

Peut-on imaginer une forme urbaine et des règles d'urbanisme qui permettent un développement résidentiel plus respectueux de l'environnement notamment en termes de connectivité du paysage ? Cet article teste sur la périphérie de Besançon deux formes urbaines et deux règles d'urbanisme (construire au plus proche d'une zone déjà construite et d'un espace naturel ; construire au plus proche des routes existantes), différents taux d'urbanisation et teste les paysages simulés à différentes échelles de dispersion d'animaux.

Analyse de l'article « Assessing the capacity of different urban forms to preserve the connectivity of ecological habitats »

Cécile TANNIER, Jean-Christophe FOLTETE et Xavier GIRARDET

Landscape and Urban Planning, 2012, 105 : 128-139

Lien : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204611003598>

Intérêt de cet article pour la Trame Verte et Bleue :

Si l'impact des infrastructures sur la connectivité écologique fait l'objet de nombreuses publications et programmes de recherche dédiés, ce n'est pas du tout le cas de l'urbanisation qui est pourtant une cause majeure de perte d'habitat et de fragmentation.

Les études sur la trame urbaine étudient souvent l'existant sans prendre en compte les perspectives d'urbanisation nouvelle. Cet article, via la modélisation de formes urbaines (par application de différents scénarios), évalue leur impact sur la connectivité forestière pour un certain nombre d'espèces virtuelles à capacité de dispersion variable. Sa méthode pourrait être reproduite pour d'autres études en périphérie des villes et prenant en compte les limites identifiées par les auteurs.

Synthèse de l'article :

Gérer l'extension urbaine est un enjeu majeur de la préservation de l'environnement en raison de ses effets environnementaux négatifs (pollution de l'air, bruit, destruction de ressources naturelles) et socio-économiques (coût de logement et de trajet induisant une ségrégation sociale et une inéquité sociale). Le développement urbain étant une nécessité devant l'augmentation de la population, essayer de mieux gérer la consommation d'espaces est indispensable. Il faut de plus noter que toute surface consommée directement pour les constructions de logement est complétée par des surfaces d'infrastructures routières associées qu'elle engendre. En Europe, 25 % de la zone urbaine est utilisée pour des routes (30% aux USA).

La dispersion de l'urbanisation a pour effet de réduire les milieux naturels par consommation d'espace et de les fragmenter en taches séparées. C'est pourquoi la connectivité du paysage combinée à des données sur la taille et la qualité des taches d'habitat naturel sont des notions clé pour la préservation des espèces.

La connectivité fonctionnelle, c'est-à-dire l'interaction entre une espèce et les éléments du paysage, utilise des mesures (métriques) du paysage et des modèles de simulation spatiale.

Peu d'études ont analysé la relation entre fragmentation de l'habitat et patrons de formes urbaines, ce qui explique en partie le manque de connaissance des relations entre formes urbaines et systèmes écologiques. Ainsi, nous ne savons pas comment les formes urbaines concentrées ou dispersées, à un seul ou plusieurs centres influence les systèmes écologiques selon un gradient de densité entre le centre urbain et la périphérie. La plupart des études considèrent en effet le système urbanisé que du point de vue de sa densité sans prendre en compte les structures urbaines. Ces études aboutissent généralement à des résultats non significatifs ou fondés uniquement sur une approche statistique qui ne permet pas de évidence des relations claires entre formes urbaines et système écologique.

Cette étude veut mieux comprendre comment les différents patrons de développement résidentiel peuvent affecter la forme des habitats d'espèces animales et donc affecter leur connectivité.

Les patrons urbains sont soit des patrons compacts caractérisés par une haute densité de bâti et des limites abruptes et des patrons fractals qui ne sont pas uniformes en fonction de l'échelle et présente des limites plus longues et sinueuses. En planification urbaine, la forme compacte est souvent la réponse aux questions de dispersion urbaine mais il engendre des congestions routières, des accès réduits aux espaces verts et naturels, un prix élevé des maisons et un espace de vie réduit. Le modèle alternatif



combinant une densification raisonnable et une organisation urbaine polycentrique peut être réalisé par une distribution fractale qui assure l'accès à des espaces construits et non construits.

