



Rapport scientifique

CAMPAGRAPH

Graphes paysagers pour la modélisation et la gestion des pullulations de campagnols terrestres

Programme de recherche DIVA

« Action publique, Agriculture et Biodiversité »

Responsable scientifique du projet : Jean-Christophe Foltête

Partenaires scientifiques bénéficiaires : Geoffroy Couval, Xavier Girardet, Patrick Giraudoux, Yves Michelin, Gilles Vuidel

Sommaire

1. CONTEXTE : LES PULLULATIONS DU CAMPAGNOL TERRESTRE.....	23
2. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DU PROJET.....	24
3. MODELISATION DU RESEAU PRAIRIAL A L'ECHELLE REGIONALE	27
3.1. Cartographie d'occupation du sol	27
3.2. Modélisation du réseau prairial en Franche-Comté.....	28
3.3. Modélisation du réseau prairial en Auvergne	34
4. APPUI A LA MISE EN PLACE D'UN DECOUPAGE SPATIAL POUR LE SUIVI DES POPULATIONS.....	36
4.1. Contexte et objectif.....	36
4.2. Méthodes.....	36
4.3. Résultats	38
4.4. Conclusion.....	41
5. VULNERABILITE DU RESEAU A L'ECHELLE REGIONALE ET ACTIONS DE TERRAIN	42
5.1. Contexte et objectif.....	42
5.2. Méthodes.....	42
5.3. Stratégie en deux étapes pour l'identification des zones-clés	46
5.4. Stratégie fondée sur la théorie des circuits pour l'identification des zones-clés	50
6. APPROCHES LOCALES POUR LA DECONNEXION DES RESEAUX DE PRAIRIES	59
6.1. Le paysage comme support de la lutte collective en Auvergne.....	59
6.2. Approches locales sur les plateaux du Doubs.....	69
7. SYNTHESE DES RESULTATS ET DISCUSSION	74
ANNEXE 1. RESULTATS COMPLETS DES TESTS DE ROBUSTESSE DES GRAPHS.....	76
ANNEXE 2. ANALYSES LOCALES SUR LES ZONES DES FOURGS ET DE BELLEHERBE.....	78
TABLE DES FIGURES.....	84

CAMPAGRAPHE - Rapport scientifique

1. Contexte : les pullulations du Campagnol terrestre

Depuis plusieurs décennies, les moyennes montagnes dominées par le milieu prairial subissent les pullulations d'une espèce de rongeur, le campagnol terrestre (*Arvicola terrestris*). Ce phénomène se propage dans l'espace sous la forme de vagues dont le cycle est d'environ 5 ans (Giraudoux et al., 1997). Le campagnol terrestre se nourrit des racines des végétaux, c'est pourquoi les pullulations de ce rongeur occasionnent de lourds dégâts dans les prairies, qui ont d'importantes répercussions économiques (Quéré et al., 1999), dans une fourchette estimée de 9000 à 25 000 € pour une exploitation de 70 ha pendant une année de pullulation en Franche-Comté. Les pullulations posent également un problème de santé publique puisqu'elles augmentent la transmission de certains pathogènes à l'homme. En outre, l'expérience a montré les limites et les conséquences néfastes de l'usage massif des pesticides pour lutter contre ce phénomène (Delattre et Giraudoux, 2009).

De nombreuses recherches ont été menées pour mieux comprendre ce phénomène. Une première série de travaux a porté sur le rôle des pratiques agricoles (Bernard et al., 2009). Au niveau régional, il a tout d'abord été montré que le passage d'une polyculture à une spécialisation dans l'élevage sur les plateaux du Jura à partir des années 1950 est le principal facteur ayant déclenché ce phénomène (Giraudoux et al. 1997 ; Fichet-Calvet et al., 2000). Plus précisément, il a été montré que les zones de plateau dans lesquelles les labours occupaient encore au moins 15% de la SAU étaient moins touchées par les pullulations (Delattre et al., 1988). Au-delà de ce constat global, les pratiques agricoles ont été étudiées au niveau parcellaire, montrant que les populations de campagnols avaient une préférence pour les couverts herbacés dense et de grande taille (Saucy, 1988). La fertilisation des sols et la fauche fréquente des prairies (jusqu'à 3 fois par an) jouent également un rôle important, favorisant la croissance rapide de graminées à faible diversité spécifique (Morilhat et al., 2007). Enfin le degré d'acidité des sols participe lui aussi à expliquer la variabilité dans la dynamique des populations de campagnols. Au contraire, le labour et le piétinement par le bétail freinent l'installation de nouvelles colonies (Delattre et al., 2006).

La question du contexte paysager a fait également l'objet de plusieurs recherches, orientées sur le rôle de la composition et de la configuration du paysage sur la dynamique des populations. A l'échelle de secteurs d'environ 25 km², un « effet de composition paysagère » a été identifié. Il a été montré que les foyers à partir desquels les vagues de pullulation se produisent sont localisés préférentiellement dans des prairies permanentes en openfields (Duhamel et al., 2000). Cependant, les trois principaux épïcêtres n'ont pas tout à fait les mêmes contextes paysagers. Inversement, les zones où la propagation s'éteint sont caractérisées par des paysages comportant davantage d'éléments boisés : mosaïques bois/prairies, réseaux de haies (Duhamel et al., 2000). La vitesse de propagation est également variable selon les caractères paysagers : les prairies en openfield sont le cadre de propagations rapides, alors que les structures bocagères (a priori en raison des facteurs de prédation) bloquent temporairement cette diffusion et ne sont finalement envahies qu'une fois les openfields totalement colonisés (Foltête et al., 2005 ; Foltête et al., 2008 ; Berthier et al., 2009). Ici les remembrements parcellaires qui ont eu lieu depuis les années 60 sont fortement en cause. Au niveau très local des parcelles agricoles cette fois, il a été montré que la croissance des populations était renforcée par l'existence de grands réseaux de galeries creusés par les taupes (Delattre et al., 2006). Enfin, le contexte paysager des parcelles influence

également la vitesse et l'intensité des pullulations, la localisation dans de grandes taches prairiales étant un facteur qui augmente l'intensité, alors que la densité des lisières prairies-bois joue en sens inverse (Morilhat et al., 2008).

Références

- Berthier K., Chaval Y., Galan M., Bryja J., Charbonnel N., Cosson JF., 2009. La dispersion individuelle, conséquences. in: Delattre P., Giraudoux P. (eds.), *La lutte raisonnée contre le campagnol terrestre : Enjeux et perspectives*. QUAE, 39-47.
- Delattre P., Clarac R., Melis J.P., Giraudoux P., 2006. How moles contribute to colonization success of water voles in grassland: implication for control. *Journal of Applied Ecology* 43: 353-359.
- Delattre P., Giraudoux P. (coords.), 2009. *Le campagnol terrestre : prévention et contrôle des populations*. Editions QUAE, Versailles.
- Duhamel R., Quéré J.P., Delattre P., Giraudoux P., 2000. Landscape effects on the population dynamics of the fossorial form of the water vole (*Arvicola terrestris sherman*). *Landscape Ecology* 15: 89-98.
- Fichet-Calvet E., Pradier B., Quéré J.P., Giraudoux P., Delattre P., 2000. Landscape composition and vole outbreak; evidence from an eight year study of *Arvicola terrestris*. *Ecography* 23: 659-668.
- Foltête J.C., Cosson J.F., Berthier K., 2008. Cost-distance defined by a topological function of landscape. *Ecological Modelling* 210: 104-114.
- Foltête J.-C., Berthier K., Cosson J.-F., 2005. Paysage et pullulation animale : les facteurs paysagers de la vitesse de propagation des vagues de pullulations du campagnol terrestre, *Cybergéo, revue européenne de géographie*, 306.
- Giraudoux P., Delattre P., Habert M., Quéré J.P., Deblay S., Defaut R., Duhamel R., Moissenet M.F., Salvi D., Truchetet D., 1997. Population dynamics of fossorial water vole: a land use and landscape perspective. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 66: 47-60.
- Morilhat C., Bernard N., Bournais C., Meyer C., Lamboley C., Giraudoux P., 2007. Response of *Arvicola terrestris scherman* Shaw populations to agricultural practices and *Talpa europaea* abundance in Eastern France. *Agriculture, Ecosystem & Environment* 122: 392-398.
- Morilhat C., Bernard N., Foltête J.-C., Giraudoux P., 2008. Neighbourhood landscape effect on population kinetics of the fossorial water vole (*Arvicola terrestris scherman*). *Landscape Ecology* 23: 569-579.
- Quéré J.P., Garel J.P., Rous C., Pradier B., Delattre P., 1999. Estimer les dégâts causés par les pullulations du Campagnol terrestre (*Arvicola terrestris*) en prairie naturelle. *Fourrages* 158 : 133-147.
- Saucy F., 1988. Dynamique de population, dispersion et organisation sociale de la forme fouisseuse du campagnol terrestre. Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel.

2. Problématique et objectifs du projet

Les recherches déjà réalisées sur les campagnols terrestres ont permis d'apporter plusieurs éléments dans la compréhension du phénomène de diffusion des pullulations. Toutefois, certaines questions restent en suspens. En constat général, il est admis que le problème des pullulations de campagnols terrestres est multifactoriel, étant conditionné par une série de facteurs fortement imbriqués, impliquant à la fois les pratiques agricoles et le cadre paysager. Sachant qu'il est difficile et peu réaliste de mettre en place un modèle (analytique ou fondé sur la simulation) intégrant tous les paramètres identifiés comme des cofacteurs de la dynamique des populations, la question est de connaître la validité d'une modélisation moins ambitieuse, réalisée au niveau des structures paysagères. L'hypothèse est qu'un modèle parvenant à capter assez d'informations pertinentes pour représenter le phénomène de diffusion des pullulations à l'échelle régionale pourrait constituer une base efficace pour guider l'action sur le terrain, en termes de gestion paysagère et de pratiques agricoles. La mise en place d'un tel modèle doit permettre de répondre à plusieurs questions :

- comment définir des zones de suivi des populations qui soient des entités fonctionnelles du point de vue de la cinétique de la diffusion ?

- comment agir pour limiter la diffusion des pullulations et éviter l'usage massif de pesticide ?
- une gestion paysagère visant à limiter la diffusion est-elle compatible avec la préservation de la connectivité du paysage pour les autres espèces ?

La connectivité paysagère est une notion clé à la fois pour tenter de mieux comprendre la diffusion des pullulations et pour agir concrètement contre ce phénomène. Le modèle spatial à construire doit donc intégrer explicitement cette notion. Dans la littérature scientifique, il existe plusieurs approches pour modéliser la connectivité (Calabrese et Fagan, 2004). Les métriques paysagères utilisées de façon classique en écologie du paysage permettent par exemple de rendre compte de la composition et de la configuration paysagère, mais elles sont fortement limitées dans leur capacité à restituer la dimension fonctionnelle de la connectivité. A l'inverse, des simulations individus-centrées peuvent être appliquées pour mieux appréhender la complexité des interactions entre l'espèce et son environnement (prédateurs, ressources) (Note et Poix, 2006). Cette approche est toutefois plus difficile à reproduire à une échelle compatible avec une vision d'ensemble du phénomène ; elle est aussi plus difficile à valider.

Les approches fondées sur les métriques paysagères et les modèles de simulation ne sont donc pas pleinement adaptées pour identifier les zones dans lesquelles une action de lutte non chimique peut être menée. Une telle lutte suppose que le réseau écologique qui favorise le déplacement de ce phénomène soit représenté de façon assez précise tout en couvrant un espace important. Cette condition peut être remplie par les graphes paysagers, puisque ces méthodes permettent de représenter le réseau écologique d'une espèce ou d'une communauté sous la forme simplifiée d'un graphe (Urban et Keitt, 2001 ; Urban et al., 2009 ; Galpern et al., 2011). Dans ce graphe, les taches d'habitat préférentiel de l'espèce correspondent aux nœuds. Les nœuds peuvent être reliés par des liens de différentes façons, en fonction des hypothèses biologiques. En général, les liens entre deux taches sont pondérés par la distance de moindre coût, intégrant les différents niveaux de résistance au déplacement des modes d'occupation du sol rencontrés. A partir d'un graphe donné, de multiples métriques de connectivité peuvent être calculées pour exprimer certaines propriétés du réseau (Rayfield et al., 2011).

La modélisation du réseau écologique par les graphes paysagers offre donc un intéressant compromis entre la relative simplicité des données qui alimentent le modèle et sa bonne significativité écologique (Calabrese et Fagan, 2004). En outre, ces modèles sont a priori pertinents pour aborder les questions posées par les pullulations de campagnols terrestres, car ils permettent d'identifier les points vulnérables du réseau écologique, en appliquant les mêmes méthodes que celles utilisées pour la « priorisation » des zones de conservation, c'est-à-dire la hiérarchisation des lieux en fonction de leur aspect plus ou moins stratégique par rapport à l'ensemble du réseau (Saura et Pascual-Hortal, 2007).

Sous l'hypothèse que la connectivité des zones de prairies est un facteur important dans la diffusion des campagnols terrestres, le projet a pour objectif d'utiliser les modèles de graphes paysagers pour analyser le réseau prairial et guider les actions possibles contre ce phénomène de diffusion. Ces actions concernent des aménagements paysagers à mener sur le terrain, vus comme une alternative à l'usage massif de pesticides. Le projet permettra de répondre aux questions suivantes :

- quelles sont les modalités de construction des graphes paysagers les plus pertinentes pour modéliser le réseau prairial ? L'aspect statique du modèle est-il compatible avec l'aspect cyclique des pullulations ?
- la modélisation du réseau prairial par les graphes paysagers permet-elle une délimitation d'entités spatiales pertinentes pour le suivi et le contrôle des populations ?

- la notion de nœud-clé, permettant de localiser les points de vulnérabilité du réseau, est-elle pertinente pour localiser les zones où mettre en application des aménagements paysagers destinés à limiter le phénomène de diffusion ? Comment passer du modèle spatial à l'action concrète sur le terrain en mobilisant la profession agricole ?

- la recherche d'une déconnexion du réseau prairial est-elle compatible avec le maintien des autres continuités écologiques ?

Références

Calabrese J.M., Fagan W.F., 2004. A comparison-shopper's guide to connectivity metrics. *Frontiers in Ecology and Environment* 2(10): 529-536.

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.

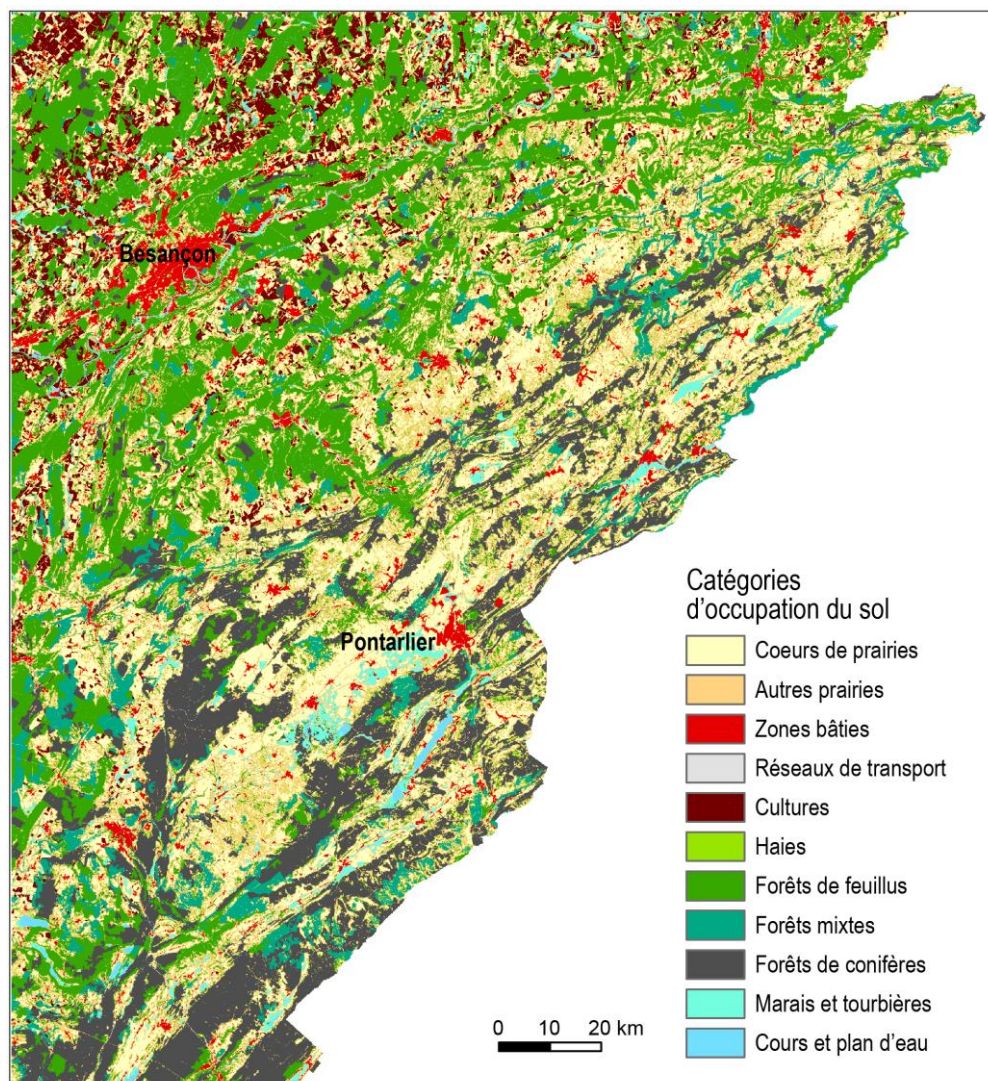
Note P., Poix C., 2006. Simulations spatialisées des pullulations de campagnols terrestres : Etude de l'influence des structures paysagères. *Cybergéo*, 346.

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

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* 83:91-103.

Urban D.L., Keitt T.H., 2001. Landscape connectivity: a graph theoretic approach. *Ecology* 82: 1205-1218.

Urban D.L., Minor E.S., Treml E.A., Schick R.S., 2009. Graph models of land mosaics. *Ecology Letters* 12: 260-273.



3. Modélisation du réseau prairial à l'échelle régionale

3.1. Cartographie d'occupation du sol

La mise en place de graphes paysagers nécessite de disposer de cartes d'occupation du sol décrivant la totalité des zones d'étude, et ne se limitant pas à l'habitat sur lequel porte l'analyse (la prairie) mais incluant toutes les catégories d'occupation du sol de façon à représenter l'hétérogénéité de la matrice paysagère. Cette cartographie doit être réalisée à une haute résolution spatiale, pour que les éléments paysagers importants (haies, cours d'eau, zones bâties par exemple) vis-à-vis des campagnols terrestres puissent être représentés. La base Corine Land Cover, qui a le mérite de couvrir toutes les régions françaises, n'est donc pas adaptée au problème posé ici.

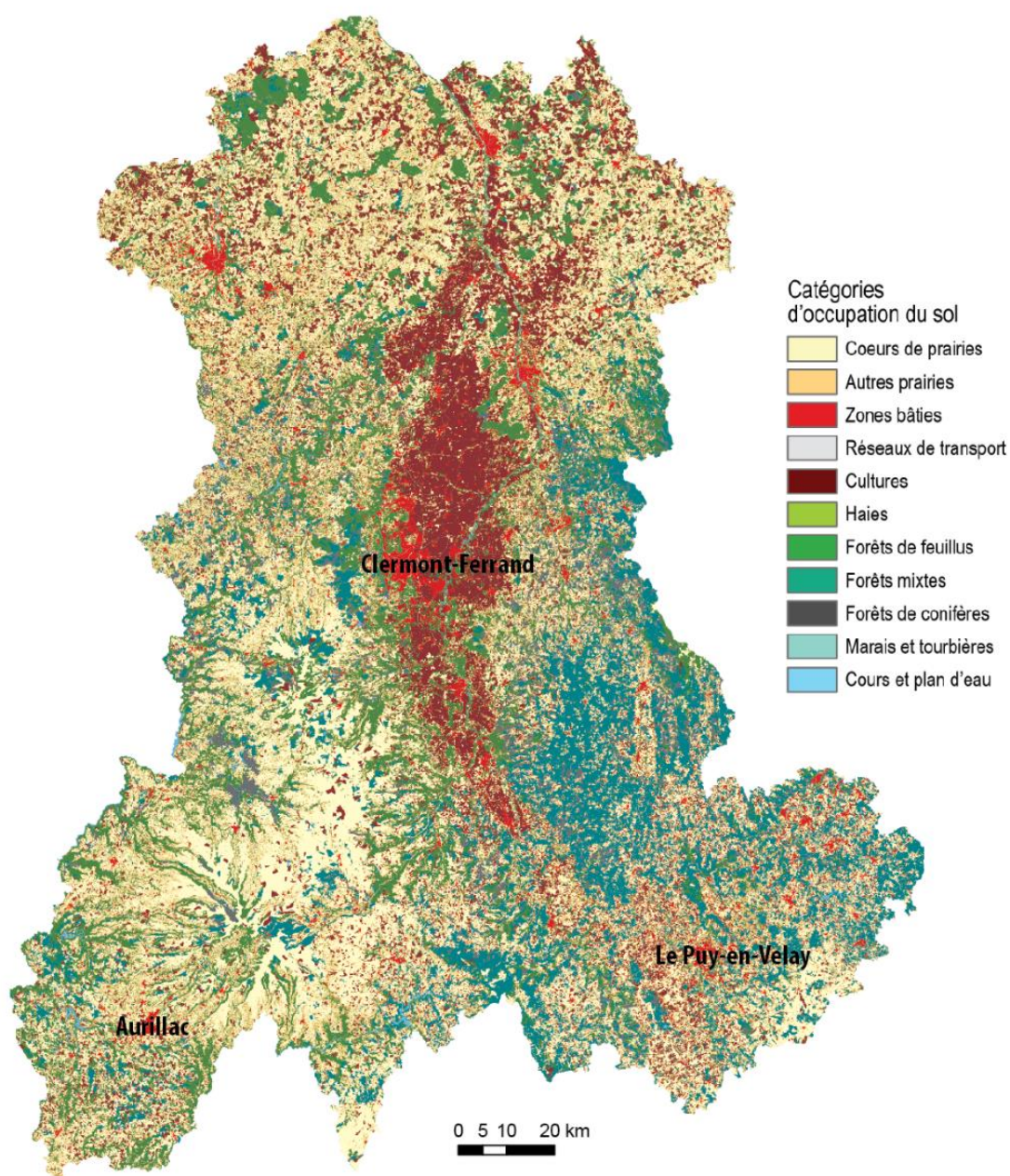


Figure 2. Carte d'occupation du sol de la région Auvergne.

Une carte spécifique a donc été mise en place dans les deux régions étudiées. Cette carte repose sur une combinaison entre deux sources principales :

- BD Topo (IGN). Cette base sert à pour représenter les surfaces boisées, l'hydrographie, le bâti, les réseaux de transport.
- Registre Parcellaire Graphique (Agence de Services et de Paiements). Cette base renseigne sur les types d'usage agricole, à partir des déclarations des exploitants agricoles à l'échelle d'îlots (groupes de parcelles).

Ces deux bases au format vectoriel ont été associées dans un fichier au format matriciel (raster) à une résolution spatiale de 10 m. Un traitement spécifique a été appliqué à certaines catégories :

- définition de zones bâties à partir des bâtiments individuels, pour inclure les surfaces artificialisées non bâties (parkings, jardins, etc.). Ce traitement est fondé sur une dilatation des surfaces des bâtiments, suivie d'une érosion.
- extraction des haies présentes sur la couche « végétation » de la BD Topo, par une érosion des surfaces boisées, suivie d'une dilatation. Il est à noter que les haies définies de cette façon sont limitées aux boisements linéaires tels que définis par la BD Topo (largeur minimale de 5 m).

Au final, les cartes distinguent 10 catégories d'occupation du sol : prairies, zones bâties, réseaux de transport, cultures, haies, forêts de feuillus, forêts de conifères, forêts mixtes, marais et tourbières, surfaces en eau. La catégorie « prairie » a ensuite été subdivisée en deux en préparation des graphes paysagers. En effet, seuls les cœurs de prairies seront ensuite considérés comme des taches d'habitat. La figure 1 montre la carte résultante pour le terrain d'étude franc-comtois ; la figure 2 montre la carte correspondant à la région Auvergne.

3.2. Modélisation du réseau prairial en Franche-Comté

3.2.1. Graphe générique

Un graphe paysager représentant le réseau de prairie au niveau régional (zone englobant essentiellement les plateaux jurassiens du département du Doubs) avait déjà été réalisé dans une étude précédente (Foltête et Giraudoux, 2012), à partir d'une carte d'occupation du sol moins précise et dérivée d'une classification d'image satellitaire. Cette première étude avait permis de tester différents paramétrages du graphe, pour représenter avec le plus de validité l'« infrastructure prairiale » telle qu'elle est perçue par les campagnols terrestres.

La même suite d'opérations a donc été réalisée ici, à partir de la nouvelle carte : identification des taches de prairies en sélectionnant les cœurs prairiaux à partir d'une surface minimale de 5 ha (4132 taches), définition des liens entre les taches par calcul des chemins de moindre coûts (environ 12 000 liens). Les valeurs de coûts attribuées aux catégories d'occupation du sol sont reprises du scénario le plus pertinent suivant les résultats obtenus dans Foltête et Giraudoux (2012). Les figures 3 et 4 donnent un aperçu cartographique des résultats.

3.2.2. Robustesse du graphe par rapport aux cycles démographiques des campagnols

Objectif

La phase de construction du modèle spatial a bénéficié des résultats obtenus dans l'étude de Foltête et Giraudoux publiée en 2012, mais une investigation spécifique a été menée ici pour valider la définition

des liens du graphe. Ces liens, qui représentent le potentiel de mouvement entre les taches, sont définis de façon statique, ce qui peut sembler contradictoire avec le caractère périodique des pullulations. En effet, suivant la phase des cycles de pullulations, la diffusion ne s'effectue pas de la même manière (Berthier et al., 2005), et on peut supposer que le rapport qu'entretiennent les populations avec le paysage varie en fonction de ces phases.

Protocole méthodologique

Pour examiner cette question, un protocole spécifique a été mis en place, prenant comme référence les données démographiques enregistrées depuis 1989 dans la partie centrale de la zone d'étude (correspondant à 2337 taches de prairies). Dans cette zone, les densités annuelles de campagnol terrestre connues à l'échelle des communes ont été attribuées aux taches de prairie en utilisant une pondération par les surfaces relatives pour les taches chevauchant plusieurs municipalités. Au terme de cette opération, chaque tache de prairie a été caractérisée par une densité annuelle de campagnol terrestre.

Classe d'occupation du sol	Scénarios de coûts				
	S1. Distance euclidienne	S2. Milieu forestier imperméable	S3. Matrice moyennement perméable	S4. Haies et zones humides très résistants	S5. Matrice perméable
Prairie (cœur)	1	1	1	1	1
Prairie (bordure)	1	1	1	1	1
Bâti	1	50	10	10	5
Réseaux	1	50	10	10	5
Cultures	1	25	10	10	5
Haies, arbustif	1	25	10	1000	5
Forêt de feuillus	1	1000	100	100	10
Forêts mixtes	1	1000	100	100	10
Forêts de conifères	1	50	100	100	10
Zones humides	1	50	10	1000	5
Cours et plan d'eau	1	1000	100	1000	10

Tableau 1. Scénarios de comportement de déplacement du campagnol terrestre dans le paysage. Le scénario S2 est le résultat d'une analyse menée dans Foltête et Giraudoux (2012).

Plusieurs jeux de liens ont été mis en place entre les taches pour représenter cinq scénarios d'interaction entre les campagnols et le paysage (Tableau 1). Suivant le scénario S1 où les liens sont calculés suivant une distance euclidienne, on suppose que le paysage ne joue pas de rôle dans l'orientation des déplacements. Pour tous les autres scénarios, les liens ont été calculés en distances de moindre coût cumulés. Le scénario S2 correspond à une forte imperméabilité de certains éléments de la matrice paysagère, notamment le milieu forestier. Ce jeu de coût est issu de l'analyse menée dans Foltête et Giraudoux (2012). Le scénario S3 propose la même hiérarchie entre classes d'occupation du sol, mais avec une matrice paysagère moins résistante. Le scénario S4 est similaire au scénario S3 mais en attribuant une plus forte résistance aux haies et zones humides par rapport aux forêts. Enfin le scénario S5 correspond à une matrice relativement perméable.

