

Sciences Eaux & Territoires

La revue d'Irstea

Article hors-série numéro 26

Comment concevoir des continuités écologiques en milieu urbain ?

Eugénie SCHWOERTZIG, Adine HÉCTOR, Stéphanie KAEMPF,
Michèle TRÉMOLIÈRES et Suzanne BROLLY



www.set-revue.fr

Sciences Eaux & Territoires La revue d'Irstea

Recherche avancée

Accueil

Actualité

L'ingénierie écologique au service de l'aménagement du territoire

Le 16 mai 2016

L'ingénierie écologique est une thématique historique dans la revue Sciences Eaux & Territoires. Régulièrement nous présentons les avancées de la recherche et des retours d'expériences en la matière. Cette thématique, très populaire en termes de téléchargement sur notre site internet www.set-revue.fr car...

• Voir le sommaire

Autres mails

Pour le tenir informé des nouveaux articles parus dès leur mise en ligne...

Questionnaire

03/08/2015

Abonnez à l'alerte mail, toutes régulières ou occasionnelles de la revue...

avis

Votre avis nous intéresse

Lire la suite

SET sur Twitter

Les nos derniers tweets

Focus

Article hors-série - 26 août 2016

Végétalisation durable des parcs à oiseaux (ou rivières) de la région Nord-Est du Québec et du Labrador - 01/06/16

Sciences Eaux & Territoires, la revue d'Irstea

Article hors-série numéro 26 – 2016

Directeur de la publication : Jean-Marc Bournigal

Directeur éditorial : Nicolas de Menthère

Comité éditorial : Daniel Arnault, Louis-Joseph Brossollet, Denis Cassard, Camille Cédra, Thomas Curt, Alain Dutartre, André Évette, Véronique Gouy, Alain Hénaout, Bruno Héroult, Ghislain Huyghe, Emmanuelle Jannès-Ober, Cédric Laize, Jean-Michel Laya, André Le Bozec, Alette Maillard, Thierry Mougey, Christel Prudhomme, Christian Romaneix pour le CINOV TEN et Michel Vallance.

Rédactrice en chef : Caroline Martin

Secrétariat de rédaction et mise en page : Valérie Pagneux

Infographie : Françoise Peyriguer

Conception de la maquette : CBat

Contact édition et administration : Irstea-DP2VIST

1 rue Pierre-Gilles de Gennes – CS 10030

92761 Antony Cedex

Tél. : 01 40 96 61 21 – Fax : 01 40 96 61 64

E-mail : set-revue@irstea.fr

Numéro paritaire : 0511 B 07860 – Dépôt légal : à parution – N°ISSN : 2109-3016

Photo de couverture : © Philippe Ludwig



Comment concevoir des continuités écologiques en milieu urbain ?

Les espaces de nature en ville sont porteurs de l'amélioration de la qualité de vie en milieu urbain. En 2014, la ville de Strasbourg a initié un projet d'identification et de construction d'un tissu naturel urbain mettant en connexion les espaces de nature existants à l'aide de graphes paysagers fondés sur le cheminement d'un animal. À travers la présentation de cette démarche originale, cet article nous démontre comment la modélisation de réseaux écologiques s'avère être un outil de diagnostic efficace pour comprendre les enjeux de la connectivité ainsi qu'un outil de prospective pour orienter sur le long terme les politiques d'aménagement du territoire.

La nature ne connaît pas de frontières administratives. Pourtant, la ville la fragilise progressivement en isolant des espaces de nature comme les jardins ou les parcs publics et en exportant toujours plus loin ses effets néfastes à travers un étalement urbain constant et un développement des infrastructures croissant. Pour maintenir de la nature en ville, celle-ci est actuellement repensée comme un « système ouvert » qui s'appuie sur les milieux naturels préservés (forestiers, prairiaux ou humides) et les milieux cultivés qui l'entourent. L'échange possible entre les espaces de nature et les milieux artificialisés urbains doit pouvoir à la fois revaloriser la valeur intrinsèque de la nature et offrir un meilleur cadre de vie aux habitants en donnant à tous l'accès à la nature et en garantissant la qualité des services écosystémiques. Dans la mesure où ces valeurs sont complémentaires, il paraît indispensable de les articuler à toutes les échelles de la ville, du local jusqu'à l'ensemble du territoire et dans tous les contextes urbains.