Pour identifier les formes urbaines qui préservent le mieux la connectivité des habitats naturels, cette étude est basée sur une méthode en deux étapes :

- Création de 40 scénarios théoriques de développement résidentiel en utilisant des procédures reproductibles prenant en compte des modèles fractals et non fractals
- Comparaison de ces scénarios du point de vue de leur connectivité fonctionnelle (théorie des graphes¹)

Matériels et méthodes :

- Zone d'étude et données

La périphérie de Besançon est la zone d'étude pour se baser sur l'urbanisation et le réseau routier actuel. Cette zone de 116 827 ha est peuplée de 234 000 habitants et en dehors du cœur de ville, peu densément urbanisé mais avec une pression d'urbanisation croissante notamment sur la forêt qui est majoritaire dans le paysage.

La forêt est l'habitat d'un certain nombre d'espèces parmi lesquelles ont été retenues les espèces cibles suivantes :

- L'écureuil roux à distance de dispersion maximale 1,5 km
- La barbastelle d'Europe (chauve-souris) à distance de dispersion maximale 10 km
- Le lynx à distance de dispersion maximale 40 km
- La genette commune à distance de dispersion maximale 90 km.

Ces espèces utilisent préférentiellement les éléments forestiers du paysage et ont des difficultés à se déplacer dans des milieux non boisés. Elles sont donc menacées par l'extension de l'urbanisation.

Les données de couverture du sol sont issues de la BD Topo de l'IGN de 2009 qui inclue les forêts, les constructions et le réseau routiers. En effet, en raison des exigences écologiques des espèces retenues, seules les zones boisées et urbanisées sont prises en compte. Toutes les autres occupations du sol sont considérées dans un même type. La carte des forêts est obtenue en rastérisation la couche forêt de la BD topo avec une résolution de 20 m (0,04 ha par cellule).

- Création des scénarios de développement résidentiel

40 scénarios sont produits² en partant de l'urbanisation existante (réseau routier et localisation du bâti). La création de nouvelles implantations résidentielle est simulée mais pas celle des routes qui souvent accompagnent les urbanisations nouvelles. Le logiciel produit une carte raster avec 3 types de cellules : des cellules initialement bâties, des cellules nouvellement bâties, des cellules non bâties (occupation du sol naturelle ou artificielle).

Les scénarios peuvent suivre (ou non) 2 règles :

- Règle 1 : chaque nouvelle cellule construite doit être à la fois localisée à proximité d'une cellule non bâtie et d'une cellule construite ; de plus, la cellule nouvellement bâtie ne doit pas entraver l'accès aux espaces ouverts pour les cellules voisines de bâti. Cette règle de planification permet de satisfaire les préférences des ménages pour un environnement rural. Elle réduit aussi les déplacements automobiles pour accéder aux espaces naturels et limite la fragmentation du paysage.
- Règle 2 : une cellule résidentielle nouvelle doit être le plus proche possible d'une route existante afin de limiter la consommation d'espace par la construction de nouvelles routes.

Pour les différents scénarios, chacune de ces règles est appliquée (seule ou les deux ensembles).

- Les scénarios de développement fractal³ :

Les règles sont appliquées dans une série d'échelles emboîtées afin de décrire plus finement le bâti actuel. Ainsi, par exemple, si au départ on a une grille contenant 9 cellules (carré de 3 x 3) on identifie un nombre de cellules bâties. Le niveau 2 de l'analyse fractale est de découper chacune de ces 9 cellules en 9 cellules. Si la cellule d'origine était non bâtie, les 9 cellules « filles » sont forcément non bâties. Si la cellule d'origine était bâtie, parmi les 9 cellules selon la répartition spatiale des immeubles, un nombre variable de cellules « filles » sont bâties. Ces étapes sont poursuivies jusqu'à ce que la taille des cellules soit de 20 m de côté

¹ Pour une présentation détaillée de la théorie des graphes voir sur le site www.tramevertetbleue.fr, la synthèse des articles sur la modélisation : <http://www.tramevertetbleue.fr/documentation/cote-recherche/analyses-articles/modelisation-cartographie>

² en utilisant le logiciel MUP-City

³ Du point de vue fractal, chaque découpage présente une dimension d'auto-similarité (D) avec les autres échelles : D est contrôlé par deux paramètres : r le facteur de réduction et N(r) le nombre d'éléments.