Il s'agit ensuite de comparer la pertinence des scénarios en fonction de leur aptitude à modéliser la dynamique de population au cours du temps. Pour un scénario donné, le graphe a été utilisé pour attribuer à chaque tache un indicateur local du potentiel de population de campagnols terrestres. Cet indicateur est la métrique *Area Weighted Flux* (Urban and Keitt 2001 ; Foltête et al., 2012) adaptée en intégrant les données de densité de population de la façon suivante :



Figure 3. Exemple d'un graphe réalisé sur le terrain franc-comtois.

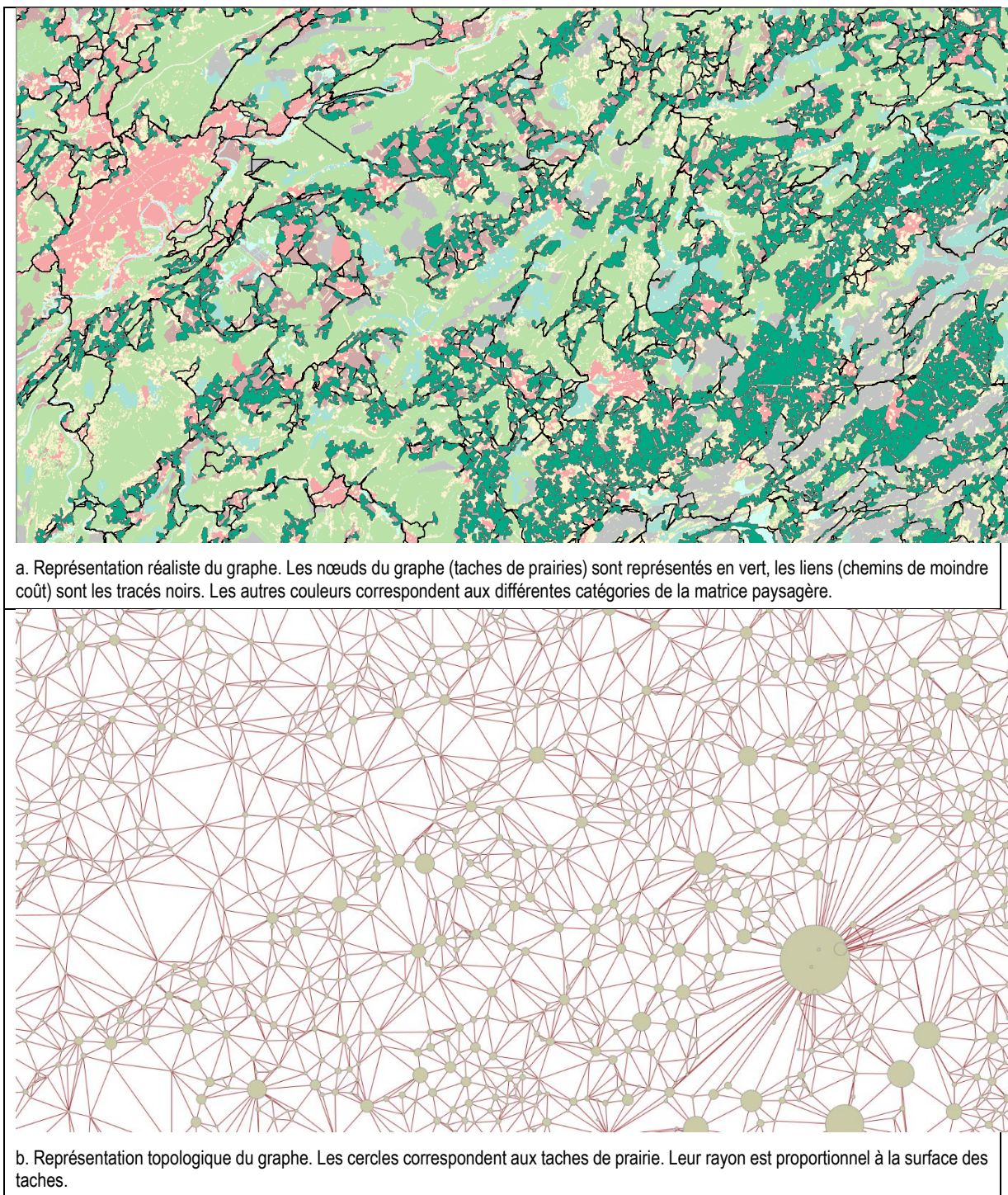


Figure 4. Exemple d'un graphe réalisé sur un extrait de la zone étudiée en Franche-Comté.

$$F_{it} = \sum_{j \neq i} a_j u_{jt} e^{-\alpha d_{ij}}$$

où F_{it} est la métrique F pour la tache i et l'année t , a_j est la surface des taches j , u_{jt} est la densité de population de la tache j à l'année t , d_{ij} est la distance séparant les taches i et j , et α est le coefficient exprimant la décroissance du potentiel en fonction de la distance. L'évaluation d'un scénario a été fondée sur l'hypothèse que la dynamique de population d'une tache entre une année t et une année $t+1$ peut

être partiellement expliquée par le potentiel local de population présent à l'année t . La dynamique locale de population a été calculée comme dans Bjornstad et al. (1999) :

$$\Delta u_t = \log u_t - \log u_{t-1}$$

Selon l'hypothèse précédente, Δu est la variable cible d'un modèle de régression linéaire où le potentiel F est une variable explicative :

$$\Delta u_t = \beta_0 + \beta F_{t-1}$$

Pour un scénario de coût donné, le pouvoir explicatif de ce modèle permet d'estimer sa capacité à rendre compte du phénomène de diffusion d'une année à l'autre. Ce modèle a été appliqué à deux situations correspondant à des phases distinctes du phénomène de pullulation :

- phase de croissance: sous-ensemble des taches pour lesquelles (1) la densité est nulle à la date $t-1$ et (2) la densité est supérieure à zéro à la date t . Le deuxième critère sert à écarter de l'analyse les taches situées en dehors de la zone concernée par les pullulations pour l'année considérée. Dans ce cas, toutes les valeurs de Δu sont positives, donc le coefficient β est positif si le niveau de connectivité d'une tache détermine l'augmentation de sa densité.
- phase de déclin : sous-ensemble des taches pour lesquelles la densité est maximale à la date $t-1$. Dans ce cas, les valeurs de Δu sont négatives ou nulles et le coefficient β est positif si le niveau de connectivité d'une tache ralentit le déclin des pullulations.

Les effectifs de campagnols concernés par la phase de croissance (augmentation d'une année à l'autre) et par la phase de déclin (diminution d'une année à l'autre) ont été estimés à partir des densités des taches (figure 5). Les courbes montrent que les phases concernent des effectifs variables selon les années, en fonction du cycle. Pour que les résultats soient représentatifs, les modèles de régression ont été appliqués à partir d'un seuil de variation de deux millions d'individus. Le modèle a donc été appliqué pour 14 phases de croissance et 9 phases de déclin, ce qui totalise 25 cas étudiés.

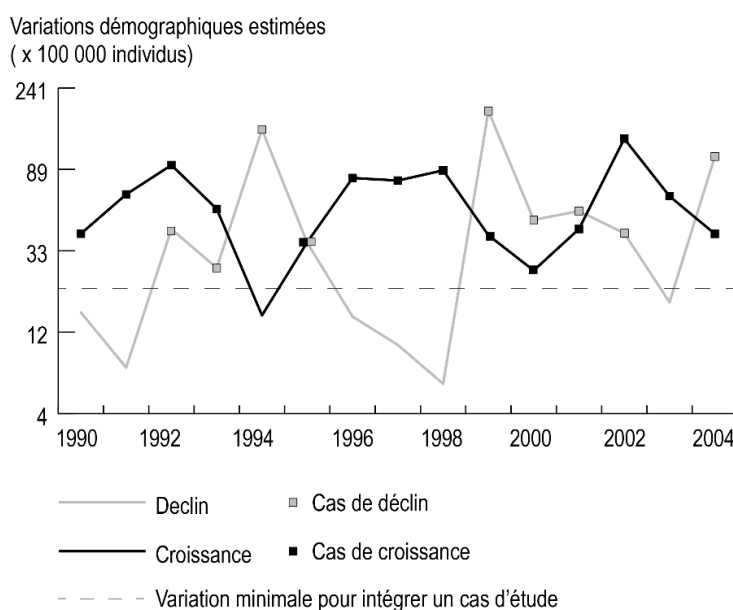


Figure 5. Variations démographiques dans l'ensemble de la zone d'étude. Chaque point de la courbe correspondant à une phase de croissance représente la somme des variations positives durant l'année précédente. Inversement la courbe de déclin représente la somme des variations négatives.

Résultats obtenus

D'après les résultats (voir annexe 1), il apparaît que le pouvoir explicatif des régressions servant à comparer les scénarios est relativement faible, puisque les coefficients r^2 sont la plupart du temps inférieurs à 0,15. Deux raisons principales sont à invoquer pour expliquer ce résultat. Tout d'abord on sait que le phénomène de pullulation de campagnols terrestres est multifactoriel, puisque de nombreux éléments jouent sur l'intensité et la rapidité de la diffusion (Lidicker 2000, Delattre et Giraudoux 2009). L'explication venant du potentiel démographique estimé pour l'année précédente est donc forcément partielle. Ensuite, les données disponibles sur l'ensemble de la zone d'étude ne sont pas précises, ni d'un point de vue démographique (valeurs de densité évaluées par des experts), ni d'un point de vue spatial (une valeur annuelle par commune). Néanmoins, comme dans Foltête et Giraudoux (2012), les faibles valeurs statistiques obtenues peuvent donner lieu à des interprétations cohérentes.

L'examen précis des coefficients maximums (voir annexe 1) montre que le scénario S2 s'avère la plupart du temps plus pertinent que les autres pour représenter les phases de croissance. Les coefficients positifs indiquent qu'en général, plus une tache non colonisée est bien connectée à d'autres taches déjà occupées par l'espèce, plus sa colonisation sera importante. La suprématie du scénario S2 confirme les conclusions de Foltête et Giraudoux (2012), selon lesquelles les massifs forestiers et les surfaces en eau sont les principaux éléments qui canalisent la diffusion des campagnols terrestres.

L'analyse des phases de déclin ne montre pas une telle stabilité, puisque quatre scénarios différents sont successivement optimaux et les pentes de régression s'inversent à plusieurs reprises. On pourrait toutefois déceler un lien entre ces éléments et le cycle démographique à l'échelle de toute la zone, tel qu'on peut l'observer sur les courbes totalisant les variations de toutes les taches (figure 5). Si on considère ces courbes, on peut constater que les cas de déclin massif analysés ici s'organisent en période de 4 ans intercalées avec les périodes de croissance massive : de 1992 à 1995, de 1999 à 2002, et finalement 2004. Dans la première partie de ces phases, le déclin se produit localement alors que pour l'ensemble de la zone, la plupart des taches connaissent une phase de croissance (on suppose alors que le déclin affecte surtout les taches qui ont été les premières colonisées à l'échelle régionale). Dans ce cas, le déclin est davantage expliqué par des scénarios de matrice uniforme (S1 en 1992), de perméabilité forte (S5 en 1993 et 2000) ou moyenne (S3 en 1999 et 2004). Les coefficients sont positifs, ce qui peut s'interpréter comme le fait que la bonne connectivité d'une tache au sein du réseau de prairies ralentit le déclin des populations de campagnols, conformément à notre hypothèse initiale.

Inversement, dans la seconde partie de ces phases de déclin, la diminution des pullulations se produit localement à un moment où très peu de taches connaissent une phase de croissance. On remarque dans ce cas un poids important des scénarios de paysage plus imperméable (S2 en 1995 et 2001) mais avec un coefficient de régression négatif. Ceci suggère que les taches bien connectées sont affectées d'un déclin plus fort que les autres taches. Comme le scénario S2 est celui qui explique le mieux la phase de croissance, on peut supposer que l'inversion de la pente représente le moment où au niveau global, on assiste à la diminution des pullulations dans les taches qui ont été colonisées au début de en raison de leur meilleure connexion au réseau.

Au final, l'examen de la robustesse des valeurs de coûts attribuées aux catégories d'occupation du sol pour définir les liens du graphe conduit à une confirmation des résultats obtenus dans Foltête et Giraudoux (2012). Cela justifie l'approche visant à « couper » le réseau prairial pour limiter la diffusion

des pullulations. Cette étude montre toutefois que le rôle du paysage comme un canalisateur de la diffusion des rongeurs ne doit pas être surestimé.

Références

- Berthier K., Galan M., Foltete J.C., Charbonnel N., Cosson J.F., 2005. Genetic structure of the cyclic fossorial water vole (*Arvicola terrestris*): landscape and demographic influences. *Molecular Ecology* 14: 2861–2871.
- Bjornstad O.N., Ims R.A., Lambin X., 1999. Spatial population dynamics: analyzing patterns and processes of population synchrony. *Trends in Ecology and Evolution* 14: 427–432.
- Delattre P., Giraudoux P. (eds.), 2009. *Le campagnol terrestre : prévention et contrôle des populations*. QUAE Edition, Versailles.
- Foltête J.C., Giraudoux P., 2012. A graph-based approach to investigating the influence of the landscape on population spread processes. *Ecological Indicators* 18: 684–692.
- Foltête J.C., Clauzel C., Vuidel G., 2012. A software tool dedicated to the modelling of landscape networks. *Environmental Modelling and Software* 38: 316–327.
- Lidicker W.Z., 2000. A food web / landscape interaction model for microtine rodent density cycles. *Oikos* 91: 435–445.
- Urban D.L., Keitt T.H., 2001. Landscape connectivity: a graph theoretic approach. *Ecology* 82: 1205–1218.

3.3. Modélisation du réseau prairial en Auvergne

3.3.1. Spécificités du terrain auvergnat

Deux limites majeures, inhérentes au terrain Auvergnat, ont remis en cause la modélisation du réseau de prairies à l'échelle de la région entière.

La première est liée à la présence, dans la partie sud-ouest de l'Auvergne, de nombreuses prairies de surface très importante. Ces espaces de prairies présentent une structure continue, par exemple au Puy Mary, pour laquelle la modélisation par les graphes paysagers n'est pas adaptée. Dans cette région, la prairie est la catégorie d'occupation du sol majoritaire, elle joue le rôle de matrice dans le paysage. La notion de tache d'habitat, qui suppose un degré minimal de fragmentation, n'est donc pas pertinente dans ce cas.

La seconde limite concerne l'étendue très importante de la région administrative. En comparaison avec le terrain Franc-Comtois, l'Auvergne présente une vulnérabilité aux pullulations du campagnol sur la quasi-totalité de son territoire (Cantal, Puy-de-Dôme, et plus récemment Haute-Loire et Allier). Ici, la limite est clairement technique, puisque les capacités de calcul dont nous disposons, pourtant déjà très importantes, ne nous ont pas permis de modéliser le graphe paysager à l'échelle de la région entière.

Pour pallier ces limites, il a donc été décidé de recentrer l'analyse sur des espaces très vulnérables, qui présentent un degré suffisant de fragmentation des espaces prairiaux répondant à la définition de tache, et l'étendue spatiale s'accorde avec les capacités de calcul. Le choix s'est donc porté sur le département du Puy-de-Dôme.

3.3.2. Modélisation à l'échelle du département du Puy de Dôme

La mise en place des éléments considérés comme les nœuds du graphe a suivi un protocole spécifique par rapport au terrain franc-comtois. La raison initiale est le caractère plus continu des surfaces de prairie, mais nous verrons par la suite que les choix effectués ici se justifient aussi par des arguments opérationnels. Comme en Franche-Comté, la classe initiale de prairies a été subdivisée en deux sous-classes : « cœurs de prairies » et « autres prairies » (figure 6). Mais ici, les cœurs de prairie n'ont pas constitué directement les éléments d'analyse, étant trop étendus et contigus, c'est pourquoi ils ont fait l'objet d'une segmentation par le biais des îlots du Registre Parcellaire Graphique. Les limites des îlots

de prairies de cette base ont donc été ajoutées dans la classe « autres prairies ». Les unités élémentaires de l'analyse sont donc ici des groupes de parcelles de prairie qui peuvent être facilement mises en correspondance avec les agriculteurs qui les gèrent, par rapport aux taches d'occupation du sol considérée dans l'application au terrain franc-comtois.

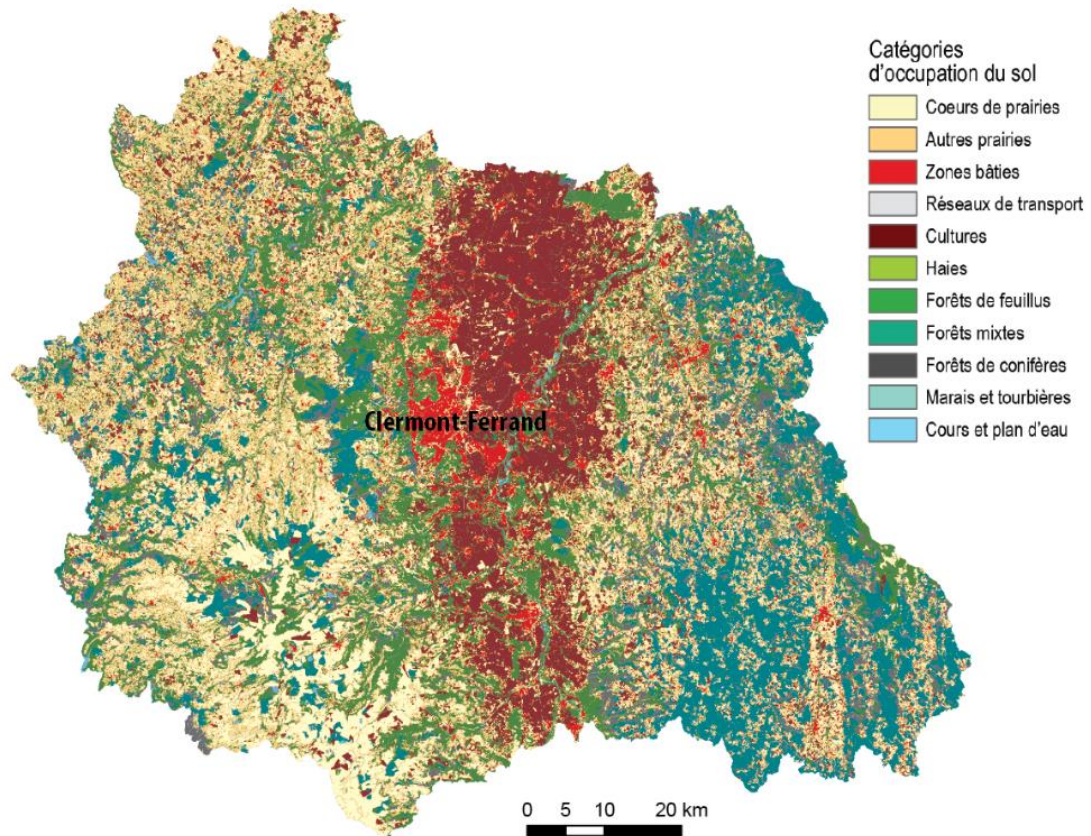


Figure 6. Carte d'occupation du sol du département du Puy-de-Dôme

Afin de calculer les chemins de moindre coût entre les îlots de prairie, une valeur de résistance a été attribuée à chaque catégorie d'occupation du sol, en reprenant les valeurs utilisées dans Foltête et Giraudoux (2012). Comme dans cette étude, le graphe construit n'a pas été seuillé. Ce choix s'explique par le peu de connaissances sur la distance potentielle de diffusion du campagnol d'une prairie à une autre. Cependant une forme de seuillage intervient dans le calcul de métriques de connectivité. En effet, le calcul de la métrique utilisée dans cette étude est pondéré par une probabilité de dispersion décroissante avec la distance. Ici, les paramètres retenus représentent une probabilité de dispersion de 50% à 1000 mètres de chaque tache (Foltête et Giraudoux, 2012).

4. Appui à la mise en place d'un découpage spatial pour le suivi des populations

4.1. Contexte et objectif

En Auvergne et en Franche-Comté, le suivi des populations est réalisé depuis plusieurs décennies par les FREDON (Fédération Régionale de Défense contre les Organismes Nuisibles), suivant des protocoles d'observation qui diffèrent quelque peu selon les régions (voir www.campagnols.fr). En Franche-Comté, un suivi est effectué deux fois par an au niveau de 581 communes du Doubs et du Jura depuis 2002 (depuis 1989 pour une sous-partie de ces communes). Dans chaque commune, un score est attribué au printemps et en automne, à partir d'observations réalisées par des agents de terrain, des techniciens de la FREDON et des observateurs volontaires (le plus souvent des agriculteurs). Les données récoltées permettent d'observer l'évolution de la distribution spatiale des populations de campagnols terrestres, et indirectement d'analyser et de mieux comprendre le phénomène des pullulations. Une finalité importante de ce suivi est de fournir une aide à la décision pour l'encadrement de la lutte par des moyens chimiques. En effet, l'usage des appâts à base de bromadiolone est désormais réglementé en raison de ses conséquences néfastes sur l'environnement. Il s'agit donc d'anticiper les fortes infestations, notamment en délivrant des bulletins d'information pour cibler la lutte chimique dans les contextes de basse densité avec risque fort de pullulation (Couval et al., 2009).

Actuellement, les moyens alloués pour le suivi des populations sont en diminution, et l'observation systématique de toutes les communes (ou de toutes les zones) est remise en question. Dans ce contexte, il semble intéressant de procéder au suivi des populations à partir d'un découpage spatial spécifiquement dédié, plutôt que d'utiliser le maillage communal comme grille d'observation. Dans un tel découpage, il est attendu que les zones à définir correspondent à des ensembles de prairies ayant la même dynamique de pullulation. L'identification de ce découpage permettrait de réaliser le suivi en adaptant le réseau d'observation en fonction des zones, donc en mobilisant moins d'observateurs.

Comme le graphe paysager est une représentation simplifiée du réseau d'habitat du campagnol terrestre, on peut supposer qu'il constitue une base intéressante pour définir un découpage adapté au suivi démographique des campagnols terrestres. La question est donc de savoir de quelle façon utiliser le graphe dans la perspective d'un tel découpage et comment trouver des éléments de validation du découpage proposé à partir du graphe.

4.2. Méthodes

Le graphe paysager peut facilement produire un découpage du réseaux en différentes zones par le biais du seuillage des liens. En effet, si on procède à un seuillage de la distance caractérisant les liens, on crée un graphe dans lequel certaines parties sont déconnectées les unes des autres (Galpern et al., 2011). Ces sous-graphes (ou composantes du graphe) forment donc un découpage facile à constituer, l'utilisateur devant simplement spécifier la distance de seuillage. Cependant, cette méthode très simple est a priori peu adaptée, en raison du caractère rigide du seuillage à une valeur fixe. Elle aura tendance à multiplier les zones là où les taches sont plus espacées, et à limiter fortement le nombre de zones là où les taches sont plus proches les unes des autres (Bodin et Norberg, 2007). Dans la littérature générique sur les graphes, il existe de très nombreuses approches pour réaliser une segmentation (Bichot et Siarry, 2010). Les approches ascendantes, consistant à agglomérer progressivement les nœuds du

graphe, sont d'un usage plus courant (Newman et Girvan, 2004). Cependant, les travaux appliqués récemment aux réseaux sociaux ont contribué à l'émergence de nouvelles méthodes, notamment la définition des « structures de communautés » (Girvan et Newman, 2002), approche de segmentation descendante fondée sur l'indice de centralité intermédiaire (betweenness centrality index) comme indicateur des liens de faible fréquence potentielle. Cette approche a été mise en œuvre dans le cas d'un graphe paysager par Bodin et Norberg (2007), montrant un résultat convaincant en comparaison avec des méthodes plus anciennes, et s'avérant adaptée aux graphes aux liens dont l'impédance est continue (ici la distance spatiale séparant les taches) et non binaire. Plus récemment encore, Gao et al. (2013) ont appliqué une méthode fondée sur la notion de modularité pour définir des compartiments dans un graphe paysager. La modularité est un indice appliqué à un graphe (ou à une sous-partie de ce graphe) pour mesurer la force des liens unissant les nœuds regroupés dans des compartiments, par rapport à tous les liens possibles. D'après ces travaux, l'approche par modularité présente un avantage par rapport à la méthode des structures de communauté. D'autres recherches récentes sur l'analyse des réseaux confirment la pertinence de la notion de modularité (par exemple Li, 2013), c'est pourquoi cette approche a été choisie dans le cas présent. Ce choix se justifie aussi par le fait que la méthode des structures de communauté s'adapte mal aux graphes de grande taille. A titre de comparaison, Bodin et Norberg (2007) ont réalisé leur étude sur un graphe de forêts malgaches contenant une centaine de liens alors que le graphe des prairies franc-comtoises en contient plus de 12 000.

La mise en œuvre d'une segmentation de graphe des prairies par la méthode fondée sur la modularité a nécessité une adaptation de l'approche présentée dans Guo et al. (2013), car celle-ci considère les liens de façon uniforme, sans tenir compte de leur distance et du poids de taches qu'ils relient. Or, dans notre cas, il existe une grande variation des tailles de tache de prairie et il n'est pas logique de considérer chaque tache avec le même poids dans l'analyse, puisque leur potentiel démographique dépend fortement de cette taille. Il a donc été décidé d'implémenter la procédure de segmentation dans le logiciel Graphab, en adaptant le calcul de la modularité. Pour intégrer la distance et le poids des taches, un lien joignant les taches i et j est caractérisé par le flux potentiel suivant :

$$flux = (a_i a_j)^\beta e^{-\alpha d_{ij}}$$

où a_i et a_j sont les surfaces respectives des taches i et j , d_{ij} est la distance coût séparant les taches i et j , α représente le frein de la distance et β représente l'équilibre entre les surfaces et les distance dans le calcul du flux. La méthode d'implémentation est fondée sur un « algorithme glouton » décrit dans Brandes et al. (2008). A partir d'un graphe donné, tous les nombres de compartiments sont testés (2, 3, 4, ... n compartiments) et pour chacun, l'algorithme identifie le découpage qui maximise la modularité.

La validation de la segmentation et l'identification du nombre optimal de compartiments ont été fondées sur des analyses statistiques utilisant les densités de campagnols terrestres estimées dans chaque tache annuellement de 1989 à 2004 (comme dans la section 3.2.2.). Dans le cas d'une partition bien adaptée pour distinguer des zones de même dynamique démographique, ces données sont supposées présenter une variabilité plus faible à l'intérieur des compartiments qu'entre les compartiments. On retrouve ici le principe d'une analyse de variance reposant sur le théorème de Huygens, mais s'appliquant à un ensemble de données multivariées. La validation s'est donc basée sur le critère Lambda de Wilks (Webster, 1972), dont les valeurs sont comprises entre 0 (variation intra-compartiments nulle, la segmentation est parfaite) et 1 (autant de variations inter et intra compartiments, la segmentation est non pertinente). Toutefois, le critère de Wilks décroît « naturellement » à mesure que le nombre de

compartiments augmente, c'est pourquoi la comparaison de plusieurs propositions de segmentation doit se fonder sur un indicateur dérivé proposé par Webster (1972) : m^2L , où m est le nombre de compartiments et L est le critère de Wilks correspondant. Quand cet indicateur se stabilise ou augmente, il renseigne sur un niveau de découpage pertinent.

4.3. Résultats

Le graphe qui a servi de support à la segmentation est le graphe planaire non seillé construit à partir du scénario S2 (section 3.2.2.) où le milieu forestier occasionne un fort effet de barrière. Le paramètre β a été maintenu à sa valeur de 1 par défaut, et le paramètre α a été réglé pour que les flux correspondent à une grande amplitude spatiale, en fixant arbitrairement la probabilité $p = e^{-\alpha d_{ij}}$ à 0.05 pour une distance équivalente à 10 000 unités de coûts (c'est-à-dire environ 15 km).