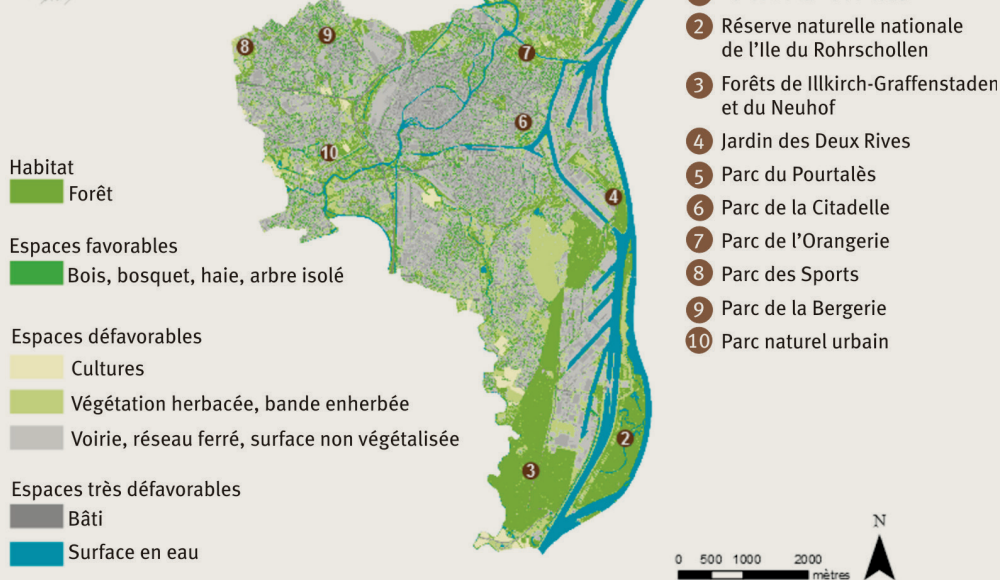
Une trame verte et bleue assurant la préservation des continuités d'habitats naturels a été identifiée récemment à l'échelle de l'Eurométropole de Strasbourg qui rassemble vingt-huit communes. Afin de tisser plus finement son réseau écologique, la ville de Strasbourg a initié en 2014 un projet pilote intitulé « Tissu naturel urbain » (TNU) intégrant l'ensemble des éléments de nature de son territoire. L'objectif du TNU, à travers

l'augmentation en quantité et en qualité des espaces de nature en ville, est d'améliorer la fonctionnalité écologique de l'espace en identifiant les taches d'habitat et les corridors importants pour la connectivité paysagère. Ce projet se base sur la conception de graphes paysagers qui mettent en relation la configuration spatiale et la connectivité du paysage pour une espèce animale donnée. L'objectif de cet article est de présenter une démarche originale pour identifier les liens les plus favorables, évaluer l'importance de certaines taches d'habitat et décrire une connectivité potentielle à l'échelle de la ville de Strasbourg.

Organiser en réseau l'ensemble des espaces de nature en ville

La conception du TNU repose sur plusieurs étapes qui permettent de modéliser une connectivité de l'ensemble des éléments de nature à l'aide de graphes paysagers. Le protocole s'appuie sur le choix d'une espèce animale dont les préférences écologiques et le comportement de déplacement sont connus. L'espèce « modèle » retenue est le résultat d'une réflexion concertée entreprise par la ville de Strasbourg avec des spécialistes naturalistes de l'Office des données naturalistes d'Alsace (ODONAT) et du Groupe d'étude et de protection des mammifères d'Alsace (GEPMA). Les graphes paysagers ont été réalisés à l'aide du logiciel Graphab v1.1 (Foltête *et al.*, 2012) développé par le laboratoire ThéMA.