(un immeuble). En appliquant la règle fractale de l'urbanisation, on connaît le nombre de cellules dans chaque grille qui peuvent être potentiellement urbanisées. Les deux règles d'urbanisation sont utilisées pour définir quelles cellules sont urbanisées parmi celles possibles. La modélisation multi-échelle mise en place implique que ceci soit appliqué à chaque niveau d'analyse.

15 scénarios fractals ont été simulés pour lesquels le nombre de cellules maximales varie de 3 à 7 (correspondant à une dimension fractale variant de 1 à 1,8).

Les scénarios qui prennent en compte la règle 1 génèrent des patrons d'urbanisation plus compacts alors que ceux qui prennent en compte la règle 2 génèrent des patrons d'urbanisation à forme allongée.

- Les scénarios de développement non fractal⁴ :

Dans ce cas, les règles d'urbanisation sont appliquées à une seule échelle correspondant à des cellules de 20 m x 20 m. Pour chaque scénario, le nombre de cellules à urbaniser correspondant à l'un des 15 scénarios fractals. Ces scénarios non fractals produisent des patrons d'urbanisme combinant une densité modérée et un développement linéaire. La densité modérée est caractérisée par des cellules non bâties au cœur des îlots bâtis cependant ces espaces ouverts sont en faible nombre et de plus petite taille que ceux préservés dans le modèle fractal. Dans le cas de l'application de la règle numéro 1, les extensions linéaires sont en ligne droite ou le long des routes dans le cas de l'application de la règle numéro 2. Des patrons réels de ce type existent en Belgique ou en Italie.

- Les scénarios neutres de développement :

Les scénarios de paysage neutre sont créés à partir du patron initial d'occupation de l'espace.

5 scénarios neutres non fractals et sans application des règles d'urbanisation sont produits en localisant au hasard des cellules construites. Ils produisent des patrons d'urbanisme totalement dispersés.

5 scénarios neutres fractals et sans application des règles d'urbanisation sont produits en fixant par une fonction aléatoire les cellules construites dans les grilles. Ils produisent des patrons plus dispersés que les scénarios fractals avec application des règles d'urbanisme.

Evaluation des changements dans la connectivité des habitats :

Il s'agit tout d'abord de créer une carte du paysage en partant de la carte rasterisée du couvert forestier. Les taches forestières sont définies par une analyse morphologique⁵ en considérant qu'une cellule est un habitat de cœur de forêt si elle est entourée au moins de 40 m d'autres cellules forestières.

L'analyse morphologique utilisée identifie 7 classes d'éléments du paysage : les secteurs cœurs, les îles, les ponts, les boucles, les branches, les lisières et les perforations. Dans le cas de l'étude, l'objectif est d'interpréter le paysage en termes de connectivité. C'est pourquoi les surfaces de forêt sont réparties en seulement deux classes :

- les taches de forêt résultant de l'agglomération des classes morphologiques cœurs, perforations et lisières
- les surfaces forestières favorables aux déplacements des animaux résultant de l'agglomération du reste des classes morphologiques.

Les taches de moins de 1 ha (contenant une seule cellule cœur entourée de cellules lisières) sont re-classifiées en surfaces forestières favorables aux déplacements des animaux. Ce choix de 1 ha est plus faible que beaucoup d'autres études de ce type (qui vont de 5 ha à 25 ha) car cette surface a paru cohérente avec la finesse choisie des patrons d'urbanisation.

Dans une seconde étape, la carte des habitats forestiers est superposée aux différentes cartes résultant des scénarios d'urbanisation. Il en résulte des cartes incluant les patrons d'urbanisation et les patrons forestiers restants. Cette étape respecte les règles suivantes : les cartes sont de grain et d'extension⁶ identiques, les cartes sont suffisamment larges pour minimiser les effets de bordure et les comparaisons tiennent compte des proportions variables d'habitat dans le paysage.