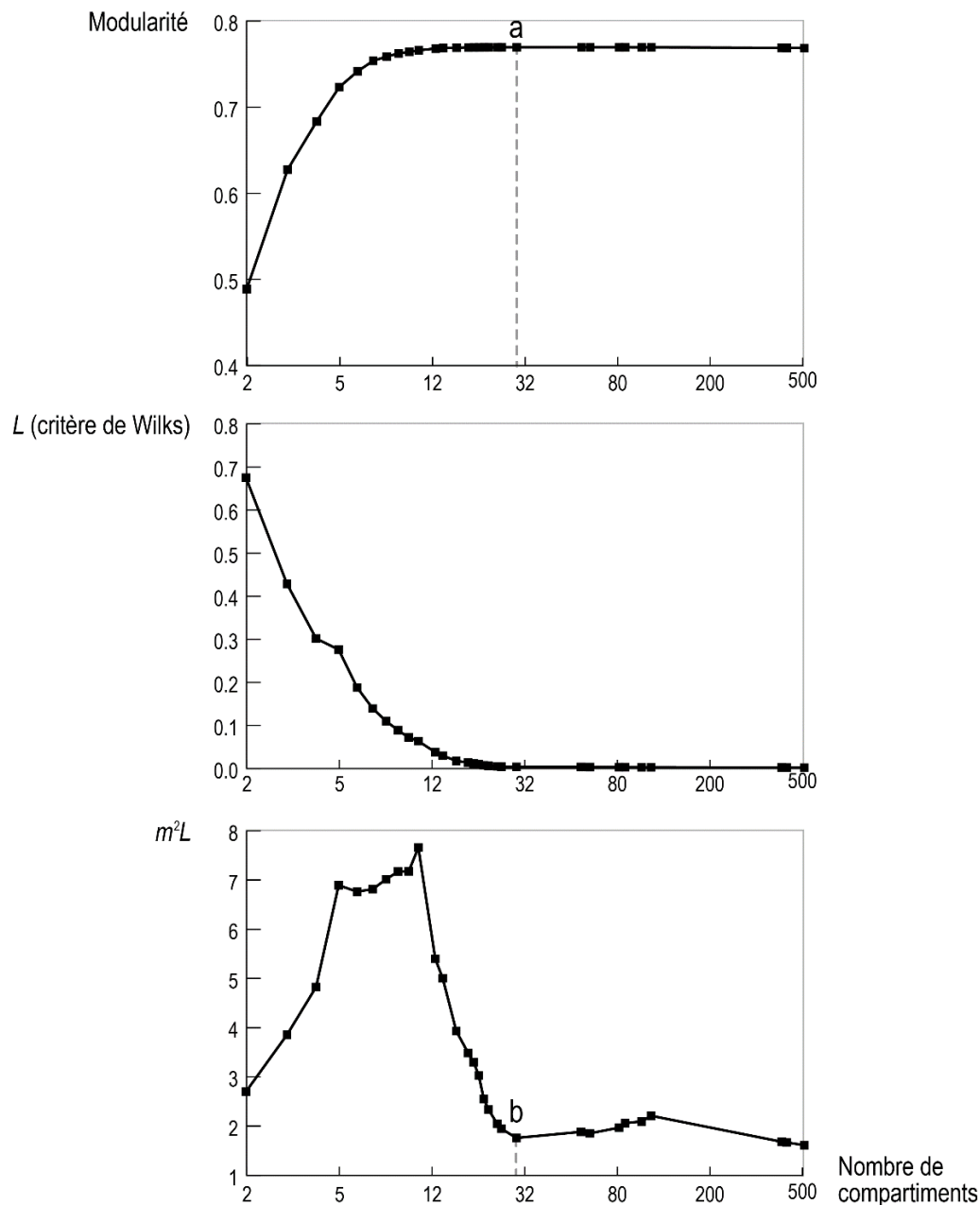


Figure 7. Critères pour la segmentation du graphe des prairies en fonction du nombre de compartiments. L'échelle des abscisses est logarithmique.

500 découpages ont été réalisés successivement et pour chacun le critère L de Wilks et l'indicateur m^2L ont été calculés. L'ensemble de ces résultats abouti à la figure 7 où les trois critères sont représentés en fonction du nombre de compartiments.

La modularité augmente rapidement en fonction du nombre de compartiments, pour atteindre un plateau à partir d'une dizaine de compartiments. Dans le détail cependant, la modularité maximale est atteinte pour 29 compartiments (point a). Parallèlement, le critère de Wilks diminue fortement, alors que l'indicateur m^2L , après avoir fluctué jusqu'à une dizaine de compartiments, diminue fortement lui aussi, mais seulement jusqu'à un point d'inflexion (minimum relatif) correspondant à 29 compartiments (point b). A cet endroit, l'inversion de la courbe indique que du point de vue de la démographie des campagnols, les 29 zones définies occasionnent la plus grande homogénéité interne.

La correspondance trouvée entre le point de modularité maximale et le minimum relatif sur la courbe de l'indicateur m^2L montre la forte relation entre les données d'occupation du sol (de nature structurelle) à l'origine du graphe et les données démographiques (de nature fonctionnelle). Ceci confirme donc l'hypothèse que le graphe paysager est une représentation efficace pour mettre en œuvre un découpage spatial, générant des zones cohérentes sur le plan de leur dynamique démographique. Les figures 8 et 9 présentent le graphe résultant de la segmentation, dans lequel les liens inter-compartiments ont été supprimés pour mieux visualiser le découpage.

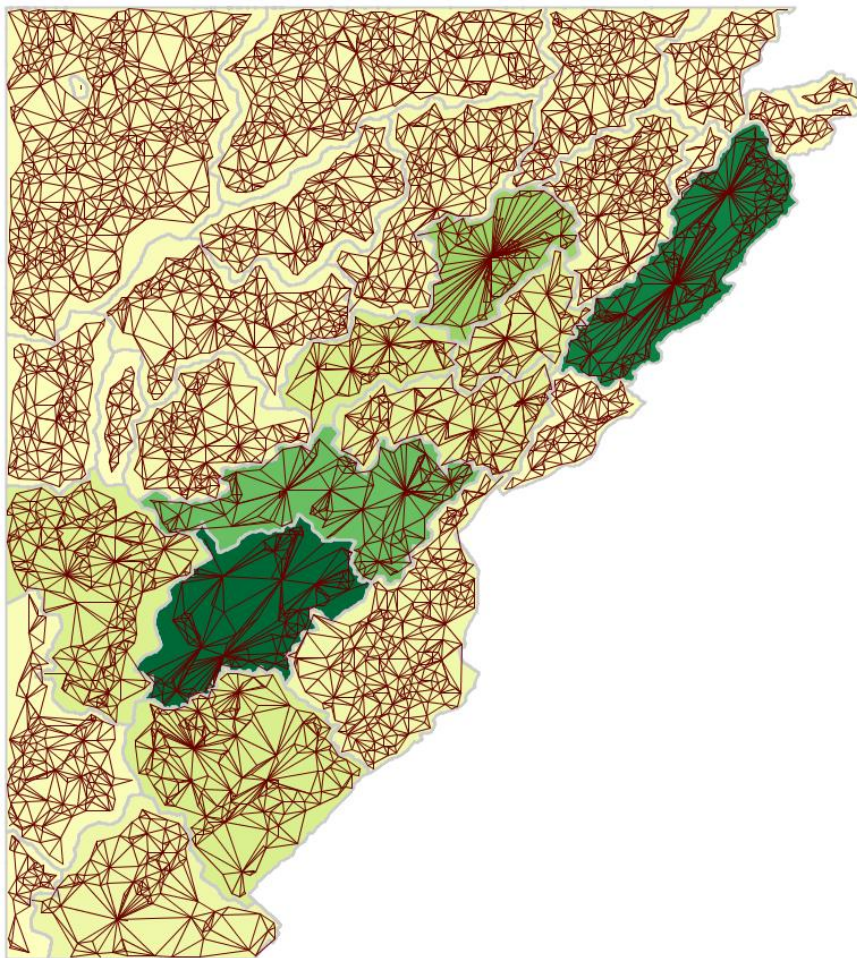


Figure 8. Segmentation « optimale » sur le terrain d'étude franc-comtois.



Figure 9. Segmentation sur un extrait du terrain d'étude franc-comtois.

Pour évaluer l'intérêt d'une segmentation de graphe par rapport à un simple seuillage, les valeurs du L de Wilks ont été comparées dans deux cas (tableau 2). Les valeurs résultantes sont totalement différentes, la différenciation statistique opérée par le résultat de la segmentation étant dans les deux cas nettement plus importante. Ceci confirme bien, dans le cas des campagnols terrestres, l'inadéquation du seuillage pour produire un découpage en unités « fonctionnelles ».

Nombre de composantes ou de compartiments	L de Wilks calculé à partir de la segmentation	L de Wilks calculé à partir du seuillage
21	0.007068	0.4429
29	0.003325	0.3771

Tableau 2. Comparaison de la discrimination démographique entre segmentation et seuillage.

Le découpage réalisé en utilisant la modularité comme critère à maximiser a conduit à définir 29 compartiments dans l'ensemble de la zone d'étude, mais seuls 23 de ces compartiments se situent dans la zone où un suivi des populations est nécessaire. La forme des courbes des trois critères de contrôle (figure 7) indique qu'il n'existe pas de découpage intermédiaire entre 29 et 500 compartiments particulièrement intéressant à retenir. Ceci est dû au fait que les compartiments correspondant aux grandes prairies en openfield ne sont pas sécables du point de vue du graphe, car ils sont composés d'un nombre restreint de taches dont la taille est très importante. A titre d'exemple, la figure 10 montre le résultat d'une segmentation à environ 230 compartiments. On constate que dans la zone centrale, le découpage est quasiment inchangé par rapport au résultat considéré comme optimal (figure 8) et que les compartiments supplémentaires qui ont été créés sont majoritairement situés en périphérie de la zone d'intérêt, là où le réseau de prairie apparaît le moins connexe.

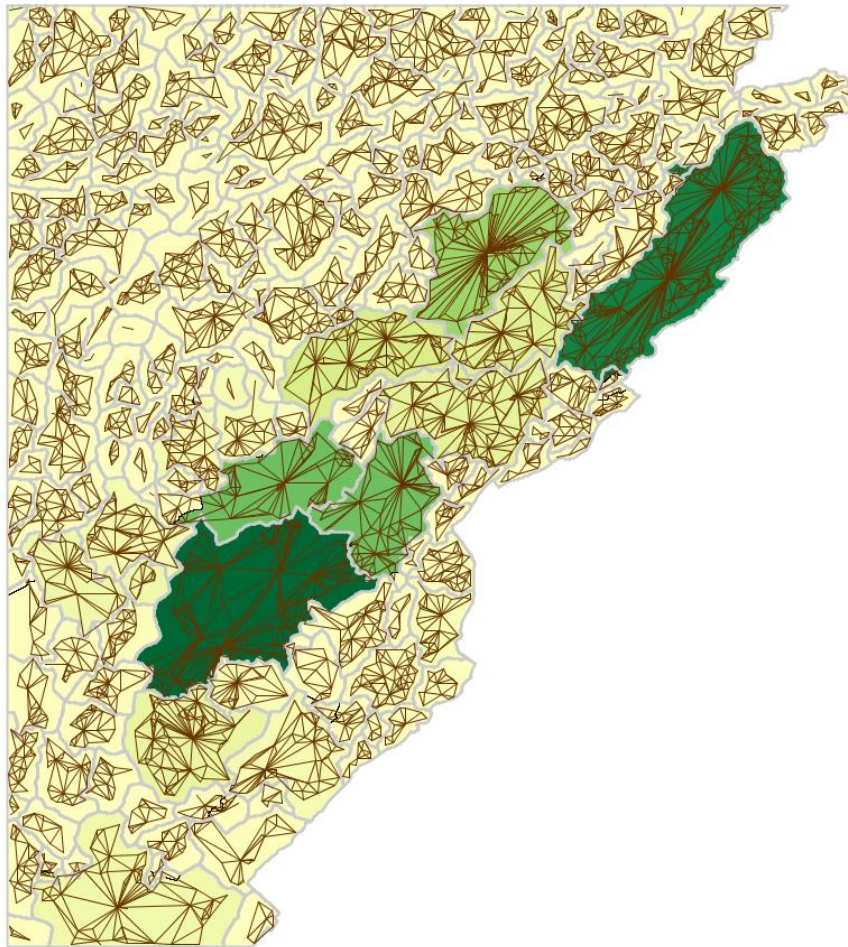


Figure 10. Segmentation en 230 compartiments.

4.4. Conclusion

En attribuant une valeur de flux potentiel aux liens du graphe, la segmentation fondée sur le critère de modularité aboutit à un découpage considéré comme optimal du point de vue de la dynamique démographique interne à chaque compartiment. Les unités spatiales produites peuvent servir de base pour mettre en place un protocole de suivi adapté à leur dynamique interne. Il reste donc à trouver comment réaliser cette adaptation en tenant compte des contraintes pratiques liées aux aspects humains (densité du réseau d'observateur) et aux aspects logistiques (mise en œuvre pratique en termes de déplacement sur le terrain). Dans cette perspective, le travail en cours consiste à caractériser la dynamique démographique interne de chaque compartiment pour définir ensuite un réseau d'observation approprié.

Références

- Bichot C.E., Siarry P. (dir.), 2010. *Partitionnement de graphe, optimisations et applications*. Paris, Hermès-Lavoisier.
- Bodin O., Norberg J., 2007. A network approach for analyzing spatially structured populations in fragmented landscape. *Landscape Ecology* 22: 31–44.
- Brandes U., Delling D., Gaertler M., Görke R., Hoefer M., Nikoloski Z., Wagner D., 2008. On Modularity Clustering. *IEEE Transactions on Knowledge & Data Engineering* 20(2): 172-188.
- Couval G., Truchetet D., Foltête J.C., 2009. Réseaux de surveillance et d'alerte. in Delattre P. (coord.), *La lutte raisonnée contre le Campagnol terrestre*, Quae Editions, Paris.

- 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.
- Gao P., Kupfer J.A., Guo D., Lei T.L., 2013. Identifying functionally connected habitat compartments with a novel regionalization technique. *Landscape Ecology* 28: 1949–1959.
- Girvan M., Newman M.E.J., 2002. Community structure in social and biological networks. *Proceedings of National Academy of Sciences of the USA* 99(12): 7821–7826.
- Li W., 2013. Modularity Segmentation. *Lecture Notes in Computer Science* 8227: 100–107.
- Newman M.E.J., Girvan M., 2004. Finding and evaluating community structure in networks. *Physical Review E* 69(2): 1–15.
- Webster R., 1972. Wilk's criterion: a measure for comparing the value of general purpose soil classifications. *Journal of Soil Science* 22: 254–260.

5. Vulnérabilité du réseau à l'échelle régionale et actions de terrain

5.1. Contexte et objectif

Les graphes paysagers ont été développés en écologie du paysage en raison de leur souplesse d'utilisation. Ils constituent un support d'analyse relativement facile à mobiliser, notamment dans les démarches de « priorisation » visant à identifier les taches d'habitats les plus cruciales pour le maintien de la connectivité d'un habitat donné (Saura et Pascual-Hortal, 2007 ; Foltête et al., 2014). Il a été montré que le graphe des prairies offre une représentation valable du réseau écologique des campagnols terrestres au niveau régional (Foltête et Giraudoux, 2012), c'est pourquoi cet outil peut être utilisé dans une logique d'appui à la lutte contre les pullulations.

L'objectif est d'utiliser le graphe des prairies pour identifier des zones de vulnérabilité du réseau. Sur ces zones, il s'agit ensuite d'étudier la faisabilité d'actions de terrain visant à ralentir la diffusion des pullulations. Ces actions peuvent être des aménagements paysagers (plantations de haies), d'autres dispositifs favorisant des prédateurs des campagnols terrestres (plantage de perchoirs à rapaces) ou encore des changements d'usage agricole (labours dans les prairies) dans certaines parcelles.

5.2. Méthodes

Principe général et choix fondamentaux

Le principe général adopté pour identifier les zones de vulnérabilité repose sur la « méthode de la suppression » (*removal method*), désormais bien éprouvée depuis une dizaine d'année dans différents études en écologie. Son usage remonte aux articles fondateurs des recherches sur les graphes appliqués aux réseaux d'habitat, notamment aux travaux de Urban et Keitt (2001). Cette méthode a été très fréquemment appliquée par Santiago Saura (Saura et Pascual-Hortal, 2007 ; Saura et Tornrè, 2009) et par les utilisateurs du logiciel Conefor Sensinode CS22 dérivé de ces travaux. Partant d'une certaine métrique de connectivité calculée pour l'ensemble du graphe, elle consiste à simuler successivement la suppression de tous les éléments du graphe (taches ou liens) et à calculer pour chacun le taux de variation entre la valeur initiale de la métrique et la valeur tenant compte de la suppression. Cette procédure est implémentée dans le logiciel Graphab sous la forme des « delta-métriques » (Foltête et al., 2012).

Spécificité de l'approche

Deux points sont originaux dans notre approche par rapport à la littérature dans ce domaine :

(1) Dans la perspective de modification réelle (sur le terrain) des éléments localisés par modélisation, une approche cumulative a été privilégiée, par rapport à l'approche énumérative suivie dans tous les travaux existants. Cette approche cumulative, décrite dans Foltête et al. (2014) consiste à valider la suppression du premier élément identifié (i.e. en simulant sa suppression) au moment de la recherche du second élément, et ainsi de suite pour les éléments suivants. En d'autres termes, on recherche les différentes zones d'intervention en cumulant théoriquement les effets potentiels des actions mises en œuvre sur le terrain.

(2) l'objectif est ici de déconnecter le réseau (ou tout au moins d'en réduire l'efficacité), alors que la méthode d'intervention potentielle sur un graphe est la plupart du temps utilisée dans un contexte de conservation biologique, où le réseau doit être protégé ou amélioré. Un exemple de cette approche est donné dans Clauzel et al. (2015).

Métrique de connectivité de référence

La métrique de connectivité servant de référence aux calculs est ici la probabilité de connectivité ou *Probability of Connectivity (PC)* développée par Saura and Pascual-Hortal (2007). Le *PC index* est une métrique calculée sur l'ensemble d'un graphe selon l'expression :

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

où a_i et a_j sont les capacités des taches i et j , p_{ij}^* est la probabilité maximale de tous les chemins potentiels entre les taches i et j , et A est la surface totale de la zone d'étude. p_{ij} est déterminée par une fonction exponentielle :

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

où d_{ij} est la distance effective entre les taches et α est une constante exprimant l'intensité de la réduction de la probabilité de mouvement (p) en fonction de la distance (d). Cet indice est le plus utilisé pour rendre compte de l'efficacité fonctionnelle d'un réseau écologique, notamment parce qu'il repose sur un concept d'interaction spatiale (produit des masses de chaque tache), en intégrant à la fois la quantité d'habitat (a_i) et le degré de connectivité (p_{ij}).

Compte tenu de ces éléments et à partir d'un graphe dont le paramétrage a été défini (section 3.2.1.), la mise en œuvre de la méthode de la suppression se présente comme une application relativement simple. Cependant, la perspective d'utiliser les résultats de la modélisation pour une aide à la localisation d'actions réelles a occasionné des problèmes spécifiques qu'il faut à présent détailler.

Quels éléments faut-il analyser sur le graphe ?

La suppression simulée des éléments du graphe peut s'appliquer soit aux nœuds (taches de prairies), soit aux liens (matrice paysagère entre les taches de prairies). Selon l'objectif fixé dans le projet, il est a priori logique de se focaliser sur les taches d'habitat de l'espèce cible, donc de chercher quelles sont les taches de prairie les plus intéressantes à « supprimer » du réseau. Ces taches ont des tailles très variables selon les zones des plateaux jurassiens, la plus grande tache atteignant 36 km². Les taches de grande taille sont celles qui se situent au cœur des zones les plus affectées par les pullulations, donc elles devraient être identifiées comme éléments à supprimer d'après le protocole décrit plus haut. Cependant, il n'est pas possible de faire correspondre des actions de terrain réalistes à la suppression d'une tache entière, surtout si sa superficie est importante. De plus, il s'agit de limiter la diffusion des

campagnols terrestres par la mise en œuvre d'actions assez limitées en ampleur et en moyen financier, donc il n'est pas possible d'envisager des actions couvrant beaucoup d'espace. L'approche focalisée sur les taches n'est donc pas adaptée au problème posé et la méthode doit donc s'appliquer aux liens.

A première vue, les liens traversent la matrice entre les taches de prairies, ils concernent donc les autres catégories d'occupation du sol (cultures, forêts, bâti urbain, etc.). Dans ce cas, il peut être difficile d'imaginer des mesures de terrain appliquées aux campagnols terrestres. Toutefois, les liens contiennent des éléments de prairies selon le mode de construction du graphe. Rappelons que les taches ont été définies comme des zones continues de prairies après une érosion de 50m à partir des bordures. D'autre part, comme dans toutes les analyses de graphe paysager, les taches ont été intégrées à partir d'une surface minimale (ici 5 ha). Pour ces deux raisons, des surfaces de prairies en dehors des taches sont présentes dans la matrice où ont été calculés les chemins de moindre coût définissant les liens. Comme les surfaces de prairie ont été affectées d'un coût minimal (section 3.2.2., tableau X, scénario S2), elles sont théoriquement utilisées de façon privilégiée dans les chemins de moindre coût joignant les taches. En conséquence, l'analyse menée sur les liens peut tout à fait conduire à identifier des zones de prairie propices aux actions de lutte contre les campagnols terrestres.

Quelle métrique spatiale utiliser pour définir les liens ?

La caractéristique fondamentale des liens du graphe est la distance qu'ils représentent entre deux taches. Le calcul de cette distance repose sur le choix d'une métrique spatiale, la littérature des graphes paysagers (ainsi que les outils logiciels) offrant en général deux alternatives : distance euclidienne ou distance de moindre coût. Dans tous les cas où l'hétérogénéité de la matrice joue sur les déplacements de l'espèce étudiée, le choix de la distance de moindre coût s'impose. Ce choix a donc été retenu ici, justifié par les études préalables (Foltête et Giraudoux, 2012 ; section 3.2.2.), qui ont confirmé les hypothèses sur le rôle du paysage dans la diffusion des campagnols terrestres.

Le calcul d'une distance de moindre coût s'effectue par un algorithme qui suit progressivement le « chemin de moindre coût » d'une tache jusqu'à une autre. Implémentée dans les Systèmes d'Information Géographique, cette méthode est facile à mettre en œuvre et permet de représenter le lien inter-taches par un objet spatial linéaire. Cependant, cet objet reste symbolique, au sens où il représente le cheminement le plus probable si on ne raisonne qu'en termes d'occupation du sol, mais il ne correspond pas nécessairement aux lieux de passages effectifs pour les individus de l'espèce étudiée. Cette limite connue en écologie (Sawyer et al., 2011) n'est pas le problème le plus important, qui réside plutôt dans le caractère unique du chemin de moindre coût. En effet, la matrice paysagère offre un éventail plus ou moins grand de cheminements possibles, qui ne seront pas différenciables par le calcul classique des chemins « uniques » de moindre coût.

Cette limite s'explique facilement par la figure 11, où deux couples de taches de prairie sont présentées. On suppose ici que les surfaces forestières constituent les principales barrières, et que seule cette catégorie diffère entre les deux cas. Le tracé en pointillé représente le chemin de moindre coût. Malgré la différence de surface forestière entre les deux cas, la distance de moindre coût est rigoureusement la même entre AB et A'B'. Or, si ce tracé symbolise le franchissement potentiel par des rongeurs prairiaux, il est clair que les conditions de franchissement ne sont pas les mêmes et que le cas A'B' offre davantage de résistance du fait de l'effet d'entonnoir entre les massifs forestiers. Récemment, l'unicité des chemins de moindre coût a été mentionnée par Moilanen (2011) comme un des problèmes inhérents aux graphes paysagers.

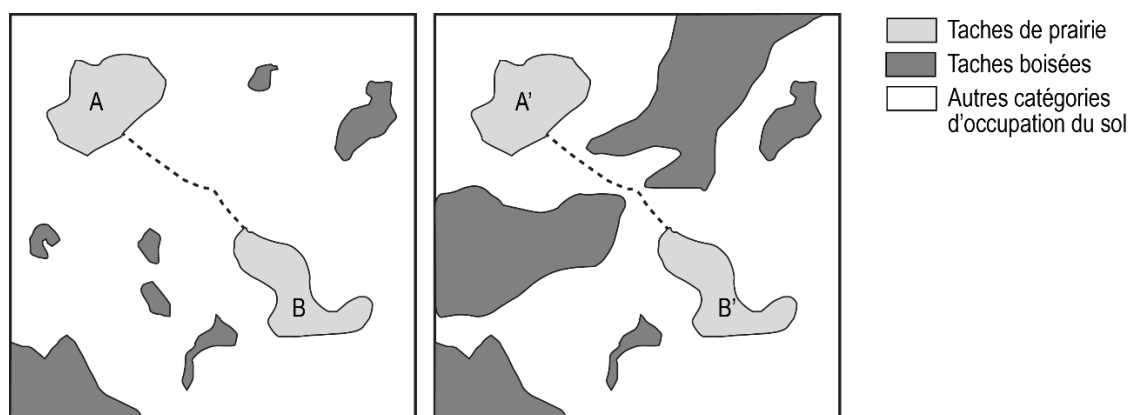


Figure 11. Plusieurs configurations spatiales pour une même distance de moindre coût.

Les présentations génériques de graphe paysager montrent souvent de multiples liens qui relient les taches, par exemple dans Galpern et al. (2011). Mais ce principe ne peut pas être mis en pratique facilement si on souhaite que le graphe garde ses propriétés mathématiques. Pour prendre en compte la configuration spatiale de la matrice, Pinto et Keitt (2009) ont proposé une méthode fondée sur des variations aléatoires de coûts pour définir des « plus courts chemins multiples ». Toutefois leur approche vise à cartographier des corridors de déplacements, mais ne peut pas constituer une métrique spatiale (pas de mesure associée) conduisant à caractériser les liens du graphe. Il faut se tourner vers la théorie des circuits électriques pour trouver une solution à ce problème. Le recours à cette théorie pour quantifier la connectivité en écologie a été initié par McRae et al. (2008). Partant d'une analogie entre la diffusion du courant électrique dans un réseau et les déplacements animaux dans le paysage, ces auteurs ont proposé de calculer la « distance de résistance », qui résulte d'une évaluation de tous les chemins possibles entre deux entités. L'usage de cette méthode a été facilité par la diffusion du logiciel Circuitscape. Les données à fournir en entrée sont exactement les mêmes que pour le calcul des distances de moindre coût, à savoir une carte d'occupation du sol et des valeurs de coûts attribuées à chaque catégorie.

Ces éléments méthodologiques sont à rapprocher de l'objectif du projet. Pour que les actions de terrain contre la diffusion des campagnols terrestres aient une certaine efficacité, il est important qu'elles soient déployées dans des lieux où les possibilités de passage entre deux taches sont en nombre limité. Inversement, si on met en place une action dans un contexte paysager où de nombreuses alternatives de passage existent, il y a plus de chance que le dispositif soit « contourné ». L'usage de la distance de résistance comme métrique spatiale de référence est donc requis.

Toutefois, bien que le logiciel Circuitscape permette de calculer des distances de résistance entre tous les couples d'une série de points, il n'est pas adapté au calcul des liens d'un graphe de grande taille. Cet outil sert fréquemment à calculer des distances à mettre en parallèle avec des distances génétiques, sur des jeux de données souvent limités à 50 points. Les 4132 taches prairiales des plateaux jurassiens nous conduisent donc à envisager deux stratégies : (1) identification des liens-clés en deux étapes combinant distances de moindre coût et de résistance ; (2) identification directe en distance de résistance. Ces deux stratégies ont été mises en œuvre et sont détaillées par la suite.

Références

Clauzel C., Bannwarth C., Foltête J.C., 2015. A planning tool for integrating broad-scale connectivity in habitat restoration: an application to pond creation in eastern France. *Journal of Nature Conservation* 23: 98-107.

Foltête J.C., Giraudoux P., 2012. A graph-based approach to investigating the influence of the landscape on population spread processes. *Ecological Indicators* 18: 684–692.

Foltête J.C., Clauzel C., Vuidel G., 2012. A software tool dedicated to the modelling of landscape networks. *Environmental Modelling and Software* 38: 316–327.

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.

McRae B.H., Dickson B.G., Keitt T.H., Shah V.B., 2008. Using Circuit Theory to Model Connectivity in Ecology, Evolution, and Conservation. *Ecology* 89: 2712–2724.

Moilanen A., 2011. On the limitations of graph-theoretic connectivity in spatial ecology and conservation. *Journal of Applied Ecology* 48: 1543–1547.

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: 91–103.

Sawyer S.C., Epps C.W., Brashares J.S., 2011. Placing linkages among fragmented habitats: do least-cost models reflect how animals use landscapes? *Journal of Applied Ecology* 48: 668–678.

