorporating biological information in local land-use decision making: designing a system for conservation planning. *Landscape Ecology* 15: 35-45.
- Urban, D. & Keitt, T. 2001. Landscape connectivity: A graph-theoretic perspective. *Ecology* 82: 1205-1218.
- Urban, D.L., Minor, E.S., Treml, E.A. & Schick, R.S. 2009. Graph models of habitat mosaics. *Ecology Letters* 12: 260-273.
- Verbeylen, G., De Bruyn, L., Adriaensen, F. & Matthysen, E. 2003a. Does matrix resistance influence Red squirrel (*Sciurus vulgaris* L. 1758) distribution in an urban landscape? *Landscape Ecology* 18: 791-805.
- Verbeylen, G., De Bruyn, L. & Matthysen, E. 2003b. Patch occupancy, population density and dynamics in a fragmented red squirrel *Sciurus vulgaris* population. *Ecography* 26: 118-128.
- Verbeylen, G., Wauters, L.A., De Bruyn, L. & Matthysen, E. 2009. Woodland fragmentation affects space use of Eurasian red squirrels. *Acta Oecologica-International Journal of Ecology* 35: 94-103.
- Wauters, L.A., Verbeylen, G., Preatoni, D., Martinoli, A. & Matthysen, E. 2010. Dispersal and habitat cuing of Eurasian red squirrels in fragmented habitats. *Population Ecology* 52: 527-536.