Chaque paysage produit est analysé selon la théorie des graphes où les taches d'habitats forestiers sont définies comme les nœuds du graphe. Les distances de moindre coût de bordure à bordure sont calculées pour chaque paire de taches pour produire un graphe complet. Les distances sont calculées avec les valeurs de résistance suivantes :

Tache d'habitat forestier : 1

⁴ Du point de vue fractal, chaque découpage présente une dimension d'auto-similarité (D) avec les autres échelles : D est contrôlé par deux paramètres : r le facteur de réduction et N(r) le nombre d'éléments.

⁵ MSPA (morphological spatial pattern analysis) disponible via le logiciel GUIDOS (<http://forest.jrc.ec.europa.eu/biodiversity/GUIDOS/>).

⁶ Le grain fait référence à la taille de chaque cellule élémentaire et l'extension à la surface de territoire couverte par la carte.

Surface forestière favorable au mouvement des animaux : 1
Surface construite : 10
Reste de l'occupation du sol : 5

Les scénarios de paysage sont comparés uniquement du point de vue de la connectivité globale. Le choix a été fait parmi toutes les métriques directes disponibles de retenir l'index de probabilité de connectivité PC défini par Saura et Pascual-Hortal⁷. Cet index mesure la probabilité qu'un animal puisse atteindre des taches de même habitat connectées lors de son déplacement. Ces index pour les différentes cartes sont alors comparés avec celui du paysage de départ afin de mesurer la perte de connectivité induite par chaque scénario.

Résultats :

5 séries de 8 cartes synthétiques sont obtenues présentant la même proportion de paysage couvert par l'habitat forestier.

Le paysage initial comprend 5 % de surface construite, pour un pourcentage de forêt de 43 %.

Les scénarios produisent des taux de surface construites finales (bâti initial plus bâti simulé) égaux à 7%, 9%, 14%, 22% et 37% correspondant à des taux de forêt respectivement de 42%, 41%, 40%, 36% et 30%. Le taux de boisement reste donc élevé (30%) même dans le scénario d'urbanisation le plus fort.

Les scénarios sont analysés pour chacun des 5 couples % d'urbanisation-% de forêt afin de caractériser uniquement les différences dues à la variation de forme des patrons forestiers (à surface identique) lié en fait à la variation de forme des patrons d'urbanisation modélisés.

Le développement résidentiel affecte à la fois la moyenne et le maximum de taille des habitats forestiers. Ces deux index diminuent quand le taux d'urbanisation augmente. Le nombre de taches augmente continuellement dans les scénarios fractals en fonction de l'augmentation du bâti alors que pour les scénarios non fractals, le nombre de taches forestières décroît au-delà d'une occupation par le bâti de 22%. Le nombre de taches est même inférieur à celui du paysage d'origine pour le bâti représentant 37% et l'application de la règle 1 sur un scénario non fractal. Dans ce cas, la taille moyenne des taches d'habitat passe de 57,3 ha à 47,1 ha et la taille maximale de 2742 ha à 1109 ha.

Les patrons de forêt résiduelle selon les scénarios d'urbanisation diffèrent fortement selon les scénarios fractals et non fractals.

Dans les scénarios fractals, l'augmentation du nombre de taches forestières est proportionnelle à l'intensité d'urbanisation ce qui n'est pas le cas pour les scénarios non fractal.

Le pourcentage des surfaces forestières favorables aux déplacements des animaux augmente en conséquence de la croissance de l'urbanisation dans les scénarios fractals alors qu'il n'augmente pas voire souvent diminue pour les scénarios non fractals.

Le pourcentage d'habitat forestier diminue rapidement dans les scénarios fractals alors qu'il ne décroît seulement quand les surfaces bâties atteignent 14% dans les scénarios non fractals.

Les deux règles d'urbanisation ont une influence plus forte sur la forme du patron de forêt résiduelle dans les scénarios non fractals que dans les scénarios fractals.