5.3. Stratégie en deux étapes pour l'identification des zones-clés

Cette première stratégie a d'abord été appliquée car elle ne nécessitait pas de développement informatique et pouvait être réalisée en combinant les logiciels Graphab 1.0 et Circuitscape¹. Le protocole s'effectue en deux étapes successives :

- (1) Utilisation du graphe en distance coût (présenté à la section 3.2.1.) pour identifier les 20 liens les plus importants du réseau par application de la méthode de la suppression avec la métrique dPC ;
- (2) Pour les 20 liens précédents, calcul de la distance de résistance et cartographie du corridor de déplacement.

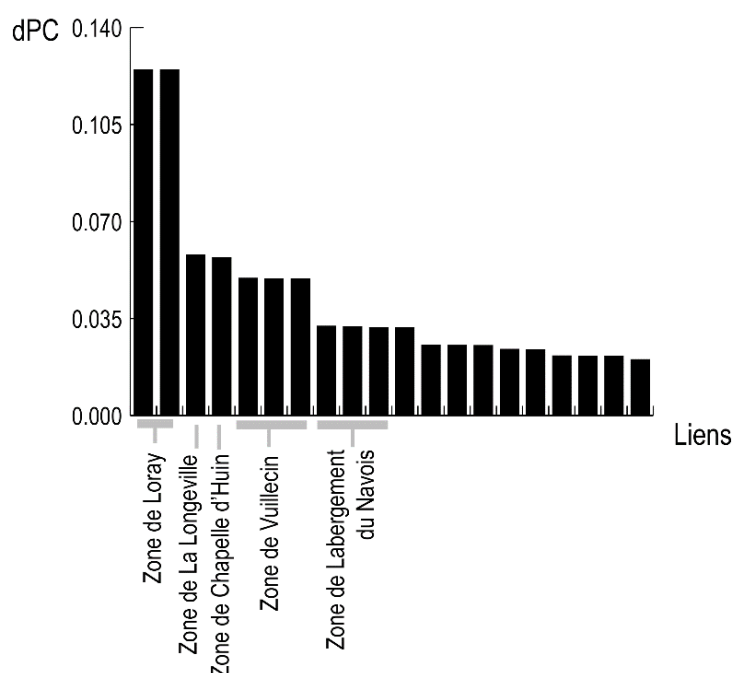


Figure 12. Valeurs de dPC pour les 20 liens les plus importants du graphe, identification de 5 zones

Le calcul de l'indice dPC a conduit à sélectionner les 10 liens aux valeurs maximales parmi les 12 000 liens du graphe (figure 12). Il est à noter que l'usage du dPC ne correspond pas à l'approche cumulative

¹ Ce travail a fait l'objet du mémoire de master 2 de Cécile Chopard-dit-Jean (Master Géographie, spécialité Information Spatiale et Aménagement, Université de Franche-Comté).

mentionnée au 5.2., mais à une approche énumérative. La localisation des liens sur la carte du graphe a montré que certains d'entre eux s'associent localement pour former une zone unique. Après regroupement en fonction de ces associations, les 10 premiers liens ont constitué 5 zones-clés potentielles (figure 13).

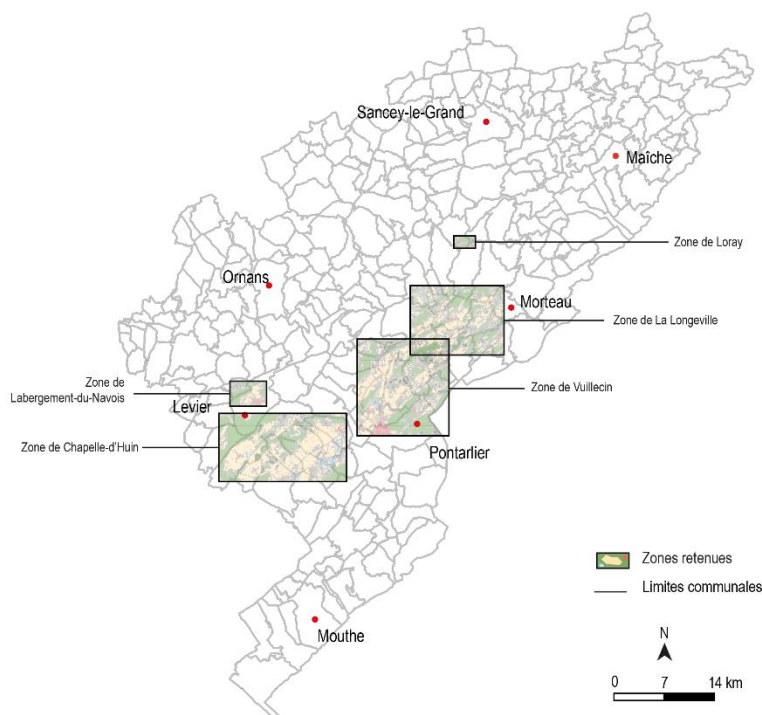


Figure 13. Extraction de l'occupation du sol des 5 premières zones retenues

Pour appliquer la deuxième étape, chacune des 5 zones a fait l'objet d'une extraction spécifique à partir de la carte d'occupation du sol, encadrant largement le (ou les) lien(s) faisant l'objet de l'analyse (figure 14). Chaque carte d'occupation du sol a été intégrée dans Circuitscape pour calculer la distance de résistance et cartographier le corridor de déplacement. D'après le tableau 3, la distance de résistance fluctue fortement selon les zones ; elle est notamment très forte pour la zone 1 de Loray, très faible pour la zone 2 de La Longeville. En principe, une forte valeur telle que celle qui est rencontrée pour la zone 1 représente un passage difficile, une connexion étroite. Par la suite, les deux premières zones vont faire l'objet d'un examen plus détaillé.

La figure 14 montre le détail de plusieurs données décrivant la zone 1. La distribution des résistances montre que la connexion entre les deux taches s'effectue par un couloir étroit passant par une troisième tache. La carte d'occupation du sol et la photographie aérienne indiquent que ce couloir correspond à une coupure au sein d'un massif boisé. A priori, par sa configuration, cette zone correspond bien à un lieu d'intervention possible, puisque le caractère étroit du passage est adapté à une tentative de « barrière » contre les campagnols terrestres.

Zones	Hierarchie des liens	Valeur relative de connectivité (dPC issu de Graphab)	Distance de résistance (Circuitscape)
Zone 1 (Loray)	1	0,1248	14,6693
	2	0,1248	
Zone 2 (La Longeville)	3	0,0581	0,0114
Zone 3 (Chapelle-d'Huin)	4	0,0571	0,0249
Zone 4 (Vuillecin)	5	0,0496	2,1394
	6	0,0495	
	7	0,0495	
Zone 5 (Labergement-du-Navois)	8	0,0323	7,0452
	9	0,0322	
	10	0,0319	

Tableau 3. Valeur relative de connectivité (dPC) et distance de résistance des 5 zones

La même approche cartographique est appliquée à la zone 2 (figure 15). Ici les taches de prairies reliées sont de grande taille, séparées par une étroite bande où les résistances présentent des valeurs plus fortes. Au nord des deux taches, un autre passage est souligné par des résistances de valeur moyenne. L'extrait d'occupation du sol de cette zone montre que la bande séparant les taches est due à un corridor routier traversant le plateau dominé par les prairies. La longueur du contact entre les taches explique la faible valeur obtenue pour la distance de résistance (tableau 3). Compte tenu de cette configuration, cette zone est peu adaptée à des mesures de terrain pour limiter la diffusion des campagnols terrestres. Les axes routiers ne représentant pas une barrière très forte pour cette espèce, on peut aussi penser qu'un tel résultat est un artéfact dû à la coupure artificielle d'une seule tache de prairie.

Bilan de la mise en œuvre de la stratégie en deux étapes

L'examen des deux premières zones donne assez d'informations pour établir un premier bilan, c'est pourquoi les cartes et les autres résultats montrant le détail des 3 zones suivantes ne sont pas présentés. Comme cela a été supposé, il n'y a pas de correspondance entre les fortes valeurs de dPC des liens (i.e. d'importance stratégique des connexions entre taches) et les valeurs de distance de résistance. Celles-ci peuvent être indifféremment fortes (effets de corridors étroits) ou faibles (grande surface de connexion).

Pour la mise en œuvre du projet sur le terrain, les zones à identifier doivent être en forme de corridors. Les liens de forte valeur de dPC et qui en même temps correspondent à des connexions multiples perturbent la recherche de ces zones, puisqu'ils s'intègrent dans le processus itératif alors qu'au final ils doivent être laissés de côté puisqu'ils sont impropres à des actions de terrain ponctuelles.

Il résulte de ces premiers constats que la stratégie en deux étapes, qui présentait a priori l'avantage d'une certaine facilité de mise en œuvre, s'avère peu opérationnelle en pratique. Elle oblige à tenir compte conjointement de deux métriques spatiales différentes (distance de moindre coût et distance de résistance) et relève finalement d'une sorte de « bricolage ». En conséquence, une approche fondée sur la seule métrique des distances de résistance est préférable : ceci fait l'objet de la section suivante.

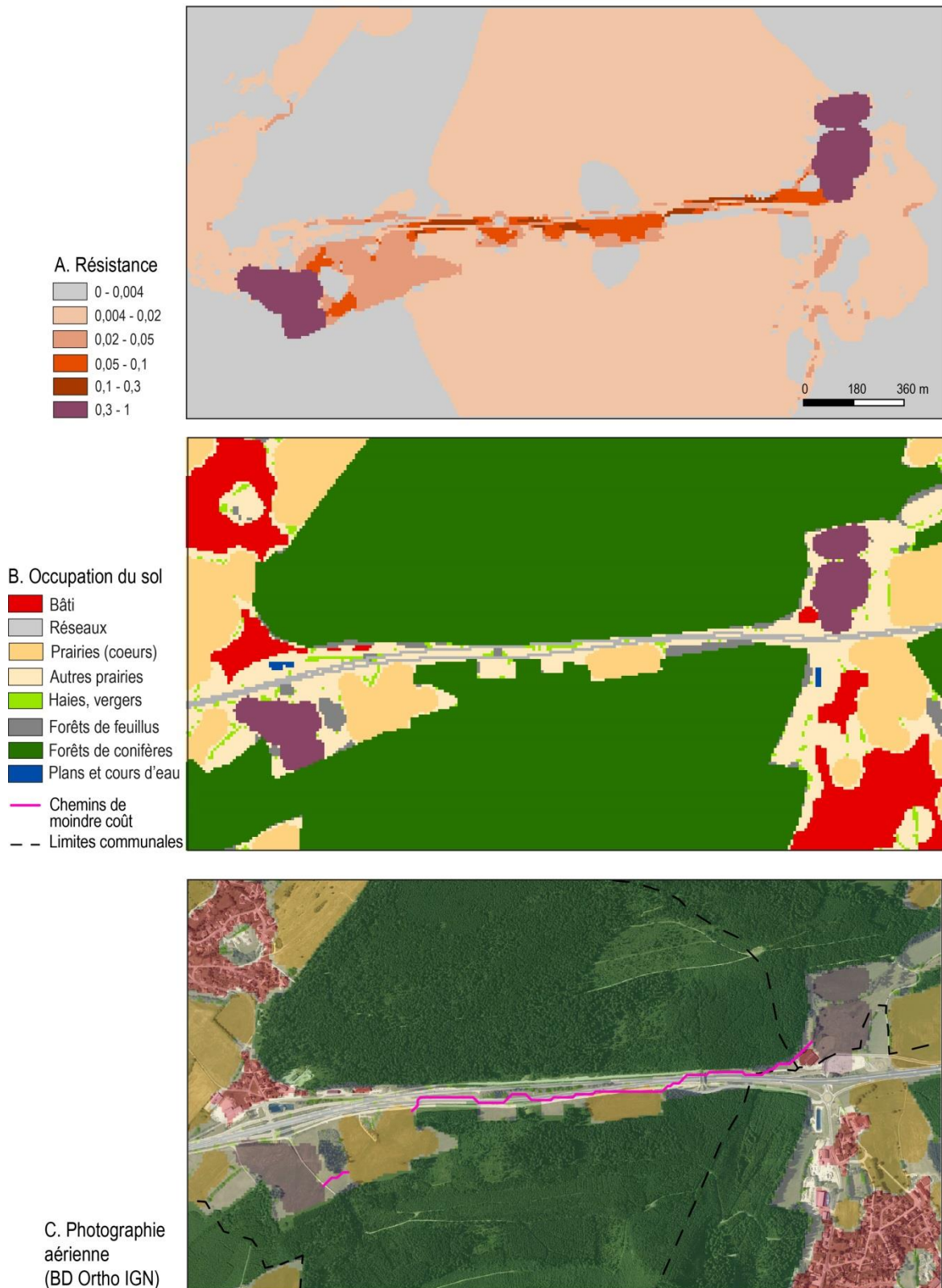


Figure 14. Zone 1 (site de Loray). La carte A est le résultat de l'application de Circuitscape entre les deux taches. B et C sont respectivement la carte d'occupation du sol et la photographie aérienne correspondants à la zone (avec surimpression de certains éléments d'occupation du sol).

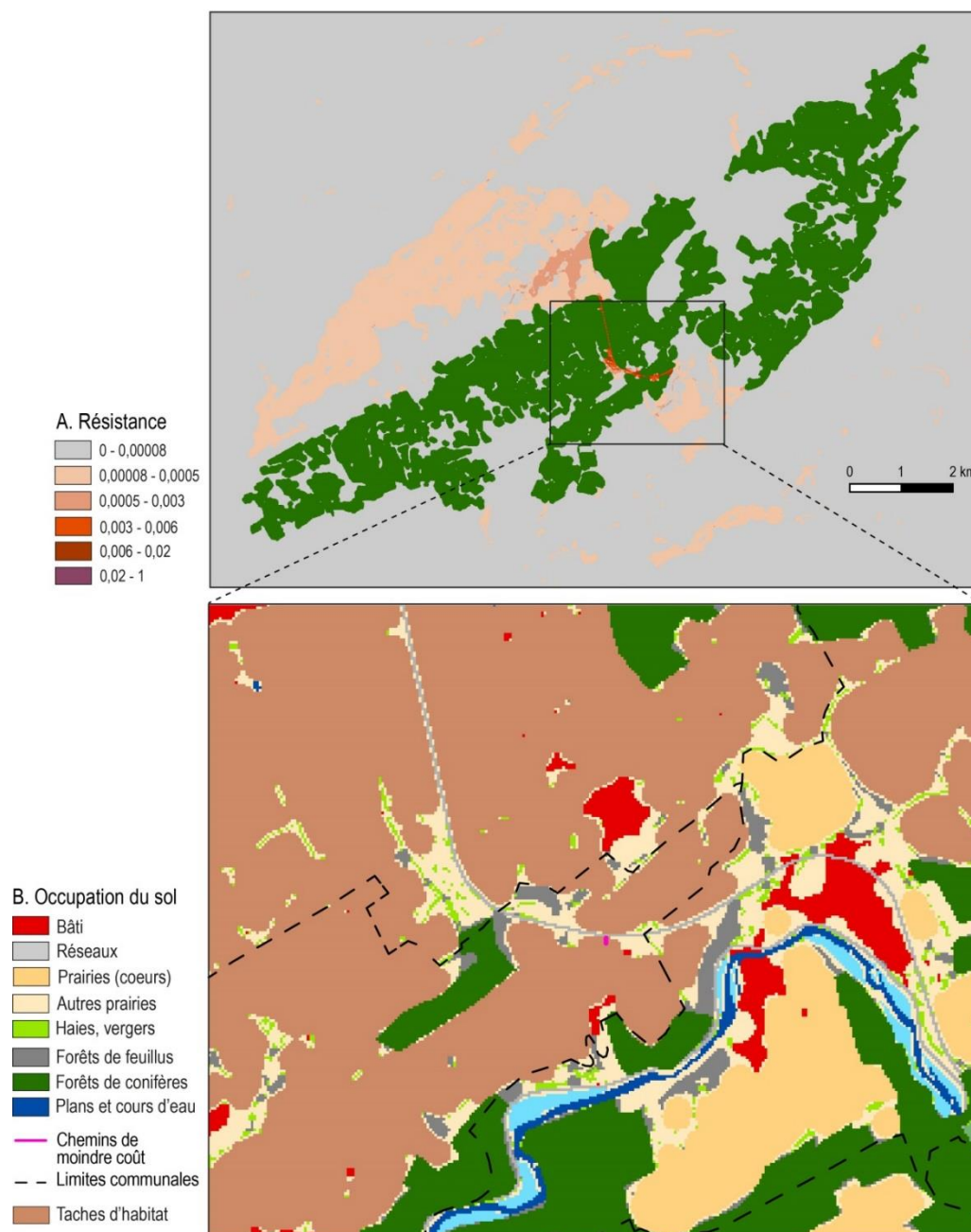


Figure 15. Zone 2 (site de La Longeville). La carte A est le résultat de l'application de Circuitscape entre les deux taches. B est la carte d'occupation du sol correspondant à un extrait de la zone.

5.4. Stratégie fondée sur la théorie des circuits pour l'identification des zones-clés

Plusieurs problèmes ont été rencontrés dans l'application de la stratégie initialement prévue pour sélectionner les zones-clés. Un protocole spécifique a donc été mis en place pour éviter ces problèmes et fonder le choix des zones sur des critères aussi simples que possible.

5.4.1. Mise en place du cadre méthodologique

Implémentation de la théorie des circuits dans le logiciel Graphab

Nous avons eu recours à la théorie des circuits pour effectuer la recherche des liens-clés sur un critère unique tout en intégrant la multiplicité des cheminements possibles entre les taches de prairie. Cette

option implique un développement informatique spécifique, puisque le logiciel Circuitscape n'est pas adapté au traitement de la masse de données contenue dans un graphe de grande taille.

Quelques éléments méthodologiques sont à détailler pour comprendre la démarche. Les constructions appelées « graphe paysager » ou « réseau d'habitat » contiennent en fait deux graphes emboîtés (Urban et al., 2009) :

(1) le graphe inférieur (ou de « niveau pixel »), dans lequel les pixels de la carte d'occupation du sol initiale sont les nœuds et les interfaces entre pixels sont les liens. Ce graphe inférieur est mobilisé dans le calcul de chaque lien entre deux taches.

(2) le graphe supérieur (ou de « niveau tache »), qui est celui qu'on décrit habituellement, consistant à relier les taches entre elles par les liens constitués à partir du graphe inférieur.

La théorie des circuits peut être utilisée sur les deux niveaux. Elle l'a été récemment sur le graphe supérieur pour disposer de métriques de connectivité tenant compte de la multiplicité des parcours de graphe (Girardet et al., 2015), dans un contexte routier où le niveau de connectivité s'est avéré explicatif des risques de collisions entre la faune et les véhicules. Le nombre limité de taches (dépassant 20 000) rend cette intégration possible sans problème particulier.

Dans le travail présent, il s'agit d'utiliser la théorie des circuits pour caractériser les liens, au niveau du graphe inférieur. Ici, pour traiter un seul lien, le nombre de pixels est très important (plusieurs millions) et le calcul devient extrêmement lourd. Comme dans le logiciel Circuitscape, un compromis doit être trouvé entre un certain degré de précision dans la résolution de l'équation au cœur de ce calcul, et la faisabilité du calcul pour un nombre répété de cas (ici autant de fois qu'on a de liens sur le graphe supérieur).

Dans le logiciel Graphab, ce développement s'est traduit par la présence d'une nouvelle option que l'utilisateur peut choisir lors de la mise en place des liens. La mise en œuvre requiert l'usage de serveurs de calculs.

Définition de méta-taches

Un problème rencontré lors des analyses précédentes (section 5.3.) est la juxtaposition de taches qui ont une importante surface de connexion. Une procédure de définition des méta-taches a été utilisée pour éviter ce problème. Cette procédure est dédiée en principe à la caractérisation des ensembles de taches de petite taille nécessitant la supplémentation pour l'espèce concernée. Elle consiste à établir un premier regroupement de toutes les taches séparées par des distances faibles (distances quotidiennes dans le cas d'une supplémentation). Les méta-taches deviennent ensuite les éléments analysés lors des étapes ultérieures. De cette façon, les taches de prairies sont groupées quand elles correspondent à des ensembles très imbriqués au sein desquels il serait difficile de trouver des corridors pour les interventions de terrain.

5.4.2. Identification du premier lien-clé sur le cas d'étude franc-comtois

A partir de la carte d'occupation du sol (section 3.1.) et du scénario de coût basé sur des massifs forestiers peu perméables (scénario 2, section 3.2.2.), les liens entre les 4132 taches de prairies ont été calculés en distance de résistance. Un premier graphe a été construit par seuillage de cette distance à une valeur faible, choisie arbitrairement après quelques tests. Précisons ici que la distance de résistance est exprimée sans unité, et sans possibilité de comparaison statistique avec une distance métrique, comme c'est le cas avec les distance-coûts.

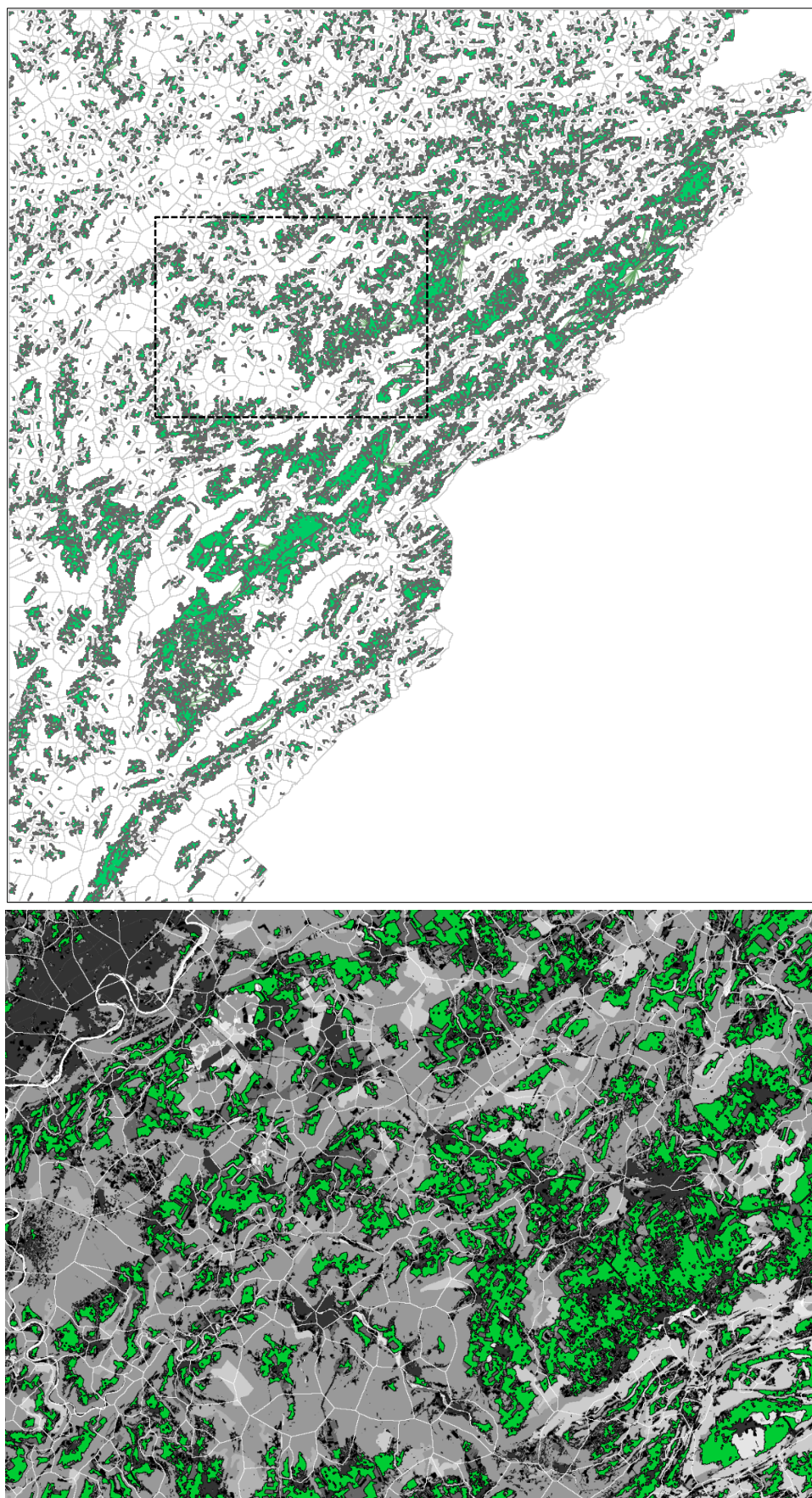


Figure 16. Méta-taches de prairies fondées sur des distances de résistance, délimitées par les tracés gris clair.

On ne peut donc pas couper le graphe par une valeur connue donnée en mètres dans la littérature, il faut donc procéder par tâtonnement. Le premier graphe a conduit à la définition de méta-taches visibles sur la figure 16.

Les méta-taches constituent la base pour un second graphe utilisant les mêmes paramètres mais restant non seuillé. Sur ce graphe, l'algorithme de recherche des liens-clés a été appliqué en prenant l'indice PC comme référence de connectivité et en simulant la déconnexion cumulée de 20 liens. La décroissance des valeurs de PC est présentée sur la figure 17. La courbe est marquée par plusieurs sauts soulignant les ensembles de liens qu'il faudrait théoriquement « déconnecter » pour faire diminuer la connectivité de l'ensemble du réseau de façon significative.

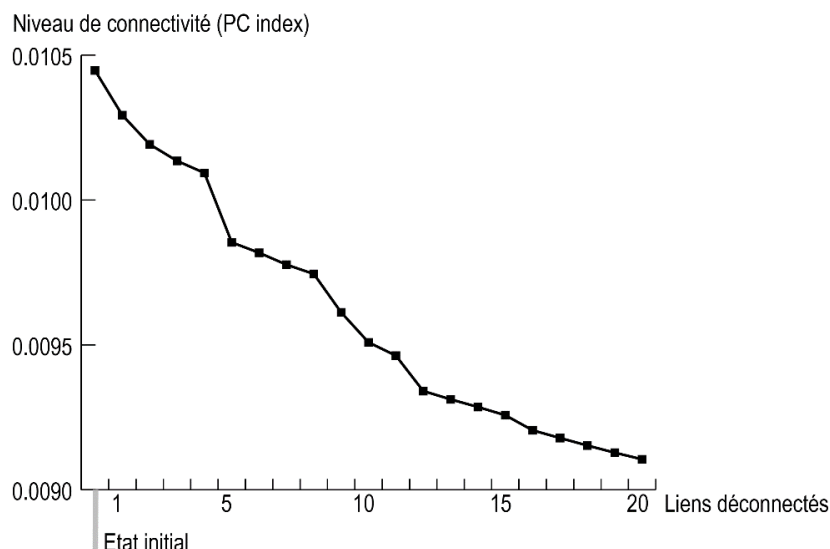


Figure 17. Décroissance de l'indice PC en fonction de la déconnexion progressive des liens.

Le saut le plus remarquable est occasionné par la suppression du cinquième lien. Il serait à prendre en compte dans un contexte où d'importants moyens seraient déployés pour lutter contre les campagnols terrestres, mais le projet Campagraphe prévoit d'expérimenter ces actions de lutte sur un seul site (3 sites selon le projet initial, mais 1 après révision de la programmation). La courbe montre toutefois une décroissance notable de la connectivité avec la suppression du premier lien. Celui-ci se situe à l'interface entre deux larges ensembles de prairies intégrés dans les seconds plateaux jurassiens : le plateau de la Vrigne et le val de Gilley (figure 18). Cette zone fait partie des lieux de très large diffusion des pullulations de campagnols terrestres, offrant des prairies où dominent les openfields, au sud-est des zones considérées comme les épicentres du phénomène. Il s'agit à présent d'examiner plus précisément cette zone.

5.4.3. Configuration paysagère et actions de terrain

L'observation du lien entre les deux méta-taches est facilitée par la cartographie des valeurs de courant, telle qu'elle a déjà été montrée précédemment. Ici cette cartographie est directement issue du logiciel Graphab (figure 19). Les méta-taches de prairies (en blanc) sont de grande taille et ont des formes irrégulières, étant reliées par plusieurs passages potentiels. La distribution spatiale du courant montre une structure « en chevelu » dans toute la matrice environnant les taches observées. L'intensité maximale du courant, qui représente théoriquement les flux de campagnols terrestres les plus importants, se concentre sur trois zones de contact de petite taille (zones 1A, 1B et 1C).