❶ Catégorisation des espaces en fonction de leur caractère plus ou moins inhospitalier pour l'Écureuil roux et localisation des principaux espaces de nature de la ville de Strasbourg.



L'Écureuil roux comme espèce modèle

La connectivité du paysage a été déterminée sur la base de la définition de l'habitat optimal de l'Écureuil roux (*Sciurus vulgaris*), de ses préférences de déplacement et de sa mobilité en ville (Avon *et al.*, 2014). L'Écureuil roux est rongeur arboricole de la famille des Sciuridés dont la présence est certaine en France métropolitaine. Il est présent partout où il y a des arbres en quantité suffisante (forêts, bosquets, parcs, bocages) et il n'est pas rare de l'observer en ville. L'Écureuil roux fréquente essentiellement la frondaison des arbres et n'est généralement présent au sol que pour la recherche de nourriture. C'est un excellent grimpeur, capable de grands bonds pour passer d'un arbre à l'autre. Sa dispersion, qui peut atteindre 3 à 4 km par jour en moyenne, est essentiellement liée à la distribution des ressources mais également, pour les mâles, à la répartition des femelles. À Strasbourg, territoire urbanisé de 78,26 km², l'Écureuil roux bénéficie d'environ 432 ha d'espaces de nature. Cette surface représente l'ensemble des espaces végétalisés dont les forêts, les ripisylves, les espaces verts, les cimetières, les jardins familiaux et les jardins privés.

Les préférences écologiques de l'Écureuil roux ont été mises en relation avec une base de données d'occupation du sol acquise en 2012 par l'Eurométropole de Strasbourg. L'élaboration de cette base de données a été confiée au SERTIT (Service régional de traitement d'image et de télédétection), plateforme technologique et de services en lien permanent entre la recherche spatiale, les technologies numériques et les besoins opérationnels, fournissant des supports d'aide à la décision

exploitables par ses partenaires comme l'Eurométropole. Sa réalisation résulte d'une compilation de données d'origine variée (images satellites Pléiades prises à trois dates différentes, orthophotoplan, BD Ortho®, BD Alti®, BD Topo®, RPG®) géométriquement et radiométriquement harmonisées pour aboutir à la description des éléments du paysage avec une résolution spatiale de 60 cm. Cette base comporte quinze classes paysagères : les surfaces en eau, le bâti, la voirie, le réseau ferré, les surfaces non végétalisés, les cultures d'hiver, les cultures de printemps, les forêts, les bois, les bosquets, les haies, les arbres isolés, la végétation herbacée, les toitures végétalisées et les bandes enherbées (figure ❶).