En ce qui concerne les scénarios neutres (aucune règle d'urbanisme n'est appliquée), la différence entre les scénarios neutres fractals et les autres scénarios fractals est plus faible qu'entre les scénarios neutres non fractals et les autres scénarios non fractals. Les scénarios neutres non fractals produisent un développement résidentiel plein de trous où les taches de forêt résiduelles sont de très petite taille voire même disparaissent totalement pour le taux d'urbanisation de 37%.

Un scénario est considéré le meilleur pour la connectivité quand il est le plus proche de la situation initiale.

Quand la surface urbanisée représente 14 % de la zone d'étude, le scénario fractal appliquant la règle 2 produit la valeur maximale de taille de tache (2393 ha alors que la situation initiale présente une valeur de 2742 ha). Le scénario fractal appliquant les deux règles d'urbanisme présente lui le plus petit nombre de taches (837 pour une situation initiale de 700).

Quand la surface urbanisée représente 9 % de la zone d'étude, le scénario fractal appliquant la règle 2 produit la valeur la plus grande de taille moyenne de tache (51,6 ha alors que la situation initiale présente une valeur de 57,3 ha).

3 cartes représentent : la répartition initiale de l'urbanisation et de la forêt, le paysage simulé conduisant à

⁷ Saura S. et 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.

14% d'urbanisation avec le scénario fractal et l'application des deux règles d'urbanisme et le paysage simulé conduisant à 14% d'urbanisation avec le scénario non fractal et l'application également des deux règles d'urbanisme.

Le développement résidentiel fractal crée de nouvelles cellules de matrice (c'est-à-dire ni urbanisées ni forestières) entourées par des zones forestières favorables au déplacement des animaux.

Le développement résidentiel non fractal crée des cellules de matrice disposées en ruban où les cellules bâties se concentrent le long des routes. Ces rubans de cellules de matrice ne sont pas à proximité de zones forestières favorables au déplacement des animaux.

Une différence très nette est observée dans les paysages simulés obtenus de manière fractale et non fractale : une coupure nette entre les zones bâties et non bâties caractérise les formes urbaines non fractales alors qu'une limite floue entre ces occupations du sol caractérisée notamment par la présence de zones forestières favorables au déplacement des animaux à proximité des zones urbanisées correspond au modèle d'urbanisation fractal.

Le graphe complet pour chacun des 40 paysages produits présente au maximum 2361 nœuds et environ 2,8 millions de liens. La racine carrée de l'index de connectivité PC est calculée pour chaque série de scénarios et en fonction de la capacité de dispersion des animaux. Pour chaque taux d'occupation du sol bâtie, 8 courbes sont produites (pour chacun des scénarios).

La comparaison de ces valeurs montre que la connectivité forestière décroît quand le nombre de cellules bâties augmente et cette diminution varie selon les scénarios. En général, l'index PC diminue plus rapidement que le pourcentage de forêt. Ceci révèle une influence nette de la forme du développement résidentiel sur la connectivité de l'habitat forestier.

Les différences de valeur la racine carrée de l'index PC sont faibles entre les scénarios fractals et non fractals pour les taux d'urbanisation faibles (jusqu'à 9%).

Pour les scénarios non fractals la connectivité est meilleure quand la règle 2 est appliquée (seule ou avec la règle 1) que quand elle n'est pas appliquée. A l'inverse, la connectivité est meilleure pour les scénarios fractals quand la règle 1 est appliquée (seule ou avec la règle 2) que quand elle n'est pas appliquée.

Les scénarios aléatoires, et particulièrement le non fractal, conduisent à une faible connectivité.

Pour le même taux d'urbanisation, le rang des scénarios selon leur connectivité peut varier selon la distance de dispersion considérée. Quand l'urbanisation est faible et des distances de dispersion courtes (moins de 1250 m pour un taux d'urbanisation de 9% ou moins de 2000 m pour un taux d'urbanisation de 14%) le scénario fractal a un meilleur indice de connectivité PC que le scénario non fractal. Cependant l'indice PC des scénarios non fractal augmente fortement pour des distances de dispersion supérieures et dépasse celui des scénarios fractals.

“Pour les taux d'urbanisation les plus forts (au-delà de 22%) les scénarios fractals ont toujours un indice de connectivité inférieur quelque soit la distance de dispersion que les scénarios non fractals.