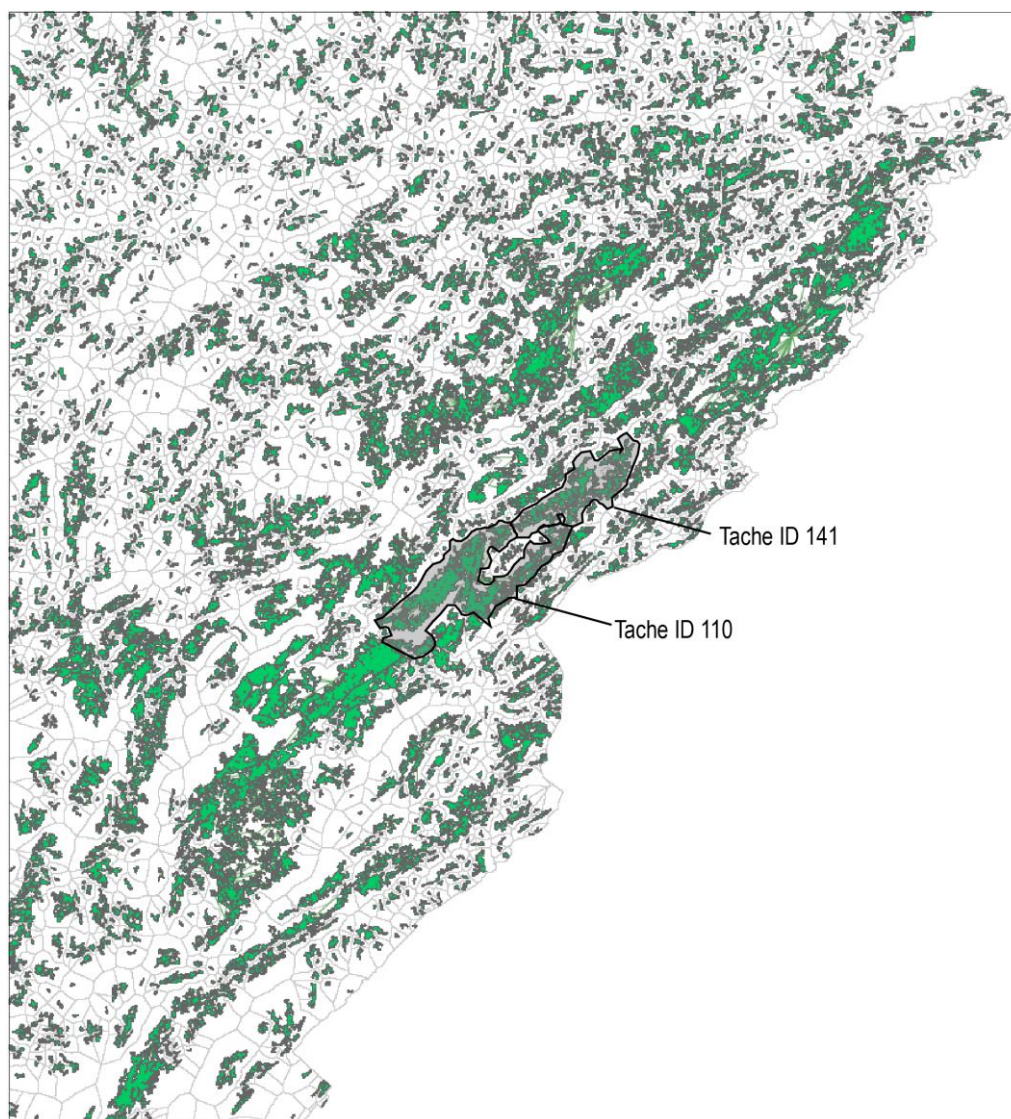


Figure 18. Localisation des deux méta-taches reliées par le premier lien-clé.

L'examen approfondi de ces zones a été réalisé avec les partenaires impliqués dans les actions de terrain, notamment la FREDON Franche-Comté et les opérateurs devant établir l'état initial de la faune tributaire des milieux ouverts.

La zone 1A est montrée en détail dans la figure 20. La photographie aérienne montre qu'il n'y a pas de coupure stricte dans les deux méta-taches à cet endroit, mais que la jonction, située au lieu-dit « les Champs Guyons », se fait par l'intermédiaire d'une zone de structure bocagère et vallonnée. Il s'agit de terrains aux sols minces, a priori peu favorables aux campagnols terrestres. La question est donc de renforcer la résistance que ce petit verrou paysager peut occasionner vis-à-vis de la diffusion des campagnols, en cherchant à mettre en place des mesures sur les parcelles situées de chaque côté de cette zone (celle-ci est représentée en rouge sur la figure 20 en haut). A cet endroit, les négociations entre la FREDON et les agriculteurs utilisant les parcelles n'ont pas permis de programmer l'implantation de haies. Sur la partie ouest du verrou, un ensemble de perchoirs à rapace va être mis en place pour favoriser la prédation. Sur la partie est du verrou, des parcelles de prairies vont être reconverties en céréales.

Les zones 1B et 1C sont visibles sur la figure 21. Les verrous paysagers y sont très nets, occupés de petits boisements et de formations arbustives. Suivant la même démarche que pour la zone 1A, la FREDON a rencontré les agriculteurs propriétaires ou utilisateurs des parcelles localisées autour des zones de verrou. Ici encore, il s'agit de sols relativement pauvres, dont l'épaisseur ne s'avère pas favorable aux galeries creusées par les campagnols terrestres. Les agriculteurs contactés n'ont pas souhaité s'impliquer dans une démarche d'aménagement paysager, c'est pourquoi parmi les trois passages constituant le lien-clé à déconnecter, seul le premier (zone 1A) fera l'objet d'aménagements.

5.4.4. Diagnostic des espèces tributaires des milieux ouverts

Dans la zone 1A, une zone d'inventaire a été déterminée, pour évaluer l'impact des actions qui seront menées sur le terrain sur les autres espèces vivant dans les prairies (figure 22, zone représentée en orange). Un état initial de la richesse faunistique est en cours de finalisation. Il s'applique à trois groupes d'espèces : les mammifères, les oiseaux et les chiroptères. Dans le cadre de la zone atelier Arc Jurassien, un suivi ultérieur de ces groupes permettra de faire un diagnostic local sur le degré de présence de ces espèces, et l'éventuelle perturbation due aux changements de pratiques et aux dispositifs de lutte contre les campagnols terrestres.

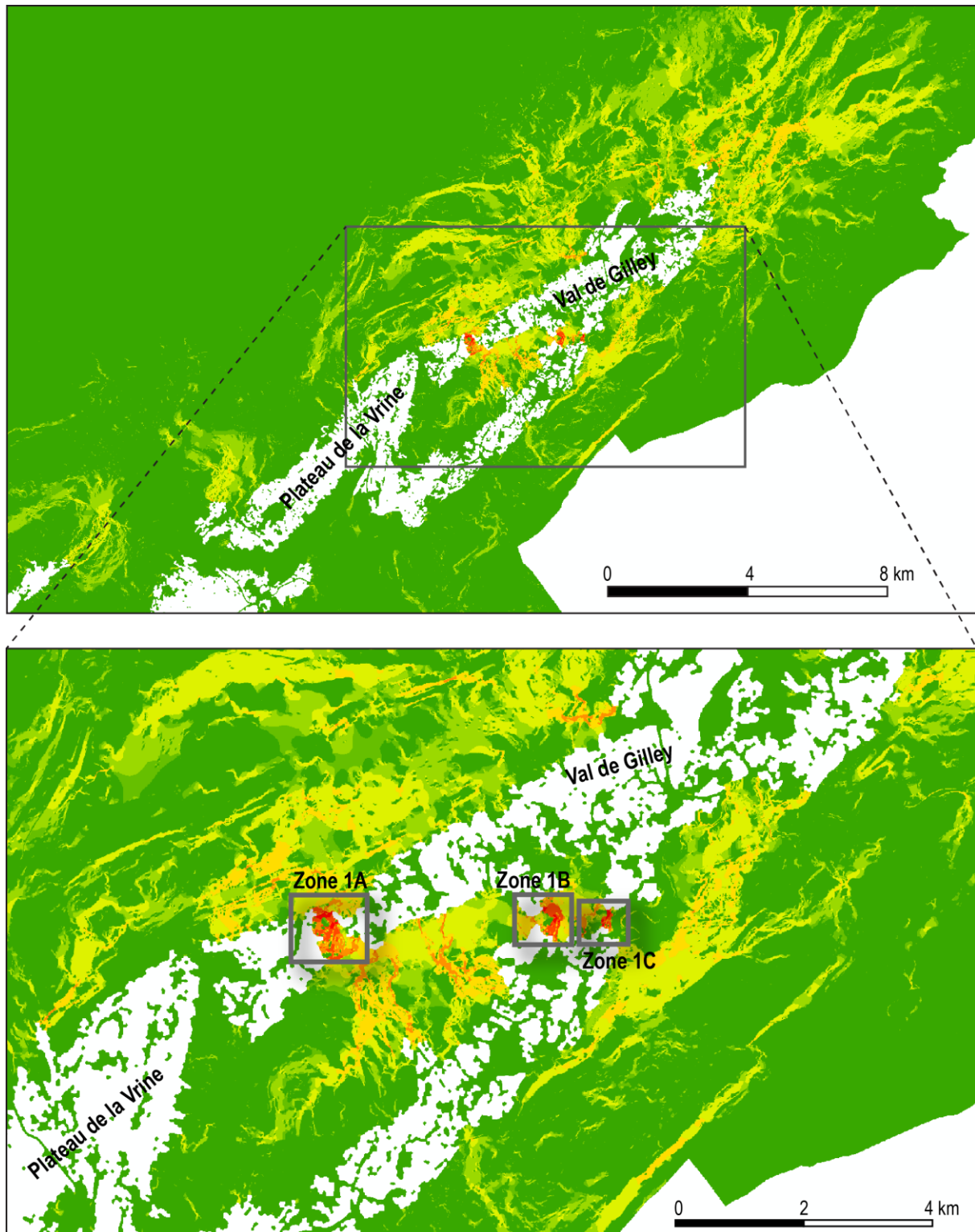


Figure 19. Distribution du courant issue de la théorie des circuits pour étudier le premier lien-clé. Du vert au rouge, passant par le jaune, les couleurs représentent un courant croissant.

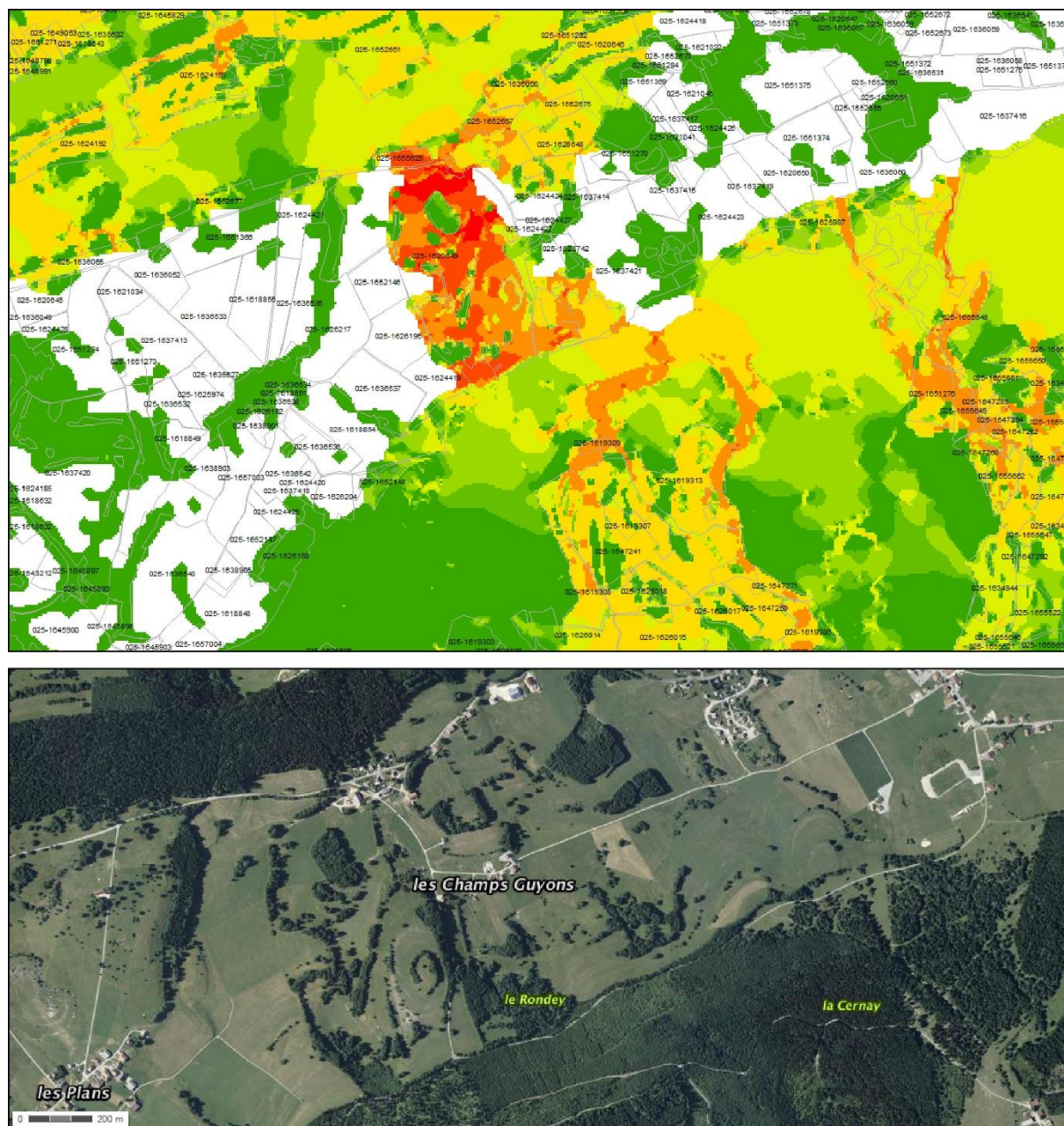


Figure 20. Détail de la zone 1A. En haut, le découpage en îlots du Registre Parcelle Graphique a été superposé aux valeurs de courant. En bas, extrait de la BD Ortho (IGN).

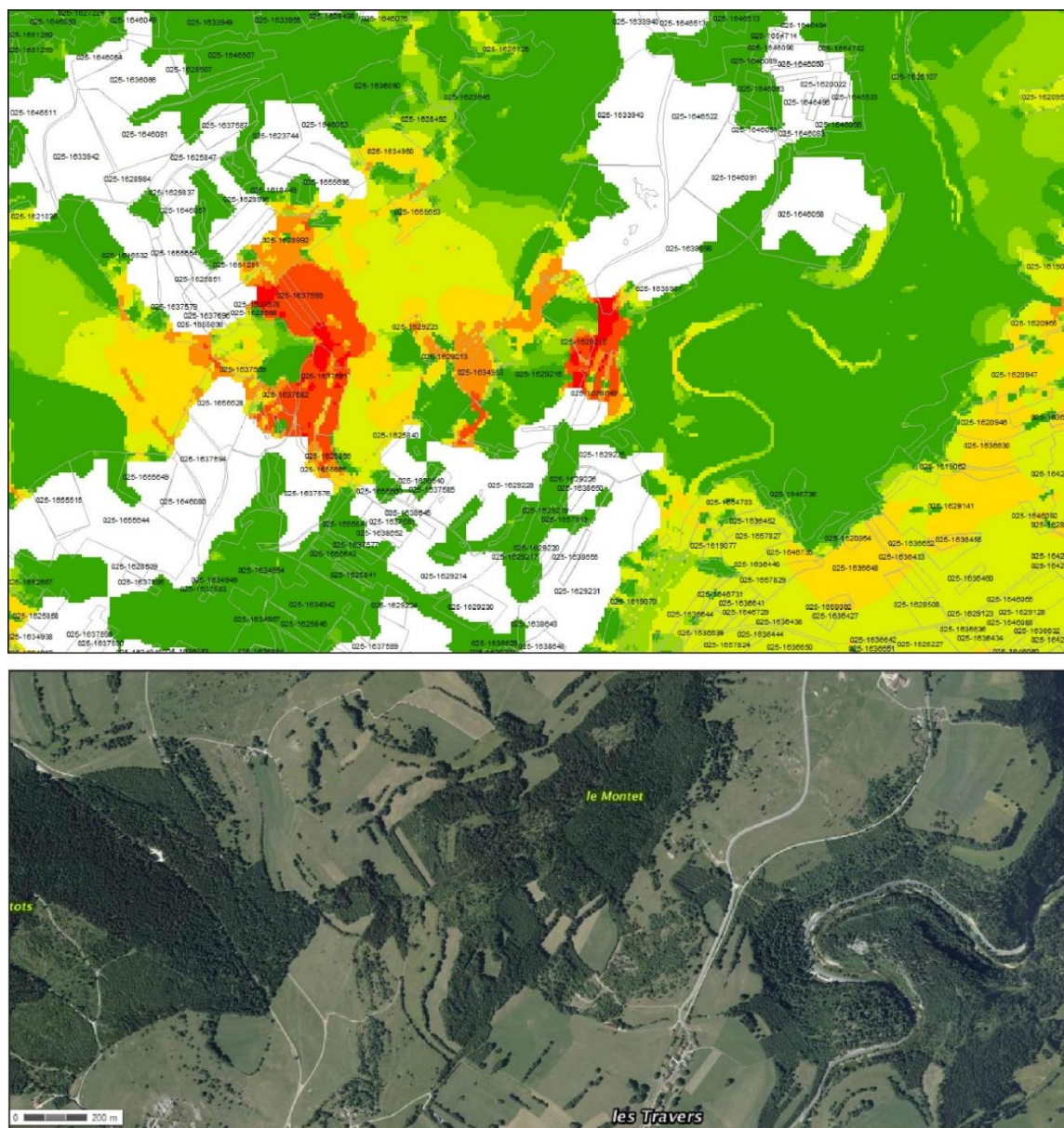


Figure 21. Détail des zones 1B et 1C. En haut, le découpage en îlots du Registre Parcelle Graphique a été superposé aux valeurs de courant. En bas, extrait de la BD Ortho (IGN).

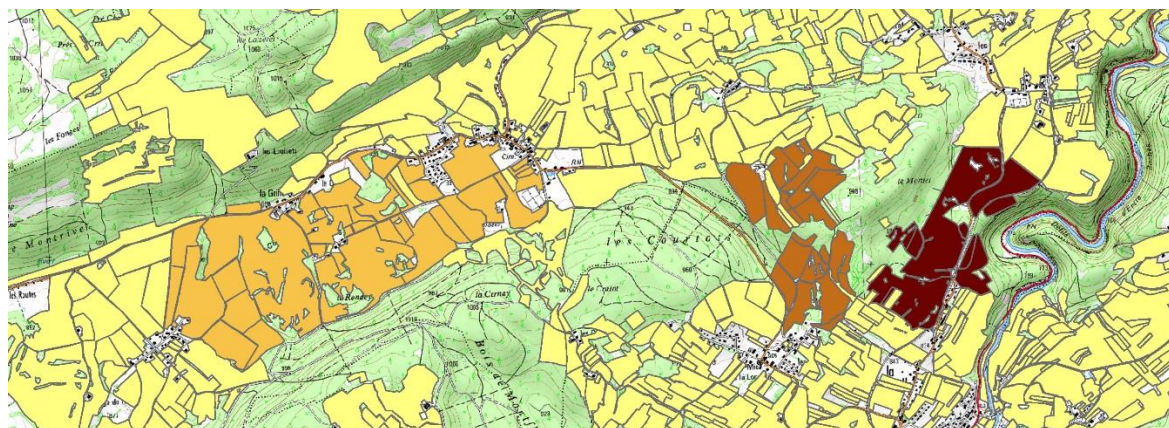


Figure 22. Ilots RPG sur les zones 1A (orange), 1B (rouge) et 1C (marron).

6. Approches locales pour la déconnexion des réseaux de prairies

Une des difficultés rencontrées dans l'analyse menée sur les plateaux jurassiens est liée à la définition des taches qui constituent les nœuds des graphes paysagers. Cette méthode s'applique en principe à un habitat fragmenté, alors que dans certaines zones franc-comtoises, le milieu prairial s'étend de façon continue au point de constituer des taches dont la surface est exceptionnellement grande. La définition de méta-taches et le recours à la théorie des circuits (section 5.4.1.) ont permis de surmonter une partie du problème, mais en nécessitant des moyens de calcul considérables.

Le terrain d'étude auvergnat présente encore davantage de difficulté, si bien que pour cette région, les entités d'analyse ont été redéfinies comme les îlots de parcelles en prairie issus du Registre Parcellaire Graphique (section 3.3.2.). Cette approche fondée sur des limites liées aux unités de pratique agricole plutôt que sur des taches « paysagères » a également été appliquée à des analyses locales sur les plateaux du Doubs.

6.1. Le paysage comme support de la lutte collective en Auvergne

6.1.1. Première approche sur les espaces prairiaux du Puy-de-Dôme

Le graphe paysager modélisant le réseau écologique du campagnol terrestre a été utilisé pour identifier les éléments stratégiques de ce réseau. Comme dans la partie 5.3., l'identification de ces éléments stratégiques s'est fondée sur la méthode de la suppression en prenant la métrique PC comme référence. Ici l'analyse a été appliquée aux nœuds du graphe, c'est-à-dire aux îlots parcellaires dont on a successivement simulé la suppression (en réalité un changement d'usage agricole).

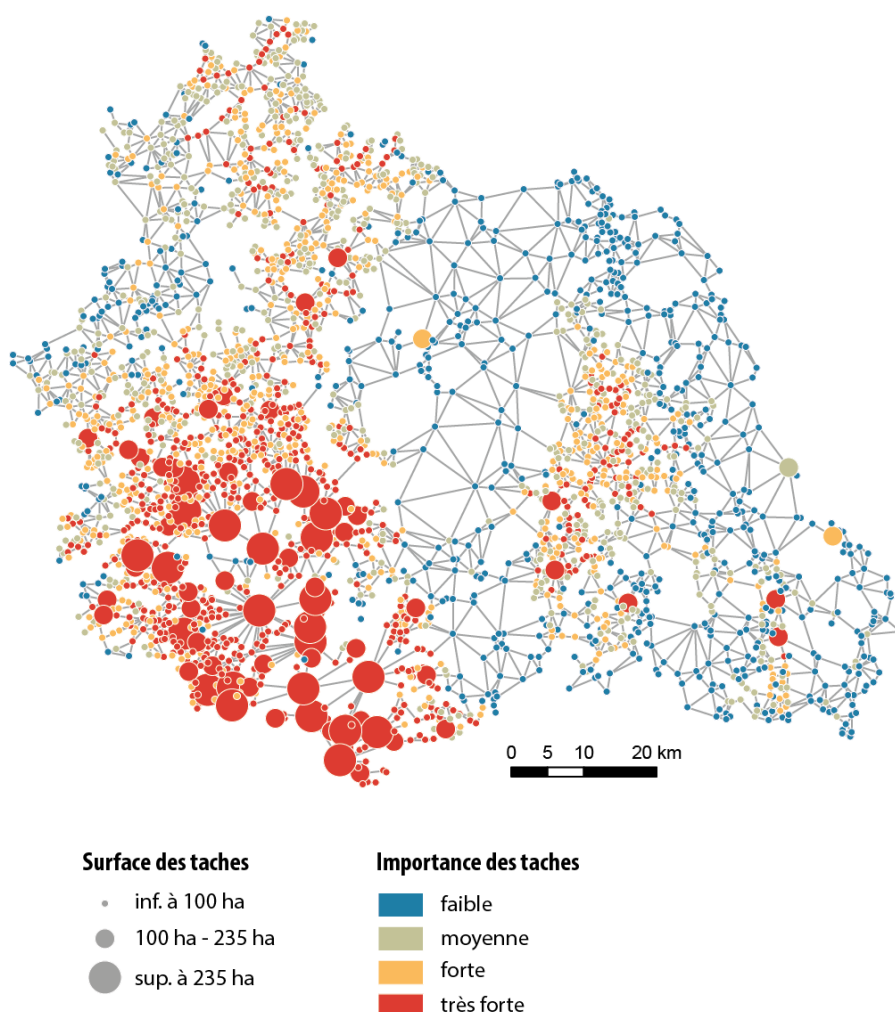
Les résultats montrent que les espaces les plus stratégiques au fonctionnement du réseau se situent au sud-ouest du département (figure 23). La surface des taches joue un rôle important dans le calcul de la métrique, dans cette zone on observe une forte relation entre la surface et l'importance de la tache dans le réseau. Cependant, ces prairies dont la surface est très grande ne représentent pas en réalité un enjeu fort dans la lutte. Il s'agit essentiellement d'estives, des espaces consacrés à l'élevage extensif et dont l'intérêt économique est faible relativement à d'autres parties du département.

En revanche, l'ensemble des prairies situées au nord des grandes zones d'estives présente des surfaces moins importantes, mais dont la connectivité est forte à très forte. Ces zones sont régulièrement soumises à des vagues de pullulations de campagnols. En accord avec la FREDON Auvergne, il a donc été décidé de centrer le reste de l'analyse sur cet espace vulnérable aux pullulations. Une commune dans cette zone du Puy-de-Dôme (Briffons), ainsi qu'une seconde commune en Haute-Loire (Siaugues-sainte-Marie) faisaient déjà l'objet d'une enquête auprès des exploitants agricoles concernant leurs méthodes de lutte.

6.1.2. Le cas de deux communes auvergnates : Briffons et Siaugues-sainte-Marie

En appliquant les méthodes au niveau local de ces deux communes, l'objectif de cette étude est d'identifier et hiérarchiser les îlots de prairies, les plus stratégiques dans le réseau, dans une perspective d'action concertée avec la profession agricole. Ces actions à cibler sont essentiellement la conversion des prairies en culture pour limiter la diffusion des campagnols terrestres.

Figure 23. Graphe du réseau de prairie à l'échelle du département du Puy-de-Dôme. La taille des cercles est proportionnelle à la surface des taches de prairie et la couleur reflète l'importance des nœuds dans le réseau selon les valeurs de la métrique de connectivité dPC.



Protocole méthodologique sur le graphe

La structure simple du graphe paysager permet de déconnecter virtuellement le réseau et ainsi évaluer l'impact de la suppression de certains éléments sur la connectivité globale du réseau. Comme précédemment, l'analyse se focalise ici sur les îlots de prairies constituant les nœuds du graphe.

La valeur de la métrique globale de connectivité PC est calculée à l'état initial où tous les liens et tous les nœuds sont présents dans le graphe. Ensuite, chaque nœud ainsi que ses liens incidents sont retirés tour à tour. A chaque retrait, la métrique de connectivité globale est recalculée. A la première itération, le nœud dont le retrait induit la plus grande diminution de connectivité globale est identifié comme le premier meilleur nœud à retirer. A la seconde itération, le premier nœud identifié est retiré définitivement du graphe pour le reste de l'analyse (approche cumulative déjà mentionnée) et chaque nœud restant est de nouveau testé afin d'identifier le second meilleur nœud à retirer. L'analyse se poursuit afin d'identifier le troisième meilleur nœud, et ainsi de suite. Le nombre d'itérations peut dépendre soit du nombre de nœuds maximum que l'on souhaite retirer, soit en fonction d'un niveau de diminution de connectivité que l'on souhaite atteindre.

Par souci d'économie de temps de calcul, un premier test a été réalisé en construisant un graphe planaire dans un espace euclidien. Cependant, afin de pouvoir comparer la sensibilité des résultats au type de graphe sur lequel se fonde l'analyse, un second graphe, complet, reliant toutes les taches entre elles, a également été construit.

Création de deux scénarios d'intervention

Pour chaque commune, deux analyses ont été réalisées, une première suivant un scénario directif, une seconde selon un scénario participatif.

Scénario directif

Ce scénario consiste à tester tous les îlots de prairies de la commune et de les hiérarchiser. Tous les îlots sont considérés ici comme « candidats » à un changement de pratique agricole. Ce scénario correspond à une approche « directive » au sens où le choix final des parcelles à convertir se fonde uniquement sur la modélisation. Ce scénario garantit la plus grande diminution de connectivité, mais peut conduire à des difficultés de mise en pratique, liés à des critères non pris en compte dans la modélisation (volonté des agriculteurs, contraintes locales).

Scénario participatif

Ce scénario commence par l'identification des îlots dans lesquels les exploitants agricoles sont prêts à changer leurs pratiques. Une telle démarche a pu bénéficier ici des résultats d'une enquête menée par la FREDON Auvergne auprès des exploitants agricoles des deux communes. Cette enquête avait pour objectif d'analyser leurs pratiques ainsi que leur investissement dans la lutte collective contre le campagnol et la taupe. Parmi les prairies naturelles recensées dans l'enquête, une sélection a été réalisée selon cinq critères. Les parcelles conservées sont mécanisables, n'ont pas de contraintes liées à la pente ou à des zones d'hydromorphies ou de contraintes liées à la présence de cailloux. Un critère supplémentaire est lié à la motivation des agriculteurs.