Élaboration des graphes paysagers

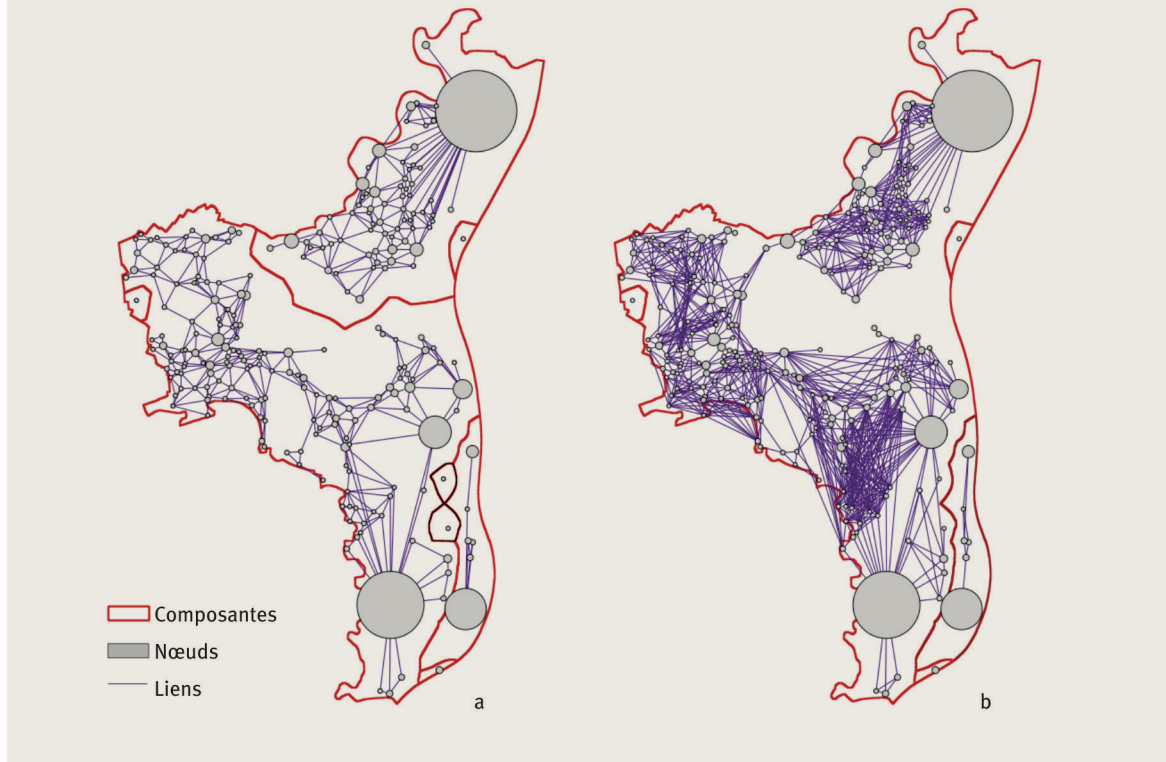
Identification de l'habitat optimal

Dans un graphe paysager, les nœuds représentent les taches d'habitat préférentiel. Dans cette étude, la surface minimale de l'habitat préférentiel de l'Écureuil roux, tel qu'il a été défini pendant l'étape de cartographie, a été fixée à 0,5 ha. Cette surface résulte de la traduction des préférences de l'espèce sous forme d'entités spatiales à partir de la carte paysagère ; ici, la forêt correspond à une entité spatiale d'au moins 0,5 ha. Au total, 250 taches d'habitat forestier ont été recensées sur le territoire strasbourgeois.

Définition des préférences paysagères et de la capacité de dispersion

Afin de prendre en compte l'hétérogénéité de la matrice, des valeurs de résistance ont été attribuées pour chaque classe paysagère à partir du jeu de résistance proposé

② Vue topologique du graphe planaire seuillé à 3km (a) et du graphe complet seuillé à 3km (b). La taille des taches d'habitat est proportionnelle à leur surface.



par Verbeylen *et al.* (2003) dans un contexte urbain. Cinq niveaux de résistance ont ainsi été définis, allant de l'entité spatiale la plus favorable correspondant à l'habitat préférentiel (résistance = 1), à l'entité spatiale la plus défavorable comme le réseau routier (résistance = 1 000). Un lien est ensuite créé entre deux taches d'habitats préférentiels si on suppose que les individus sont capables de traverser l'espace qui sépare ces taches, c'est-à-dire si le coût de mouvement est jugé inférieur à un certain seuil. Dans cette étude, le seuil retenu correspond à la distance de dispersion moyenne de l'Écureuil roux, soit 3 km. On parle alors de graphe « seuillé ».

Évaluation de la distribution de l'Écureuil roux en fonction de la connectivité

En partant du principe que la présence des individus d'une espèce dépend de l'aptitude des taches d'habitat, neuf métriques locales de connectivité ont été calculées directement au niveau des taches d'habitat. Ces métriques peuvent être pondérées par la surface des taches d'habitat : c'est le cas du Flux (F) qui est un indicateur de la dispersion potentielle à partir de la tache considérée, ou, inversement, à destination de cette tache. Certaines métriques sont topologiques : elles prennent par exemple en compte l'ensemble des taches voisines de la tache considérée pour analyser un effet de groupement (CC, coefficient de groupement), la distance maximale entre deux taches pour estimer un degré d'éloignement (E_c , excentricité) ou une distance moyenne d'une tache vers toutes les autres taches de sa

composante pour mesurer un degré de centralité (CC_e , centralité de proximité).