Discussion :

L'article propose une méthode simple et reproductible nécessitant un nombre limité de données et de paramètres pour explorer les effets des formes urbaines sur la connectivité :

- créer des scénarios de développement résidentiel en utilisant le logiciel MUP-City,
- utiliser la MSPA (analyse morphologique du patron spatial) pour identifier les taches d'habitat,
- calculer des indices spatiaux de la fragmentation des habitats,
- calculer l'indice PC pour mesurer la connectivité globale des habitats.

Les effets de deux modèles urbains, des deux règles d'urbanisation ont été étudiés systématiquement pour un gradient de taux d'urbanisation et sur quelques aspects structurels et fonctionnels de l'habitat écologique. Les scénarios de développement résidentiel simulés sont plus ou moins compacts et linéaires ainsi que fractals ou non fractals. Les 40 scénarios testés permettent d'analyser un déclin progressif des disponibilités en habitat écologique dans le paysage. Les paysages produits ne sont bien sûr pas réalistes car ils ne prennent pas en compte un certain nombre de contraintes environnementales (pente, type de sol...), de règlements d'urbanisme et de comportements des accédants à la propriété. Ils permettent cependant de tester les impacts de variables déterminant la forme urbaine sur les habitats naturels environnants toute chose étant égale par ailleurs.

Les résultats rejoignent ceux d'autres études qui avaient montré que les changements dans la connectivité des habitats induits par l'urbanisation étaient relativement importants pour les patrons d'habitats forestiers présentant au départ un fort taux d'agrégation.

Choisir plusieurs valeurs de taux de déplacement des animaux permet d'évaluer un potentiel général de mobilité pour un gamme d'animaux dans un habitat générique (ici forestier).

Certaines études estimaient que certains aspects de la configuration urbaine pouvaient permettre d'augmenter la connectivité de certains paysages signifiant que des règles politiques d'urbanisme pouvaient avoir un rôle important dans le maintien ou la restauration de connectivités. L'étude montre que, en général, la connectivité des habitats semble mieux préservée par les scénarios non fractals de développement résidentiel. Ceci n'est pas vrai cependant pour les espèces à faible capacité de déplacement pour lesquelles les scénarios fractals sont plus favorables. Cette étude confirme donc que le lien entre forme urbaine et processus écologique est équivoque et qu'il est impossible d'identifier un seul seuil ou une seule règle de développement résidentiel qui permette de conserver la totalité des espèces vivant dans le paysage environnant. Différentes stratégies de planification doivent donc coexister pour augmenter la probabilité de persistance de différents groupes d'espèces.

L'urbanisation le long des routes combinée avec un urbanisation modérément compacte peut être une bonne voie pour préserver la connectivité des habitats et devrait être testée attentivement. Cependant les scénarios fractals en augmentant le nombre de zones forestières favorables au déplacement des animaux prennent mieux en compte les espèces à faibles capacités de déplacement.

L'effet fragmentant des routes est pris en compte à travers la diminution de la surface des taches d'habitat et l'isolement de celles-ci. L'effet du réseau routier est indirectement pris en compte avec la règle 2 qui favorise la construction à proximité des routes existantes. Cependant aucune valeur de résistance spécifique n'est affectée aux routes dans le calcul des distances de moindre coût entre taches. De plus les scénarios, ne prennent en compte que le réseau routier existant et ne génèrent pas les nouvelles routes nécessaires pour desservir les nouvelles zones résidentielles.

Beaucoup de variables autres que celles prises en compte dans cette recherche influencent la façon dont les routes affectent l'environnement notamment la largeur des routes, leur équipement (clôtures...) et leur trafic. Plusieurs études récentes considèrent que l'effet barrière des routes est spécifique pour chaque espèce.

L'analyse des paramètres choisis pour cette étude (largeur de l'effet bordure pour la définition de la classification MSPA) est comparée et justifiée par rapport à d'autres publications : la largeur de bordure retenue ici, 40 m, est inférieure aux valeurs retenues dans d'autres études (75 m) ce qui peut limiter sa généralisation. Il pourrait donc être utile de mener une étude de sensibilité multi-échelle pour identifier, avec l'aide d'experts naturalistes, les échelles spécifique pertinentes pour certaines espèces.