Une fois la sélection des parcelles effectuée, le protocole suivi pour le scénario directif est appliqué. Les parcelles sont alors testées une à une et sont hiérarchisées en fonction d'une priorité d'intervention. Ce scénario étant fondé à la fois sur la capacité des prairies à être transformées et sur la motivation des exploitants, il correspond à une approche plus volontaire de la lutte. Il a donc un caractère plus pragmatique, mais peut aussi conduire à une diminution moins forte de la connectivité.

Résultats

Un graphe par commune a été construit selon les mêmes critères utilisés sur le terrain franc-Comtois. Si les surfaces des deux communes sont équivalentes, la composition de leurs paysages est différente. La commune de Briffons est caractérisée par une proportion de prairie plus importante que la commune de Siaugues qui présente plus de cultures (figures 24 et 25). Cette différence de composition joue sur la configuration du paysage et par conséquent sur la structure des deux graphes modélisés. On observe ainsi sur Briffons un réseau de prairies beaucoup plus dense que celui de Siaugues (figures 26 et 27.).

Pour le scénario 1, la différence majeure entre l'utilisation d'un graphe planaire et d'un graphe complet réside dans la plus grande résilience du réseau aux différents retraits. En comparant l'évolution des deux courbes (planaire et complet) pour chaque commune (figure 28), on remarque la présence de « sauts » sur les courbes correspondant aux graphes planaires, alors que les courbes correspondant aux graphes complets sont plus régulières. Le retrait d'îlots de prairie dans les deux graphes planaires entraîne également une diminution plus forte de la connectivité globale du réseau (-80% à -85%) par rapport aux graphes complets (-30% à -45%). Ces différences s'expliquent par le plus grand nombre de liens présents dans le graphe complet, augmentant la redondance des parcours possibles dans le graphe. Ce type de graphe offre alors l'avantage de représenter de manière plus réaliste les déplacements et les adaptations des individus face à une perturbation au sein du graphe.

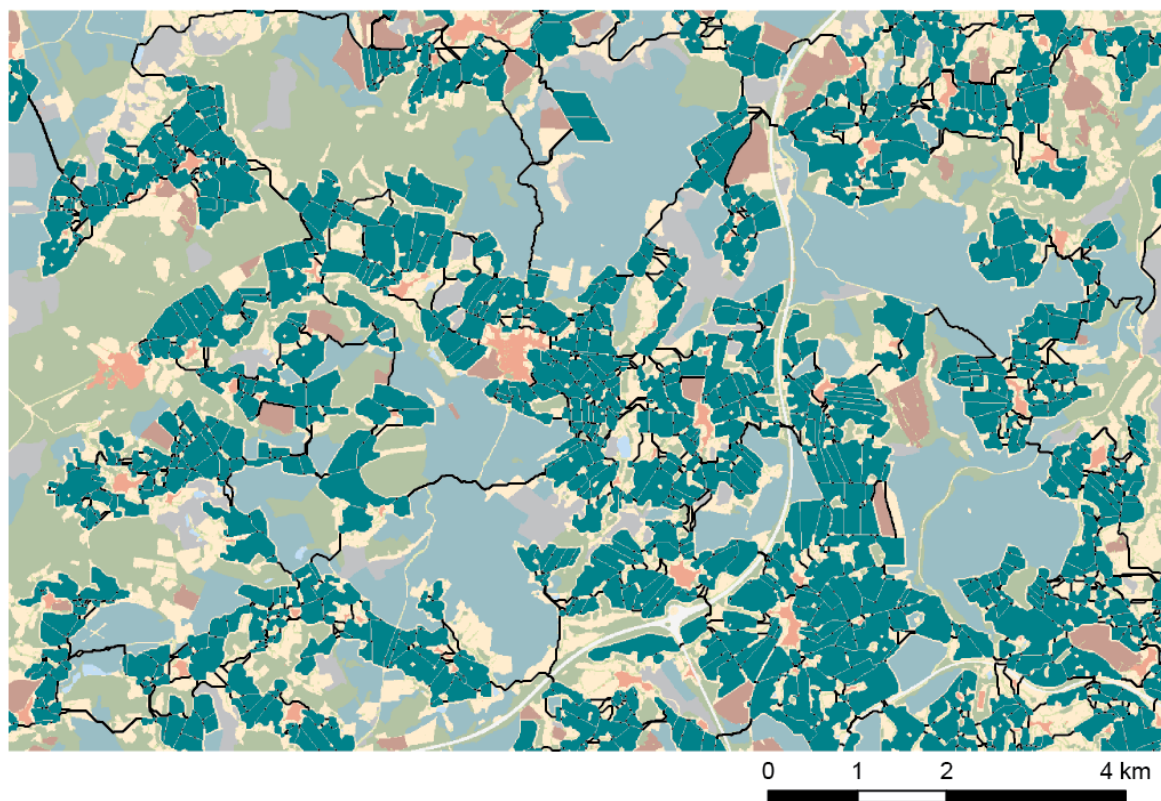


Figure 24. Taches de prairie et chemins de moindres coûts modélisés sur la commune de Briffons.

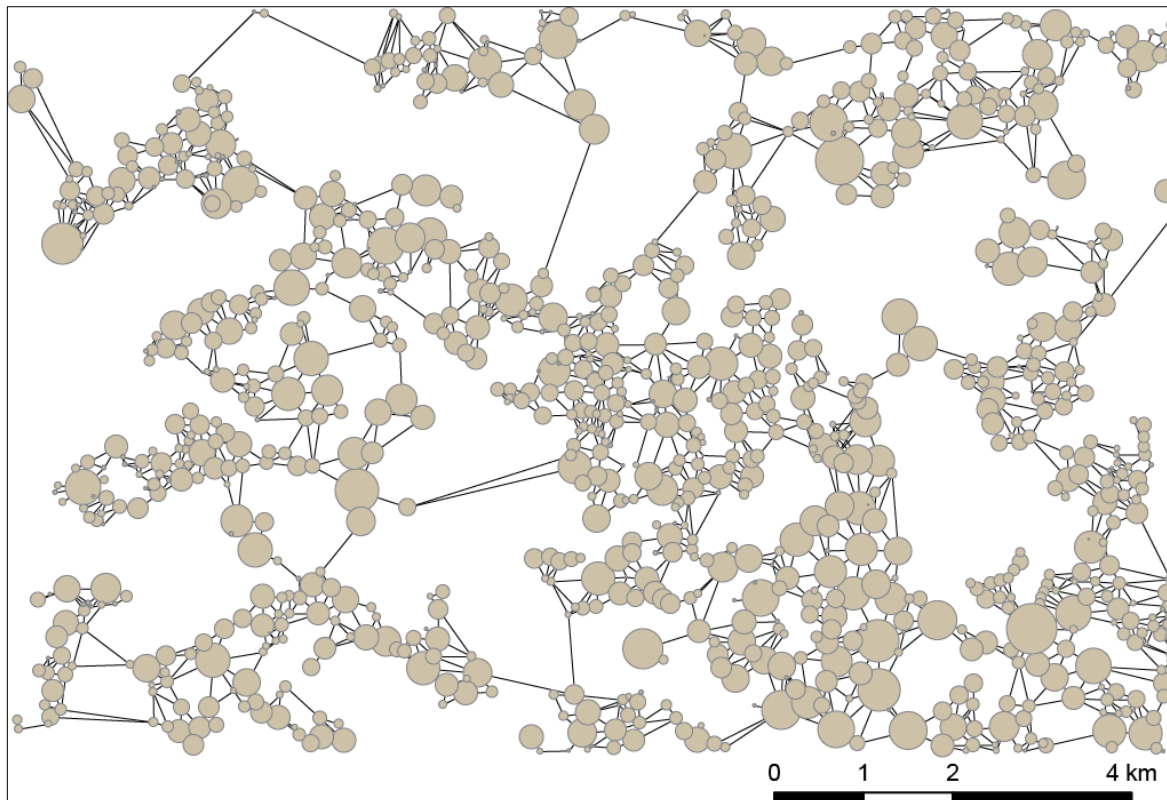


Figure 25. Graphe paysager sur la commune de Briffons.

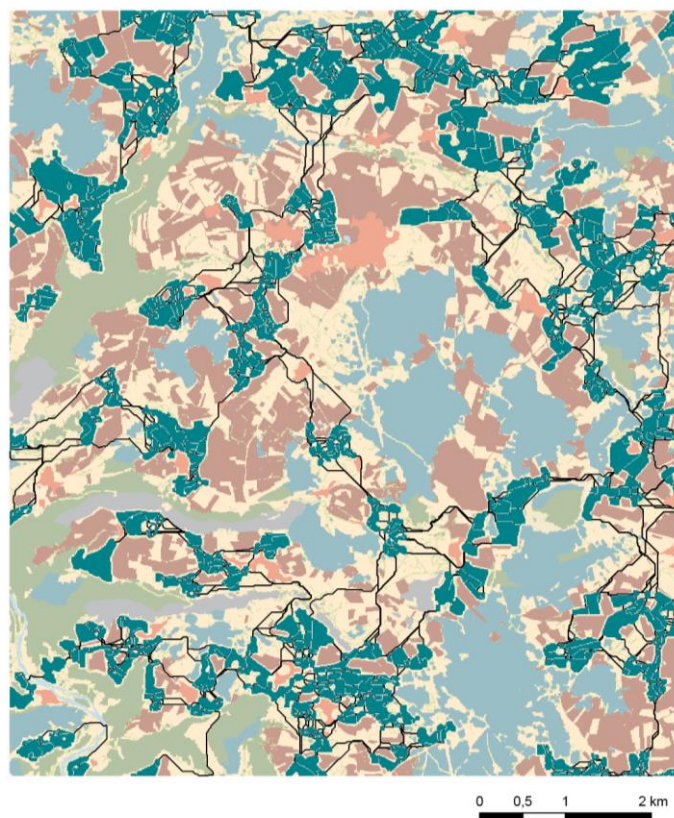


Figure 26. Taches de prairie et chemins de moindres coûts modélisés sur la commune de Siaugues.

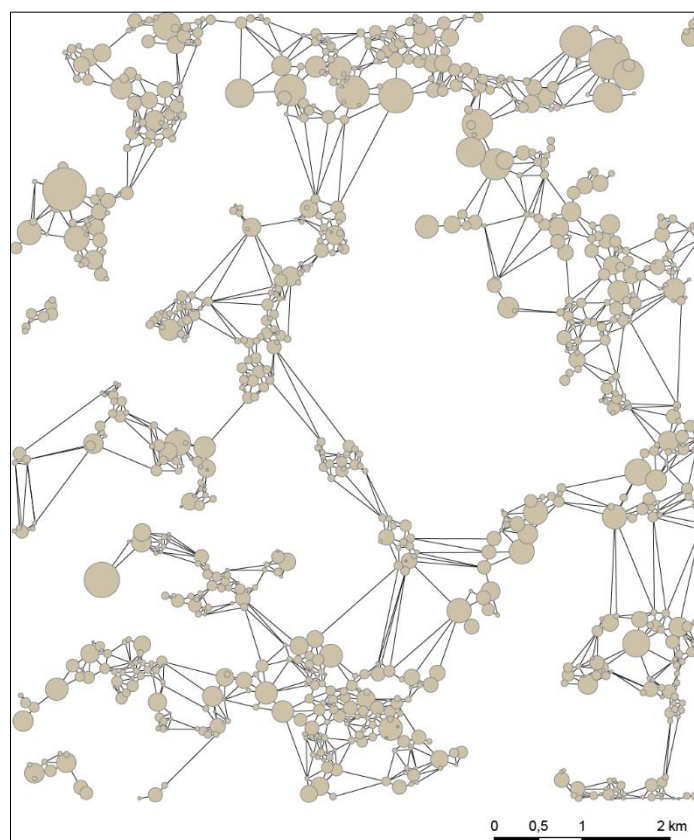


Figure 27. Graphe paysager sur la commune de Siaugues.

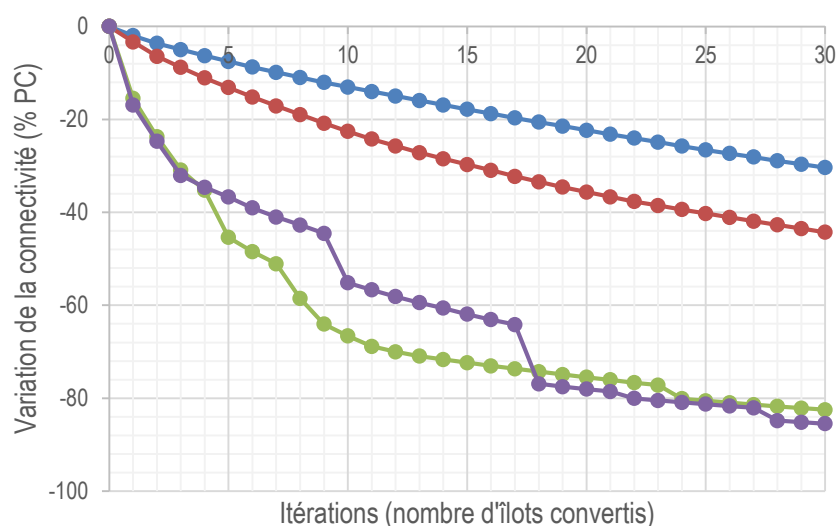


Figure 28. Variation de la métrique PC en fonction du retrait de chaque îlot de prairie identifié par la modélisation du scénario 1 ; Vert : Briffons, graphe planaire ; Violet : Siaugues, graphe planaire ; Rouge : Siaugues, graphe complet ; Bleu : Briffons, graphe complet.

Comparativement, les îlots sélectionnés par le modèle ne sont pas les mêmes entre les graphes planaires et les graphes complets (figures 30 et 31). Sachant que le graphe complet offre une vision plus réaliste de la structure du réseau, les résultats obtenus à partir de ces graphes sont à privilégier. Cependant, les résultats obtenus à partir des graphes planaires peuvent néanmoins être intégrés dans la lutte afin de compléter les mesures de mise en culture des îlots. En effet, un graphe planaire peut représenter les déplacements sur une courte durée, « de proche en proche », ainsi, des moyens de lutte alternatifs sur les îlots identifiés sur les graphes planaires peuvent être envisagés (piégeage, installation de mats à rapace).

Le scénario 2 a été appliqué en utilisant seulement des graphes complets. Pour la commune de Briffons 16 îlots ont été identifiés comme candidats à la conversion en culture, et 27 pour la commune de Siaugues. Comparativement au scénario 1, la diminution de la connectivité due au retrait des îlots candidats est plus faible et plus lente (-3,5% à -4,5%) (figure 29).

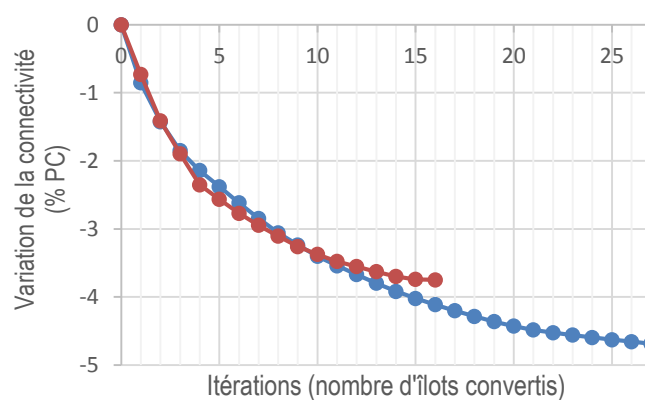


Figure 29. Variation de la métrique PC en fonction du retrait de chaque îlot de prairie identifiés par la modélisation du scénario 2 ; Rouge : Briffons, graphe complet ; Bleu : Siaugues, graphe complet.

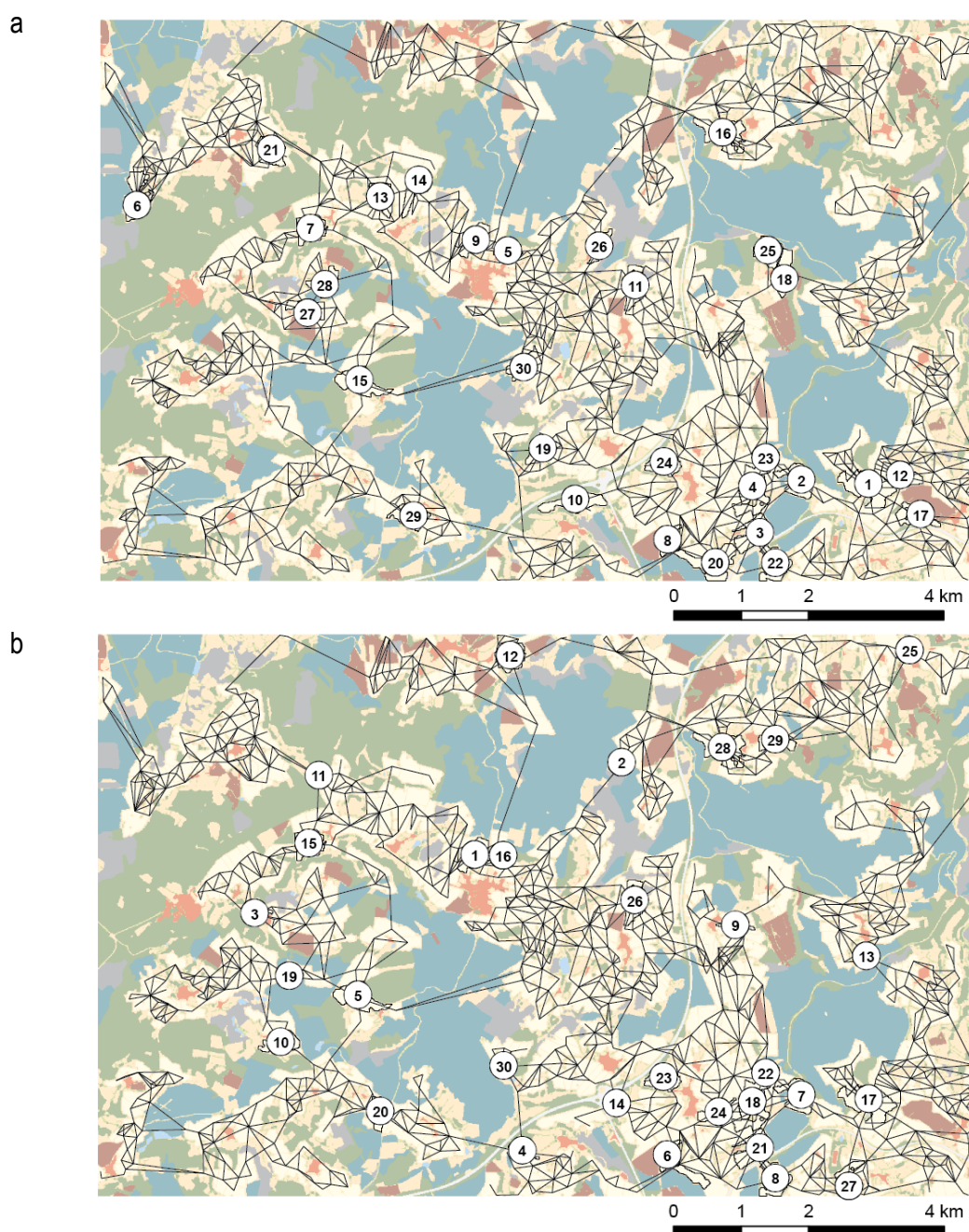


Figure 30. Briffons, scénario 1 sur un graphe planaire (a) et sur un graphe complet (b)

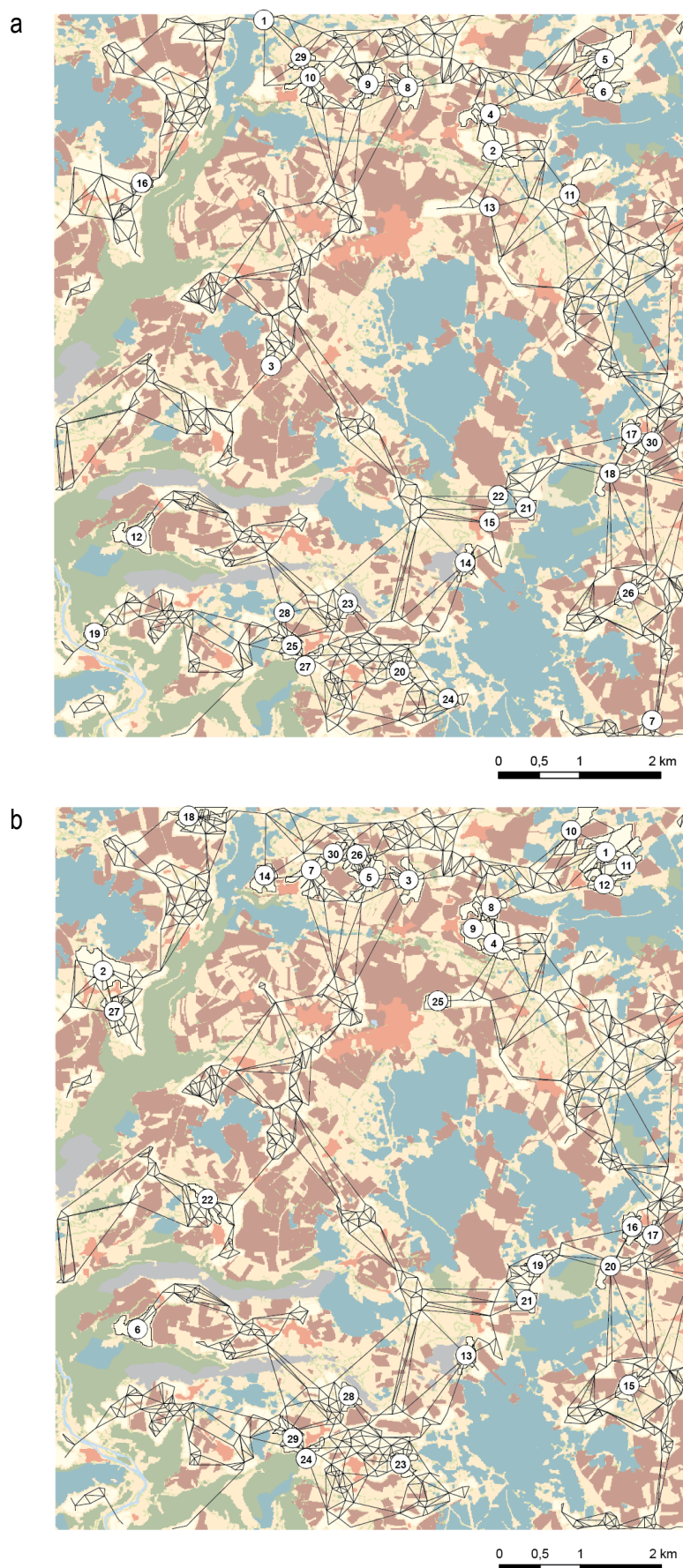


Figure 31. Siaugues, scénario 1 sur un graphe planaire (a) et sur un graphe complet (b)

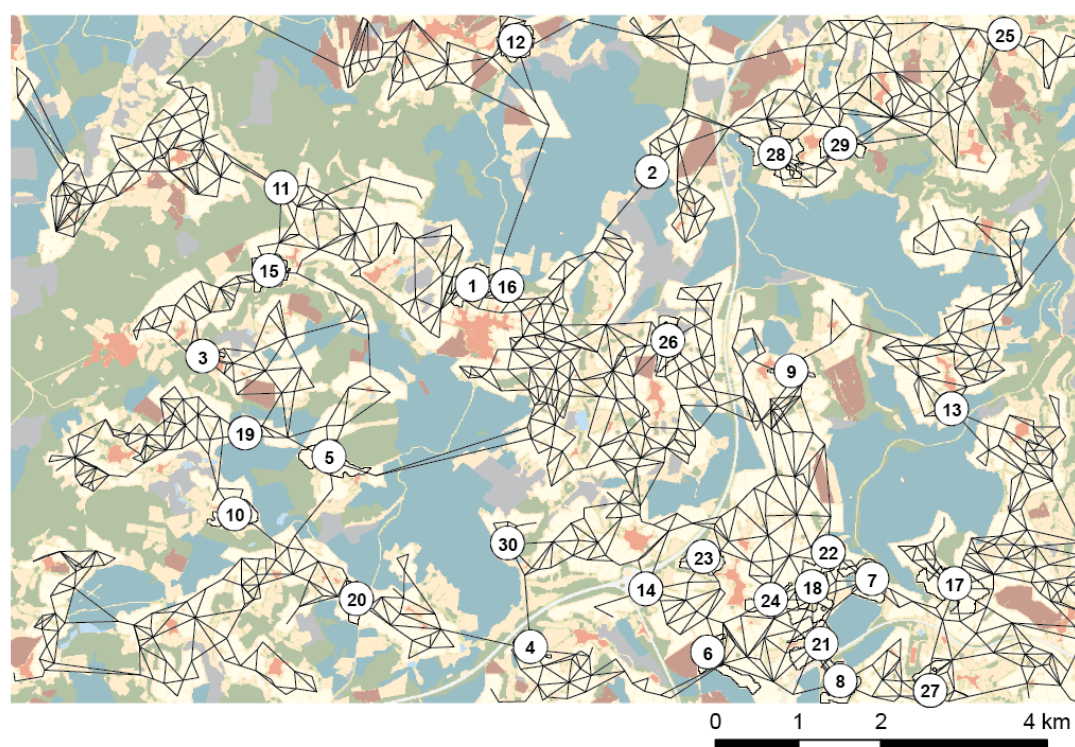


Figure 32. Briffons, scénario 2 sur un graphe complet.

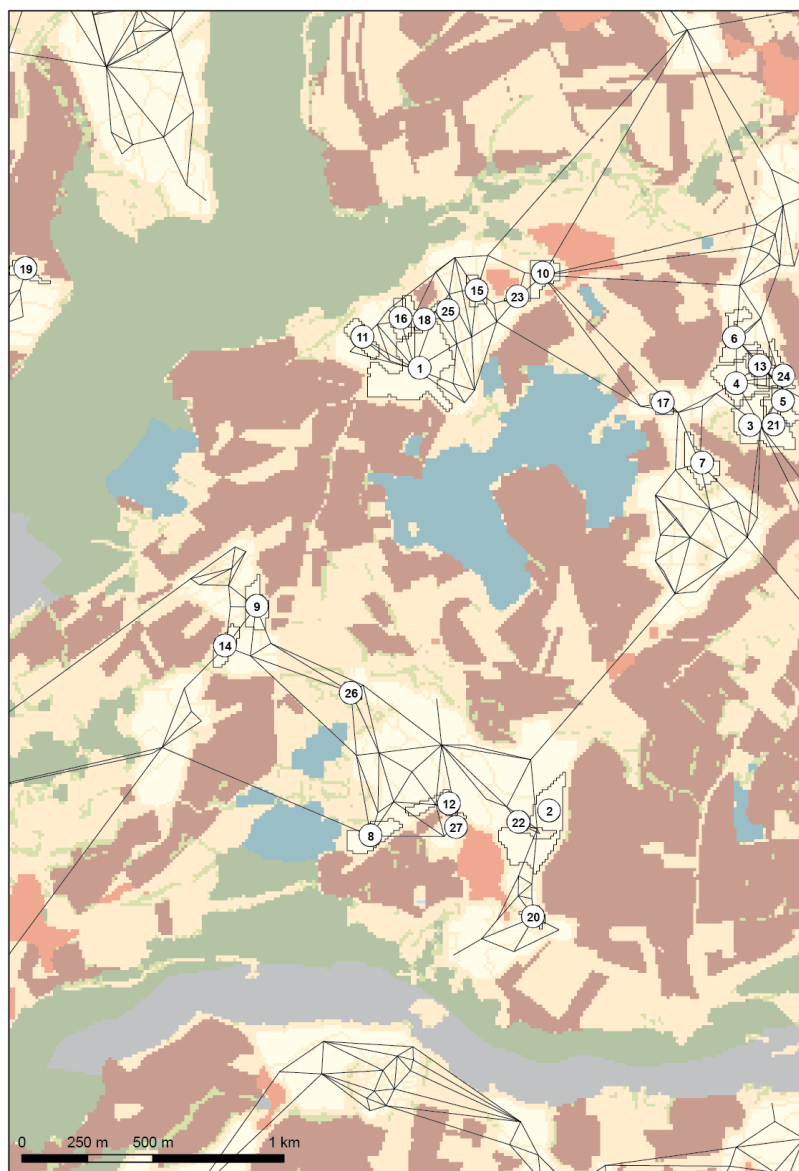


Figure 33. Siaugues, scénario 2 sur un graphe complet.