Deux cent cinquante-neuf points de présence issus d'observations de terrain réalisées entre 2001 et 2015 ont été fournis par le GEPMA. Deux cent cinquante-trois points de pseudo-absence ont ensuite été produits en tirant au hasard un point dans chaque cellule (500 m x 500 m) ne comprenant pas de point de présence. Deux graphes ont été construits : un graphe minimal planaire contenant 589 liens, et un graphe complet contenant 1 005 liens (figure ②). La topologie complète contient le maximum d'information, mais elle n'est pas toujours appropriée en pratique. L'approximation en topologie planaire permet de faciliter la compréhension en représentant notamment le graphe de manière réaliste, montrant le tracé des liens conformément à la géométrie de la carte initiale.

Les métriques de connectivité ont ensuite été extrapolées aux 512 points d'analyse par le biais d'une extrapolation spatiale des valeurs des métriques. Dix régressions logistiques ont été appliquées à chaque graphe afin de tester l'apport explicatif des métriques de connectivité vis-à-vis de la présence de l'Écureuil roux. Globalement, les coefficients de corrélation de McFadden (r^2) obtenus à l'aide des deux typologies de graphes sont relativement faibles mais significatifs ($p < 0,001$). Pour le graphe planaire, les variables de flux (F) et de groupement (CC) ont le pouvoir prédictif le plus fort. Pour le graphe complet, la présence de l'Écureuil roux est également fortement liée aux variables de proximité (CC_e) et d'excentricité (E_c).

Les réseaux écologiques, des outils potentiels de planification

En couplant la production de graphes paysagers à un modèle de distribution de l'Écureuil roux, il est possible de cartographier l'impact de l'urbanisation (vue sous l'angle de la fragmentation et de la transformation des habitats) sur un réseau écologique potentiel à un instant *t*. L'idée est de transposer ensuite ces résultats dans un cadre opérationnel de valorisation et de renforcement de la nature en ville, afin notamment de restaurer les continuités écologiques en milieu urbain.

Identifier, vérifier et évaluer l'importance des liens entre les taches d'habitat de l'écureuil