Pour cette étude il a été choisi d'agréger en deux types seulement les 7 classes habituellement produites par l'analyse morphologique. Cette classification induit des différences dans le calcul des distances de moindre coût, les valeurs de résistance ou les coûts assignés à chaque classe. Il peut donc être intéressant de regarder cette question de plus près car ces choix peuvent augmenter le degré d'erreur dans le modèle de graphe. Une solution serait de prendre en compte des chemins de moindre coût multiples.

Les scénarios de développement résidentiel sont comparés sur la base de l'indice de connectivité PC. Cet indice a été choisi en raison de ses capacités à inclure plusieurs aspects de la connectivité écologique (distance entre taches, distance de dispersion, surface des taches). Cette approche est cohérente avec le choix d'utiliser un graphe complet cependant elle ne permet qu'une approche globale de la connectivité et ne permet pas de calculer des aspects plus précis de la connectivité. Plusieurs approches complémentaires pourraient être développées :

- utiliser l'indice PC localement afin de pouvoir identifier spatialement où le développement résidentiel peut avoir un effet plus important sur la connectivité qu'ailleurs. ;
- séparer les différents effets de la connectivité, perte de surface des taches (PC intra), perte de potentiel de flux de dispersion (PC flux) ou perte de potentiel de liaison (PC connector).

Les scénarios fractals permettent une meilleure connectivité que ceux non fractals pour des distances de dispersion faibles, et le phénomène inverse se passe pour les distances de dispersion supérieures. Ceci veut dire que la forme urbaine fractale permet des mouvements locaux d'animaux mais ne permet pas de traverser tout le paysage. A l'opposé, le modèle en ruban le long de routes créé par les scénarios non fractals crée une séparation nette des secteurs forestiers. En outre, l'effet barrières des routes n'est pas pris en compte par l'indice global de connectivité, il pourrait l'être avec des métriques de connectivité à l'échelle des taches.

Conclusion :

Cet article montre que la diminution de la connectivité de l'habitat forestier est globalement semblable que le modèle de développement résidentiel soit fractal ou non pour taux d'urbanisation faibles. Dans ce cas, le

modèle fractal peut être aussi utile qu'une forme plus compacte d'urbanisation pour préserver la biodiversité. Avec un taux d'urbanisation plus élevé, les scénarios non fractals sont meilleurs sauf pour de courtes distances de déplacement.

La règle 2 (proximité des routes existantes) influe plus sur la connectivité des scénarios non fractals alors que la règle 1 (proximité des zones construites et ouvertes) influe plus sur la connectivité des scénarios fractals. L'intérêt pour la conservation de la biodiversité de chaque forme urbaine et de chaque règle de planification varie à la fois avec les capacités de dispersion de l'espèce et le taux d'urbanisation.

Ces résultats sont uniquement sur l'aspect global de la connectivité et doivent être complétés par une approche plus fine analysant notamment l'effet barrière des routes et distinguant les différents aspects de la connectivité du paysage (perte de surface d'habitat/perte de perméabilité du paysage).

Les facteurs humains de satisfaction sont pris en compte au travers de la proximité aux espaces ouverts et aux autres individus. Le résultat suggère qu'il n'y a pas une solution optimale pour le paysage et la planification urbaine. Le choix d'une solution (ici une forme développement résidentiel associée à 1 ou 2 règles d'urbanisme) doit nécessairement résulter d'un compromis. La difficulté à arriver à un compromis augmentant avec le nombre d'espèces à prendre en compte (animales mais aussi végétales) et une diversité plus grande de besoins humains.

Commentaire :

Bien que les résultats varient à la fois selon le taux d'urbanisation et les capacités de déplacement des espèces cibles et la nécessité de compromis, ils alertent sur l'importance que peuvent avoir des choix de règles d'urbanisme sur la connectivité du paysage périurbain. Cette analyse mériterait d'être faite au moment des orientations des SCoT pour étudier les effets théoriques des scénarios qui peuvent être proposés.