Les figures 32 et 33 présentent la localisation des parcelles à convertir et leur rang en fonction de l'impact de leur conversion en culture sur la connectivité globale. La diminution moins forte de la connectivité avec le scénario 2 s'explique par le nombre plus limité d'îlots de prairie candidats à la conversion. Dans les deux communes, une partie des agriculteurs n'a pas souhaité répondre à l'enquête, c'est pourquoi les possibilités de conversion se sont concentrées dans les zones gérées par les agriculteurs qui ont adhéré à la démarche. Du fait de cette concentration, les figures 32 et 33 montrent bien que plusieurs îlots considérés comme stratégiques dans le cadre du scénario 1 (figures 28b et 29b) (i.e. arrivant en tête dans la hiérarchie des conversions) ne sont pas intégrés parmi les candidats dans le scénario 2. Dans ces conditions, l'impact de la démarche reste nécessairement limité.

6.2. Approches locales sur les plateaux du Doubs

6.2.1. Contexte et objectif

La démarche suivie sur des sites d'étude du département du Doubs est très proche de celle qui vient d'être décrite sur les deux communes d'Auvergne. Elle n'était pas prévue dans le projet Campagraphe, mais les difficultés rencontrées dans les analyses menées au niveau régional ont conduit à explorer d'autres échelles d'analyse. Cette démarche a été favorisée par la mise en place du projet GIEE (Groupements d'intérêt économique et environnemental) intitulé « Autonomie fourragère des exploitations agricoles, biodiversité et plan de lutte raisonnée contre le campagnol terrestre » et géré par la Chambre interdépartementale d'agriculture du Doubs et du Territoire de Belfort. Ce projet a plusieurs points communs avec le projet Campagraphe puisqu'il vise aussi à la mise en place de mesures agro-écologiques pour limiter les pullulations de campagnols terrestres. En outre, la FREDON Franche-Comté est investie simultanément dans les deux projets. Il est donc apparu opportun de profiter de ce contexte pour compléter l'approche régionale par des analyses locales.

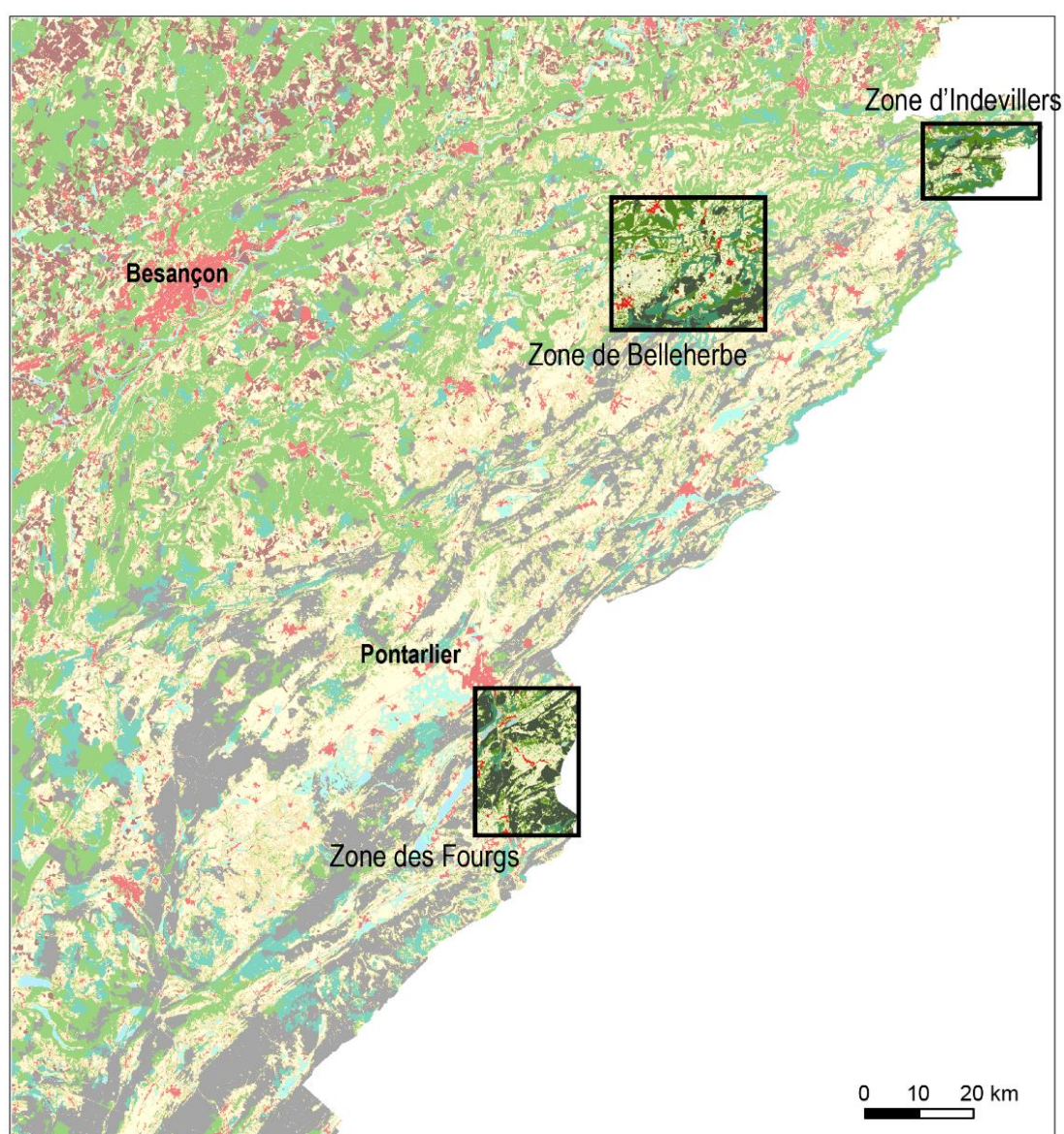


Figure 34. Les trois zones du projet GIEE

Trois zones des plateaux du Doubs sont ciblées, autour des communes d'Indevillers, de Belleherbe et des Fourgs (figure 34). Dans chaque zone, une part importante des agriculteurs en activité (37 agriculteurs au total) est impliquée dans la recherche de mesures agro-environnementales contre les pullulations de campagnols. Là encore, la question est de prioriser les actions pour que l'impact sur la connectivité des prairies soit le plus important possible.

6.2.2. Mise en place du protocole

Par rapport à l'étude appliquée à l'ensemble de plateaux jurassiens, il s'avère nécessaire d'analyser la connectivité des surfaces de prairie à un grain plus fin que celui des taches d'occupation du sol. Comme pour les deux communes d'Auvergne, les îlots de prairie du Registre Parcellaire Graphique (RPG) ont été utilisés comme unités élémentaires. Ce changement est passé par une simple superposition des limites des îlots de prairie sur la carte d'occupation du sol, ces limites étant classées dans la catégorie « autres prairies ». Ainsi, deux îlots appartenant à la même tache de prairie sur la carte régionale sont séparés par une limite formée par des pixels de 10m. Comme la catégorie « autres prairies » n'occasionne pas de coût de déplacement spécifique puisqu'il s'agit du milieu favorable à l'espèce étudiée, ces deux îlots seront reliés par un lien de très faible distance coût, n'impliquant pas de passage par la matrice paysagère.

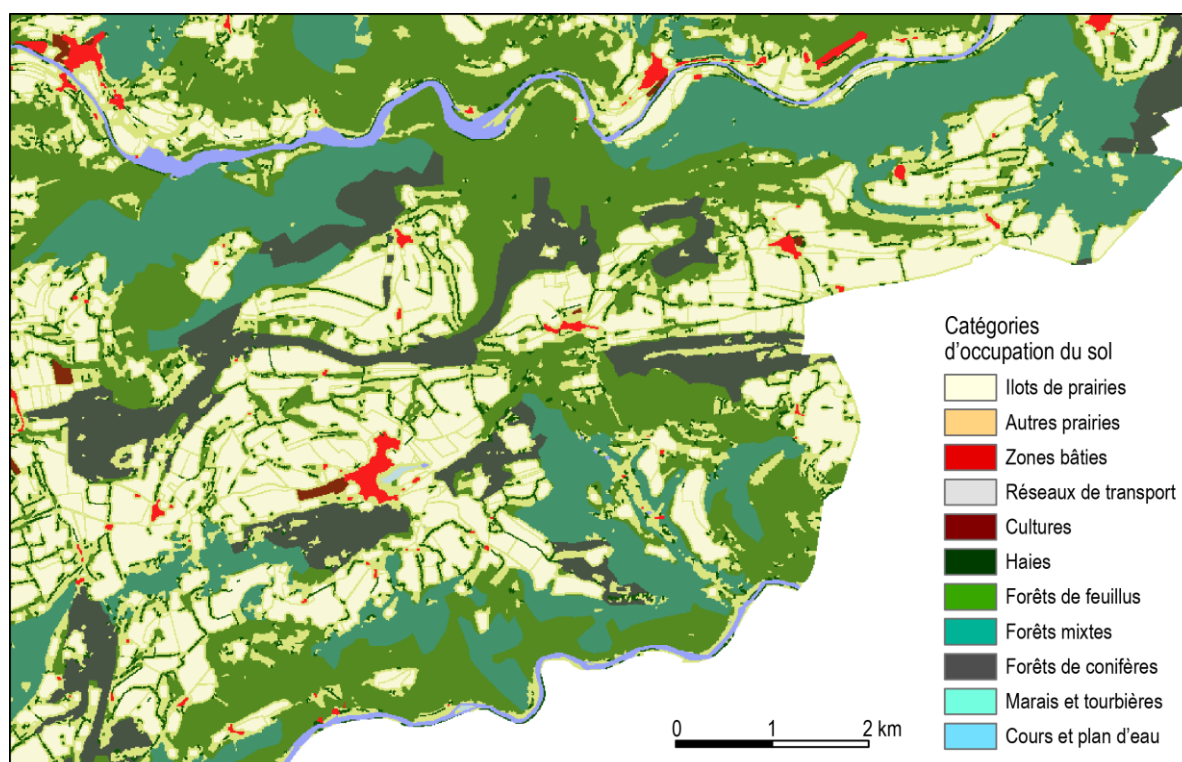


Figure 35. Carte d'occupation du sol de la zone d'Indevillers

Pour mieux représenter les interfaces entre parcelles de prairie, cette étude a pu bénéficier d'un appui en photo-interprétation dans le cadre du projet Observatoire des Dynamiques Industrielles et Territoriales (ODIT) financé par des crédits FEDER et géré à la MSHE Claude-Nicolas Ledoux. Cet appui a permis de compléter la carte d'occupation du sol par l'identification de toutes les haies à partir de la BD Ortho de l'IGN. Rappelons que les haies considérées au niveau régional sont limitées par une largeur minimale de saisie propre à la BD Topo. Les nouvelles haies cartographiées se situent pour la plupart à la limite entre

les îlots du RPG, ce qui permet de différencier les interfaces entre parcelles séparées par une haie ou par une simple clôture. A titre d'exemple, la carte d'occupation du sol incluant la cartographie des haies dans la zone d'Indevillers est présentée dans la figure 35.

Le protocole devant conduire à hiérarchiser les îlots parcellaires en fonction de leur aptitude à jouer sur la connectivité reprend les deux scénarios utilisés en Auvergne, à savoir le *scénario directif* consistant à appliquer l'analyse à la totalité des îlots, et le *scénario participatif* partant des possibilités réelles sur le terrain. Cependant, ces scénarios n'ont pas été conçus comme des analyses séparées, mais comme deux étapes successives d'une même démarche. Le scénario directif a été utilisé ici comme base pour fournir un premier ensemble de résultats devant servir au dialogue avec les agriculteurs. La première hiérarchisation des îlots a été considérée comme un support pédagogique pour que les agriculteurs comprennent bien la démarche et s'approprient l'objectif. Actuellement, au moment de la rédaction du rapport présent, la mise en œuvre du scénario participatif est encore en cours jusqu'au début de l'automne 2015, si bien que seuls les résultats du scénario directif peuvent être présentés ici. Comme précédemment, l'application d'un scénario consiste à retirer successivement une série de nœuds en simulant leur conversion en culture.

6.2.3. Premiers résultats

Dans les trois zones, les graphes ont été construits par utilisant tous les îlots comme nœuds (pas de surface minimale ici en raison d'un nombre acceptable d'éléments à gérer) et en calculant les liens en distance coût à partir du scénario de coût S2 (tableau 1). La topologie du graphe est « complète » puisque le retrait d'éléments du graphe n'est pas réaliste si on se base sur un graphe planaire, comme cela a été constaté sur les résultats obtenus sur les communes d'Auvergne. Cette topologie complète nécessite de seuiliser le graphe à une certaine distance de coupure, correspondant à 1000m ici.

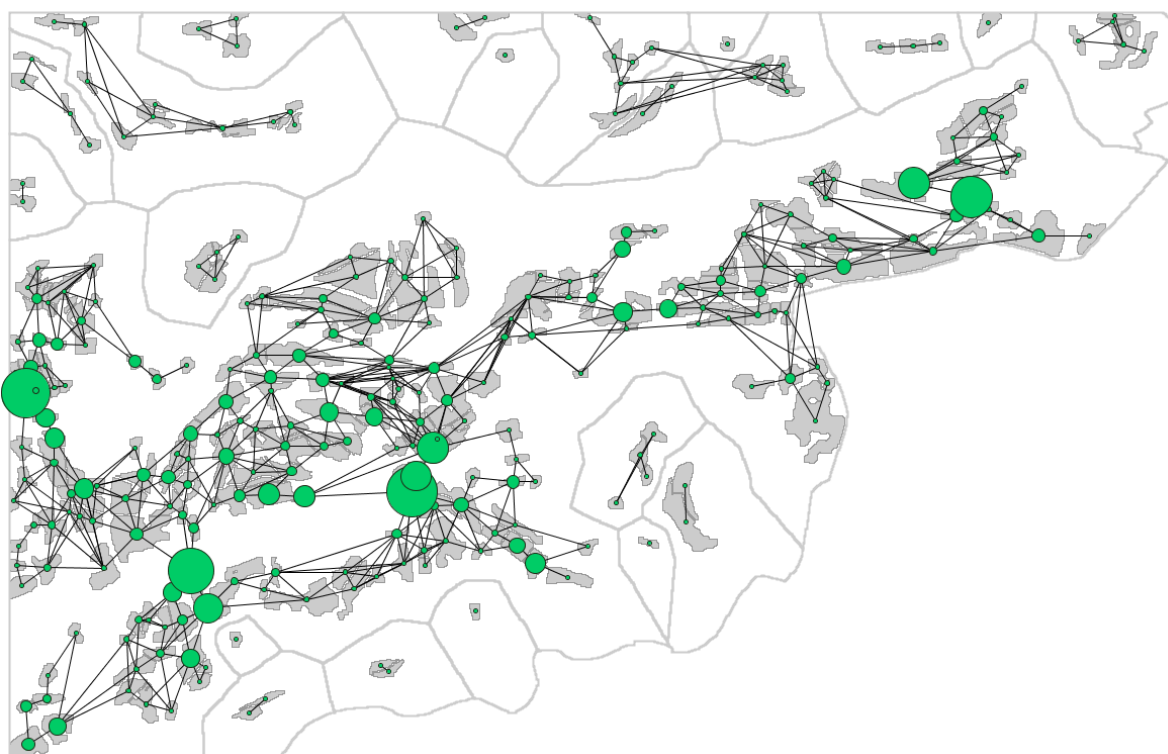


Figure 36. Graphe des îlots de prairie dans la zone d'Indevillers. Les îlots sont délimités de façon réaliste en gris. Les cercles représentent les valeurs de dPC (contribution relative à la connectivité globale).

Sur la zone d'Indevillers, le graphe comprend 285 nœuds et 593 liens. Le plus grand îlot s'étend sur 22 ha. A partir de l'indice PC à nouveau utilisé comme indicateur du niveau de connectivité de l'ensemble de la zone, l'importance de ces îlots pour la déconnexion du réseau résulte dans un premier temps du calcul du dPC (méthode de la suppression). La figure 36 permet de localiser les îlots-clés, situés aux articulations entre les différents compartiments du réseau.

Dans un second temps, l'algorithme de suppression cumulative des nœuds est appliqué jusqu'à 100 nœuds, conduisant à la diminution visible sur la figure 37. Cette diminution est plus rapide pour les premiers îlots, et la courbe suggère qu'au-delà de 15-20 îlots ayant un impact de presque 80%, la connectivité ne baisse plus de façon significative. Selon la localisation des 10 premiers îlots qui seraient à convertir, on retrouve en grande partie les îlots-clés tels qu'ils ont été caractérisés par le calcul non cumulatif (figure 36), mais l'ordre n'est pas rigoureusement le même. De façon logique, ces îlots sont positionnés aux articulations entre les principaux groupes de parcelles. Ainsi la conversion des 3 premiers îlots en culture devrait permettre de déconnecter toute la partie sud du réseau. Au centre, les îlots les plus importants n'arrivent qu'en 9^{ème} et 10^{ème} position, ce qui s'explique par la multiplicité des connexions à cet endroit, et donc pas la plus grande résilience du réseau en cas de perturbation.

L'application du même protocole aux deux autres zones permet de comparer le niveau de diminution de la connectivité en fonction du nombre d'îlots à convertir (figure 38). L'impact relatif des conversions s'avère moins grand dans la zone de Belleherbe, qui montre un comportement proche des deux communes auvergnates. La zone des Fourgs offre un comportement intermédiaire, avec une diminution assez rapide jusqu'aux environs de 50% du PC. Ces différences sont dues à des variations de structures paysagères. En effet, la zone d'Indevillers, cernée par un méandre du Doubs et caractérisée par de fortes pentes boisées, présente une configuration où les îlots de prairies sont regroupés en compartiments déconnectés ou faiblement connectés. La connectivité initiale est donc plus faible, avec une valeur de PC de 0,00308. Inversement, la zone de Belleherbe s'étend sur une partie du plateau de Pierrefontaine-les-Varans, qui constitue un vaste openfield. La connectivité y est au départ supérieure, avec un PC de 0,0063. La différence avec les communes étudiées sur le terrain auvergnat s'explique de la même façon.

Pour les zones des Fourgs et de Belleherbe, les cartes d'occupation du sol, des graphes et de la hiérarchie des îlots figurent en annexe 2.

Au cours de l'automne 2015, l'identification des îlots compatibles avec une conversion en culture céréalière sera terminée et la mise en œuvre du scénario participatif sera possible. Comme en Auvergne, la sélection des parcelles compatibles s'effectue sur des critères physiques (pente, qualité du sol) et sur des critères propres aux agriculteurs (motivation, place des parcelles au sein des exploitations). Dans le cadre du projet GIEE parallèle à Campagraphe, des moyens seront alloués à la mise en culture et un suivi des impacts sur les pullulations de campagnols terrestres sera effectué.

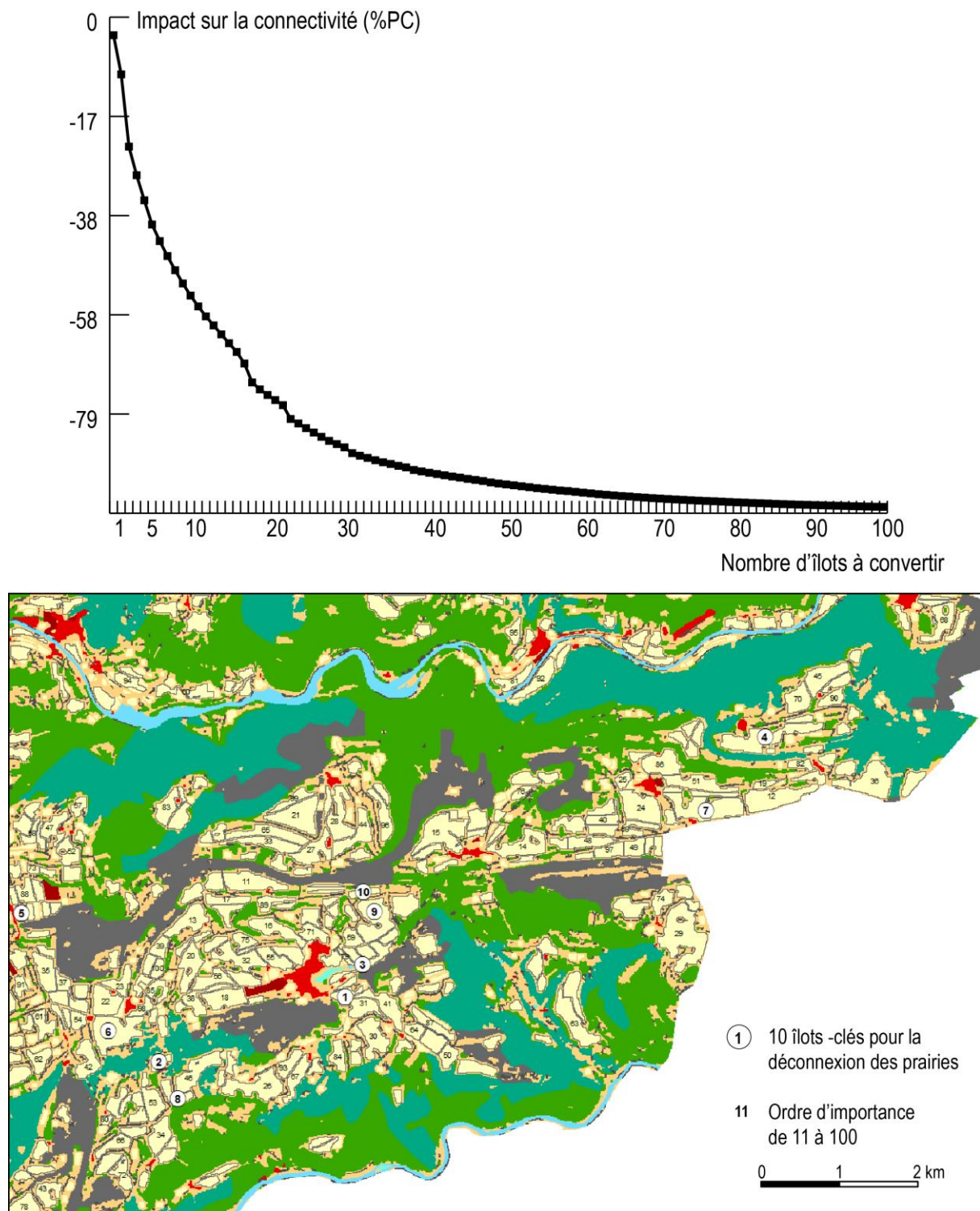


Figure 37. Hiérarchie des îlots de prairies selon le scénario directif dans la zone d'Indevillers

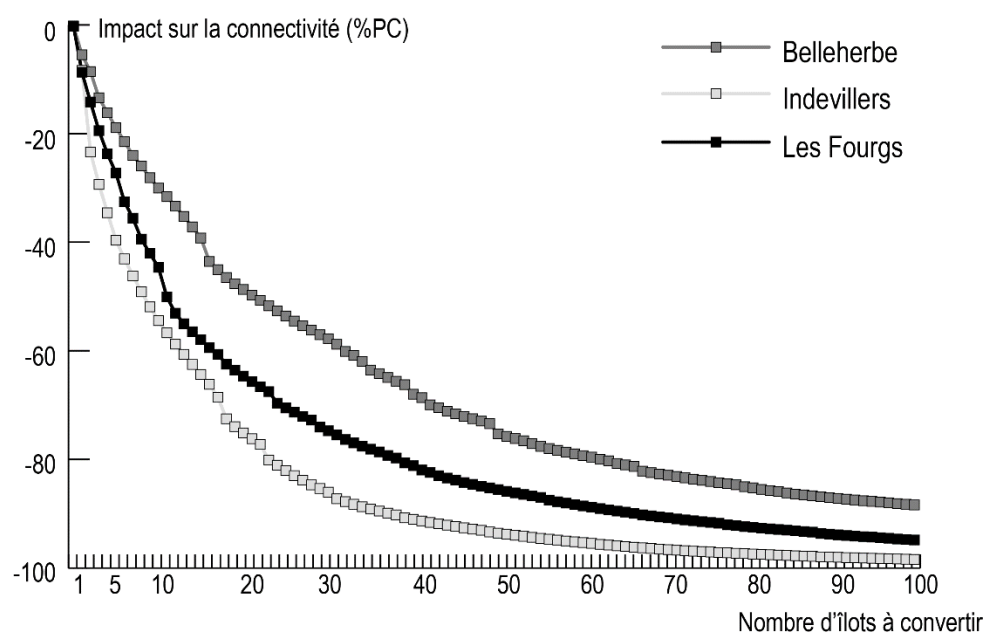


Figure 38. Diminution de la connectivité selon le scénario directif dans les trois zones du Doubs

7. Synthèse des résultats et discussion

Les analyses effectuées dans le cadre de ce projet ont permis d'obtenir une série de résultats et de cerner les limites des méthodes utilisées. Nous proposons de revenir ici sur les principaux enseignements retenus.

7.1. Un découpage spatial en unités fonctionnelles

La mise en œuvre d'une méthode de segmentation utilisant un critère proposé récemment dans la littérature générique sur les analyses de réseau (la modularité) et adapté au graphe paysager a conduit à l'élaboration d'un découpage spatial. Les analyses statistiques basées sur les données démographiques disponibles ont montré que ce découpage avait une bonne pertinence puisque chaque compartiment se caractérise par une dynamique propre. L'usage du critère de modularité s'avère donc intéressant pour définir des unités spatiales dédiées au suivi environnemental, et dans le cas étudié pour le suivi des populations de campagnols terrestres.

7.2. Approche régionale versus locale ?

Le projet initial prévoyait d'appliquer les méthodes de graphe à l'échelle régionale, en effectuant des focus locaux pour passer du modèle spatial aux dispositifs de terrain. Ce plan a rencontré deux problèmes de nature différente mais qui se sont cumulés.

Distance coûts ou théorie des circuits

Le premier problème est venu de la nature assez peu fragmentée du milieu prairial dans les deux régions étudiées. Rappelons que les taches de prairies ont été définies en érodant leur bordure de 50m pour sélectionner les zones les moins soumises aux perturbations, notamment aux prédateurs. Dans le cas auvergnat, la continuité des prairies a rendu la démarche inopérante, une grande partie du département du Cantal formant une seule tache de prairie. Dans le cas franc-comtois, l'étude menée en 2012 en amont de ce projet avait montré que les graphes paysagers convenaient bien pour représenter le réseau de

prairies. Mais la taille des taches de prairies dans la zone centrale de la région a rendu l'identification des liens-clés relativement délicate. La stratégie en deux étapes testée dans un premier temps n'est pas satisfaisante, puisqu'elle a consisté à hiérarchiser les liens à partir d'une métrique spatiale trop caricaturale (la distance coût), puis à amender cette hiérarchie en utilisant la métrique spatiale la plus pertinente (distance de résistance). La stratégie reposant directement sur cette seconde métrique a donné un résultat satisfaisant, mais sa reproductibilité est réduite car des moyens de calcul très importants ont dû être mobilisés, et une étape de constitution des méta-taches a été ajoutée.

Taches paysagères ou unités de gestion agricole

L'approche locale, c'est-à-dire le focus sur des zones de taille réduite (quelques communes) a été expérimenté suite aux difficultés mentionnées. Dans ce contexte, les taches de prairie étaient trop grossières pour rendre la démarche opérationnelle, si bien que le découpage de ces taches en fonction des îlots parcellaires du Registre Parcellaire Graphique s'est imposé. Sur le plan technique tout d'abord, cette adaptation s'est avérée simple et reproductible. L'analyse du réseau prairial a pu se fonder sur des paramètres classiques et notamment utiliser les distances coûts. Sur le plan opérationnel ensuite, le travail à partir de ces unités de gestion agricole (ou tout au moins très proches des parcelles) sur une zone de taille restreinte a facilité le lien avec les acteurs de terrain. Deux stratégies ont été appliquées : (1) en Auvergne une enquête préalable a permis de cibler la hiérarchisation des îlots de prairie en fonction des contraintes de terrain et de la motivation des agriculteurs (scénario participatif) ; (2) en Franche-Comté, le premier scénario qualifié de directif a permis de disposer d'une première hiérarchisation, utilisée pour mettre en œuvre le scénario participatif.

Pour aboutir à la mise en place de dispositifs agro-écologiques, il ressort que les approches locales sont nettement plus faciles à réaliser. Le découpage des taches de prairie en îlots parcellaires, qui pourrait être considéré comme une segmentation artificielle du point de vue écologique et comme une perturbation potentielle des calculs sur les graphes, a montré qu'il était tout à fait opérationnel. La limite de cette approche reste toutefois dans la portée locale des dispositifs de terrain, quand l'approche régionale vise une modification globale de la fonctionnalité du réseau de prairie.

Annexe 1. Résultats complets des tests de robustesse des graphes

Cette annexe vient en complément à l'analyse présenté à la section 3.2.2. Pour chaque cas de figure analysé (phase de croissance ou de déclin identifiée au 3.2.2.), une série de régressions a été effectuée en faisant varier la distance correspondant à $e^{-ad} = 0.05$ entre les valeurs indicatives de 50 à 4000 (correspondant respectivement à 500 et 40000 m pour le scénario de distance euclidienne). Pour chacun des 25 cas étudiés, le modèle retenu a été celui qui maximisait le coefficient de détermination. Les résultats complets sont donnés dans le tableau 4.

Phase	Année	S1	S2	S3	S4	S5
Croissance	1990	0.0239**	0.0278**	0.0215**	0.0224**	0.0071
	1991	0.1008***	0.1088***	0.1083***	0.0367***	0.0763***
	1992	0.0484***	0.0745***	0.0713***	0.0674***	0.0593***
	1993	0.1235***	0.1207***	0.1459***	0.1634***	0.1381***
	1995	0.0041	0.0310***	0.0221**	0.0238**	0.0269***
	1996	0.0131**	0.0401***	0.0099*	0.0330***	0.0117*
	1997	0.0074	0.1354***	0.0739***	0.0395**	0.0280**
	1998	0.0900***	0.1042***	0.0912***	0.0909***	0.0916***
	1999	0.1252***	0.0184	0.0164	0.0142	0.1101***
	2000	0.0418***	0.0978***	0.0650***	0.0590***	0.0744***
	2001	0.0143***	0.1497***	0.0617***	0.0728***	0.0199***
	2002	0.2700***	0.2017***	0.1653***	0.1667***	0.1750***
	2003	0.0044	0.0082	0.0135	0.0159	0.0025
	2004	0.0204**	0.1141***	0.1123***	0.1027***	0.0522***
Déclin	1992	0.0284**	0.0049	0.0007	0.0274**	0.0125*
	1993	0.1503***	0.1300***	0.0883***	0.1046***	0.1643***
	1994	0.2102***	0.0709***	0.0635***	0.0506***	0.0823***
	1995	0.0718***	0.1297***	0.1133***	0.1279***	0.0807***
	1999	0.0100***	0.0377***	0.0666***	0.0352***	0.0286***
	2000	0.0236***	0.0090	0.0267***	0.0291***	0.0298***
	2001	0.1371***	0.1897***	0.1561***	0.1639***	0.1495***
	2002	0.0368**	0.0875***	0.0389**	0.0340**	0.0227*
	2004	0.0892***	0.0698***	0.0984***	0.0304***	0.0892***

Tableau 4. Coefficients de détermination des régressions linéaires. Les astérisques donnent les degrés de significativité : *** représente $p < 0.001$; ** représente $p < 0.01$; * représente $p < 0.05$. Le degré de liberté varie en fonction du nombre de taches de chaque analyse.

Pour préciser l'analyse, le tableau 5 recense les scénarios qui obtiennent les plus forts coefficients pour chaque cas et le signe de la pente de régression. Il apparaît que pour les phases de croissance, le scénario 2 (milieu forestier imperméable) est le plus pertinent dans 10 cas sur 13 cas. Le signe de la pente de régression est statistiquement significativement positif (test binomial, $p = 0.02$), malgré l'exception des années 1990 et 2004. En ce qui concerne les phases de déclin, les scénarios les plus pertinents varient selon les années et les pentes de régression sont alternativement croissantes et décroissantes. Un test binomial conduit à accepter l'hypothèse nulle de variations aléatoires du signe ($p = 0.51$)

Phase	Année	Scénario le plus pertinent	Signe de β (pente de la régression)
Croissance	1990	S2	-
	1991	S2	+
	1992	S2	+
	1993	S4	+
	1995	S2	+
	1996	S2	+
	1997	S2	+
	1998	S2	+
	1999	S1	+
	2000	S2	+
	2001	S2	+
	2002	S1	+
	2004	S2	-
Déclin	1992	S1	+
	1993	S5	+
	1994	S1	-
	1995	S2	-
	1999	S3	+
	2000	S5	+
	2001	S2	-
	2002	S2	+
	2004	S3	+

Tableau 5. Synthèse des scénarios les plus pertinents en fonction des cas étudiés

Annexe 2. Analyses locales sur les zones des Fourgs et de Belleherbe

Cette annexe vient en complément à l'analyse présentée à la section 6.2. Seules les cartes de la zone d'Indevillers figurent dans le corps principal du rapport.

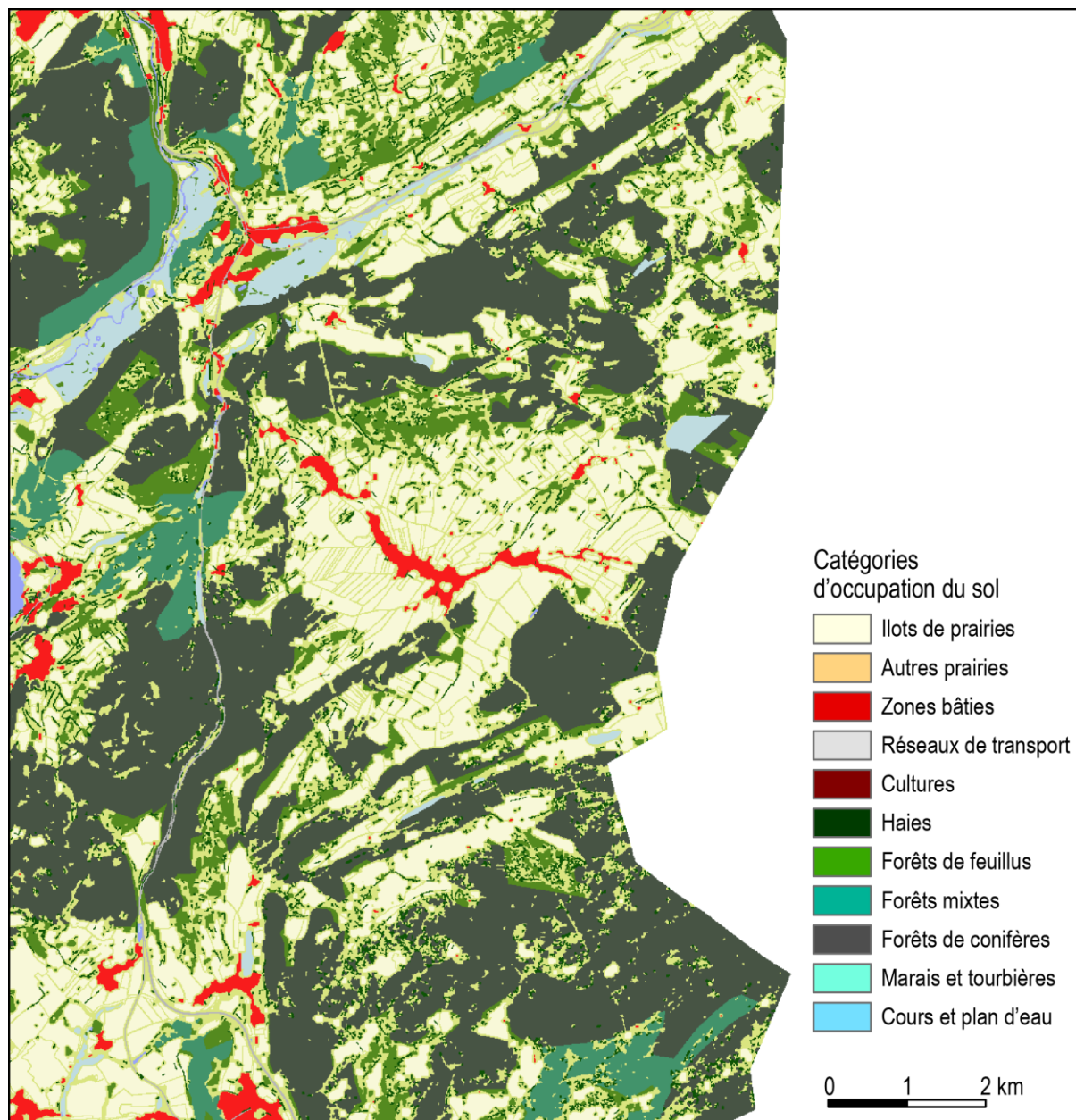


Figure 39. Carte d'occupation du sol de la zone des Fourgs

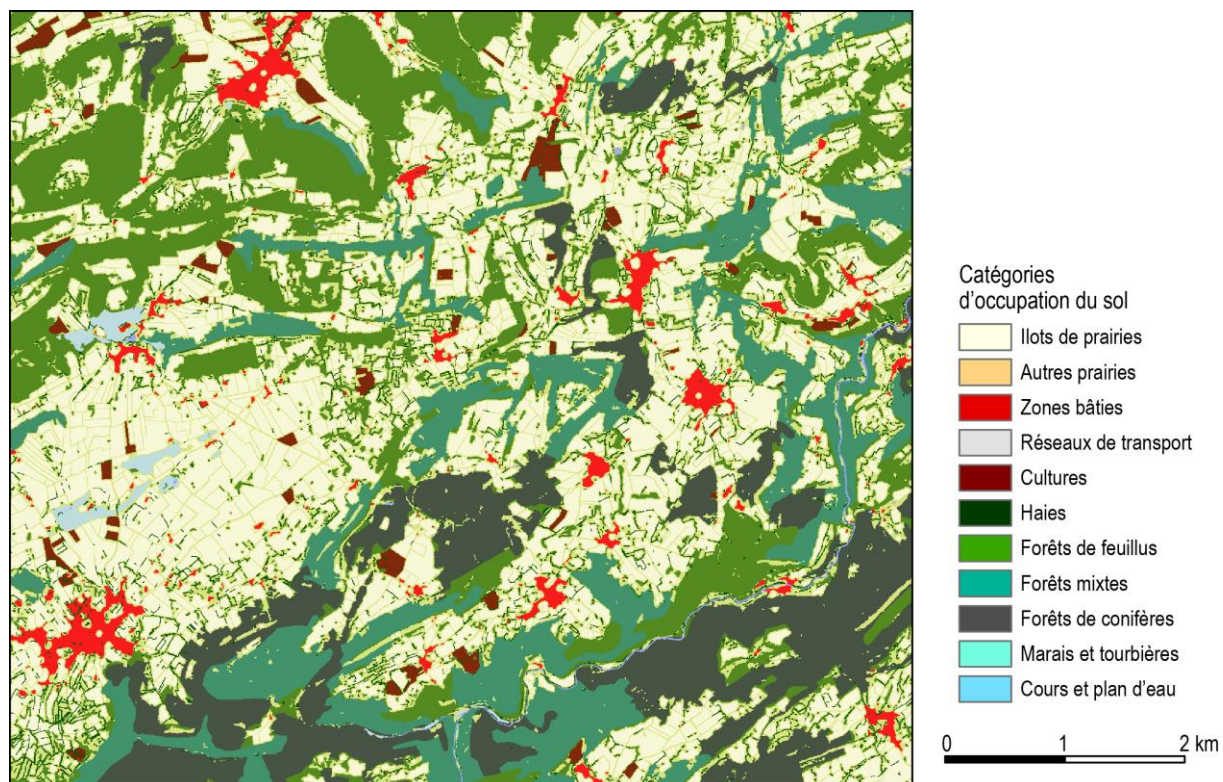


Figure 40. Carte d'occupation du sol de la zone de Belleherbe



Figure 41. Graphe des îlots de prairie dans la zone des Fourgs

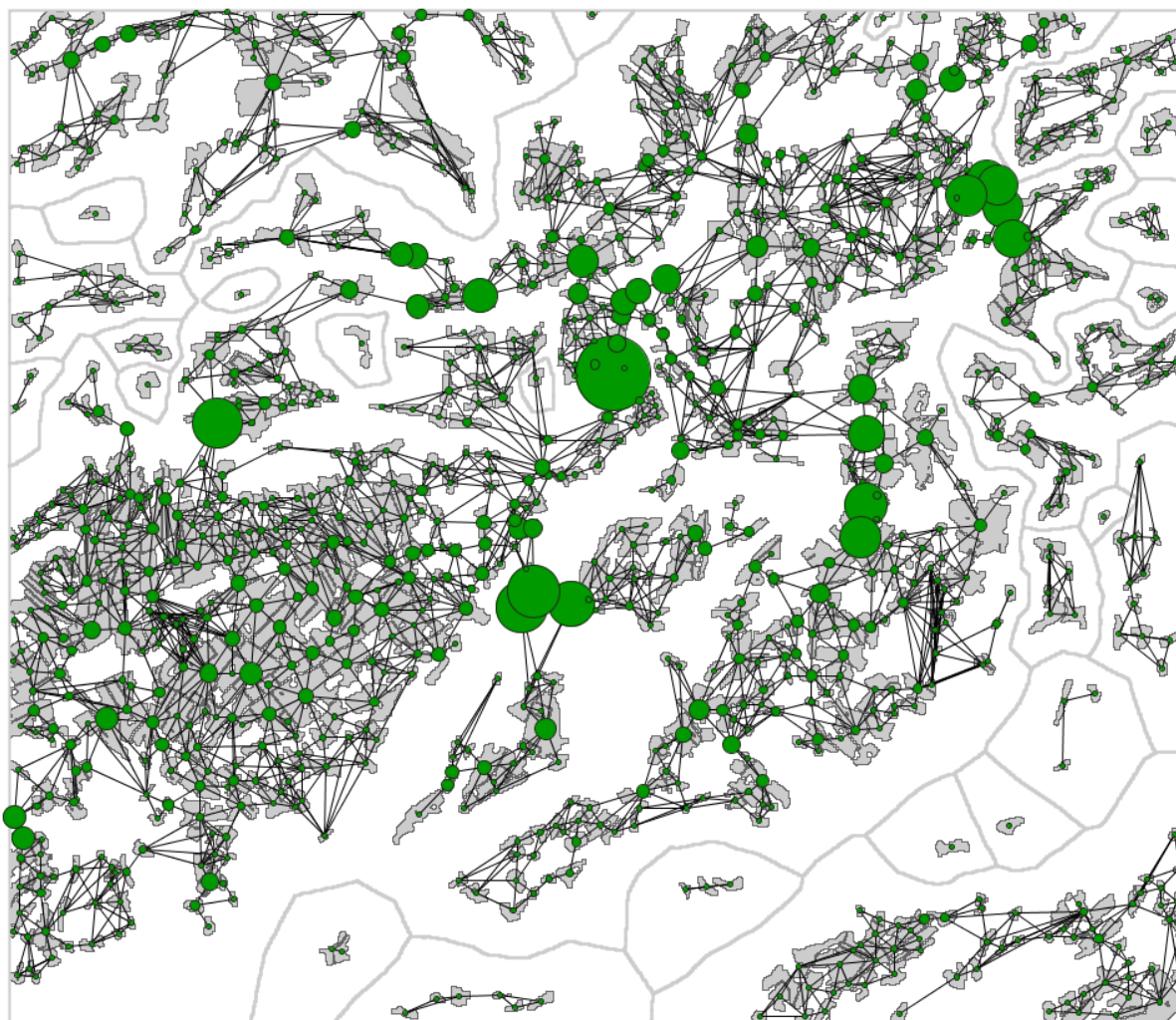


Figure 42. Graphe des îlots de prairie dans la zone de Belleherbe

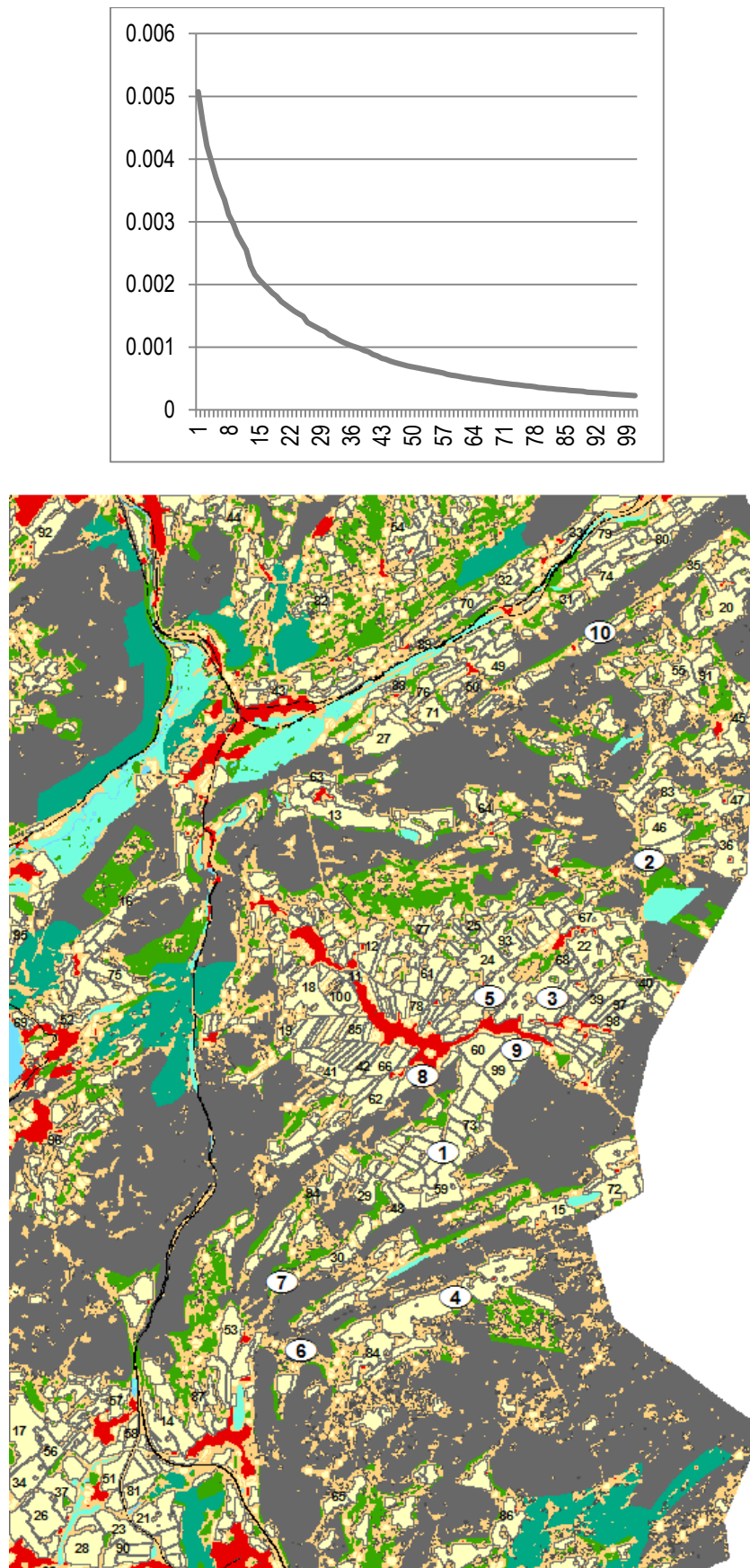


Figure 43. Diminution de la connectivité et localisation des îlots à déconnecter dans la zone des Fourgs

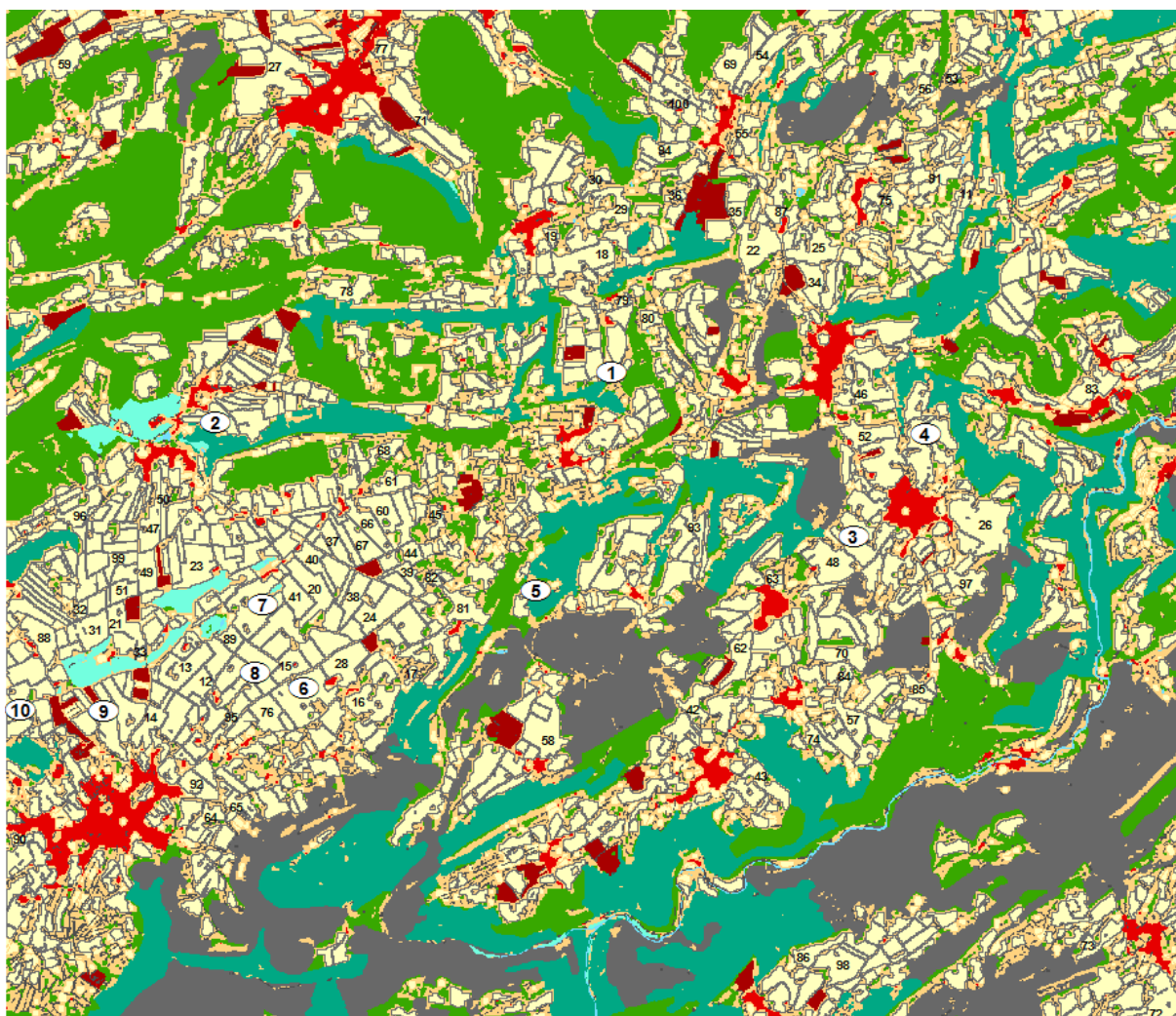
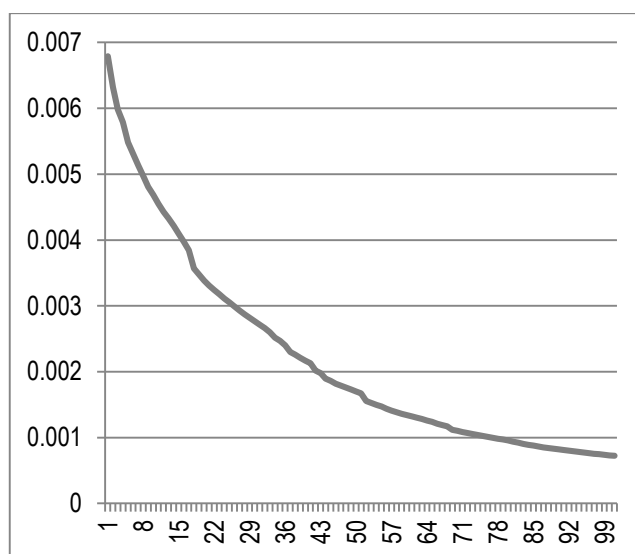


Figure 44. Diminution de la connectivité et localisation des îlots à déconnecter dans la zone de Belleherbe

Table des figures

Figure 1. Carte d'occupation du sol sur le terrain d'étude franc-comtois.	26
Figure 2. Carte d'occupation du sol de la région Auvergne.	27
Figure 3. Exemple d'un graphe réalisé sur le terrain franc-comtois.	30
Figure 4. Exemple d'un graphe réalisé sur un extrait de la zone étudiée en Franche-Comté.	31
Figure 5. Variations démographiques dans l'ensemble de la zone d'étude.	32
Figure 6. Carte d'occupation du sol du département du Puy-de-Dôme	35
Figure 7. Critères pour la segmentation du graphe des prairies en fonction du nombre de compartiments.	38
Figure 8. Segmentation « optimale » sur le terrain d'étude franc-comtois.	39
Figure 9. Segmentation sur un extrait du terrain d'étude franc-comtois.	40
Figure 10. Segmentation en 230 compartiments.	41
Figure 11. Plusieurs configurations spatiales pour une même distance de moindre coût.	45
Figure 12. Valeurs de dPC pour les 20 liens les plus importants du graphe, identification de 5 zones	46
Figure 13. Extraction de l'occupation du sol des 5 premières zones retenues	47
Figure 14. Zone 1 (site de Loray).	49
Figure 15. Zone 2 (site de La Longeville).	50
Figure 16. Méta-taches de prairies fondées sur des distances de résistance, délimitées par les tracés gris clair.	52
Figure 17. Décroissance de l'indice PC en fonction de la déconnexion progressive des liens.	53
Figure 18. Localisation des deux méta-taches reliées par le premier lien-clé.	54
Figure 19. Distribution du courant issue de la théorie des circuits pour étudier le premier lien-clé.	56
Figure 20. Détail de la zone 1A.	57
Figure 21. Détail des zones 1B et 1C.	58
Figure 22. Ilots RPG sur les zones 1A (orange), 1B (rouge) et 1C (marron).	58
Figure 23. Graphe du réseau de prairie à l'échelle du département du Puy-de-Dôme.	60
Figure 24. Taches de prairie et chemins de moindres coûts modélisés sur la commune de Briffons.	62
Figure 25. Graphe paysager sur la commune de Briffons.	62
Figure 26. Taches de prairie et chemins de moindres coûts modélisés sur la commune de Siaugues.	63
Figure 27. Graphe paysager sur la commune de Siaugues.	63
Figure 28. Variation de la métrique PC en fonction du retrait de chaque îlot de prairie identifié par la modélisation du scénario 1.	64
Figure 29. Variation de la métrique PC en fonction du retrait de chaque îlot de prairie identifiés par la modélisation du scénario 2.	64
Figure 30. Briffons, scénario 1 sur un graphe planaire (a) et sur un graphe complet (b)	65
Figure 31. Siaugues, scénario 1 sur un graphe planaire (a) et sur un graphe complet (b)	66
Figure 32. Briffons, scénario 2 sur un graphe complet.	67
Figure 33. Siaugues, scénario 2 sur un graphe complet.	68
Figure 34. Les trois zones du projet GIEE	69
Figure 35. Carte d'occupation du sol de la zone d'Indevillers	70
Figure 36. Graphe des îlots de prairie dans la zone d'Indevillers.	71
Figure 37. Hiérarchie des îlots de prairies selon le scénario directif dans la zone d'Indevillers	73
Figure 38. Diminution de la connectivité selon le scénario directif dans les trois zones du Doubs	74
Figure 39. Carte d'occupation du sol de la zone des Fourgs	78
Figure 40. Carte d'occupation du sol de la zone de Belleherbe	79
Figure 41. Graphe des îlots de prairie dans la zone des Fourgs	80
Figure 42. Graphe des îlots de prairie dans la zone de Belleherbe	81
Figure 43. Diminution de la connectivité et localisation des îlots à déconnecter dans la zone des Fourgs	82
Figure 44. Diminution de la connectivité et localisation des îlots à déconnecter dans la zone de Belleherbe	83