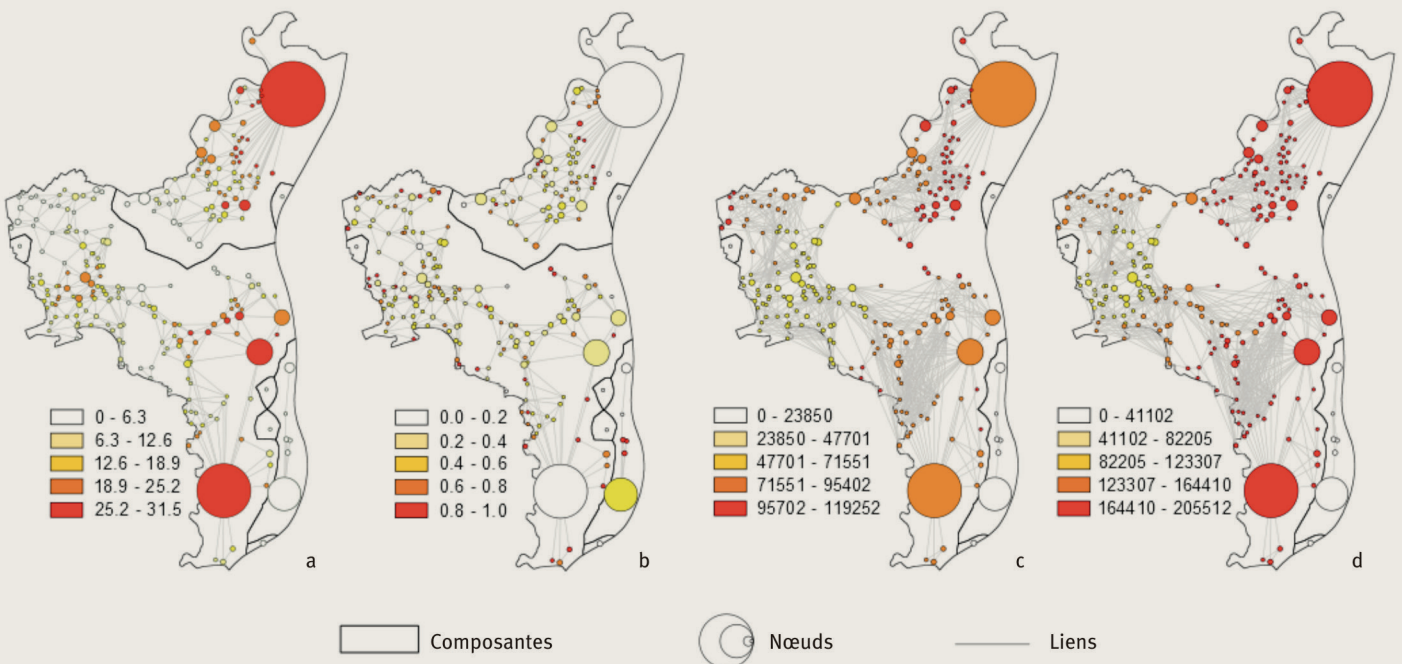
La précision de la base de données d'occupation du sol utilisée permet de localiser les chemins de moindre coût avec une grande justesse allant jusqu'à identifier précisément si l'on se situe d'un côté ou de l'autre de la chaussée. Ainsi, ces liens, qui reposent sur l'identification d'une connectivité structurelle, peuvent être facilement vérifiés par photos aériennes ou sur le terrain. Ces liens s'appuient sur beaucoup d'éléments de petites tailles comme les bois (≥ 5 ares) et les haies (largeur < 20 m et longueur ≥ 25 m). Au fur et à mesure que l'on se rapproche du centre urbain, les bois deviennent de plus en plus rares. Les liens reposent alors sur des éléments de forme linéaire comme les alignements d'arbres en bord de chaussée et les ripisylves. Dans certains cas, lorsque la matrice est vraiment trop contraignante, le franchissement des routes et de rivières ou canaux ne sont pas exclus.

En topographie plaine, la configuration des liens est organisée en huit composantes (ou secteurs) distinctes de superficies très inégales (figure 2). Les deux composantes majeures correspondent à la partie nord (29,2% des nœuds) et à la partie sud (66,4% des nœuds) de Strasbourg. La limite de séparation coïncide avec la présence de la rocade à l'ouest, du centre historique et de la présence de nombreuses darses, à l'est, qui desservent le port du Rhin. Le reste des composantes représente pour la plupart des nœuds uniques, isolés par des darses (à l'est) ou par le réseau routier et des zones industrielles (à l'ouest). Par exemple, l'île du Rohrschollen, à l'est, qui forme pourtant un habitat important en terme de surface, est totalement déconnecté du reste de l'agglomération. En topographie complète, les deux composantes majeures identifiées précédemment n'en forme qu'une seule; néanmoins, cette unité est fragile puisqu'elle ne dépend que de trois liens sur les 1 005 existants.

Mettre en lien les métriques de connectivité et les taches d'habitat

L'extraction des propriétés des graphes sous forme de métrique (tableau 1) permet d'identifier les nœuds existants les plus importants en terme de connectivité (figure 3). En topologie plaine, les nœuds les plus importants sont d'une part les nœuds les plus connectés, et d'autre part ceux situés de préférence au sein d'un groupement de nœuds (figure 3a et figure 3b). Les nœuds les plus connectés correspondent pour la plupart aux grands espaces forestiers. Ainsi, on recense les grands massifs forestiers situés en périphérie de la

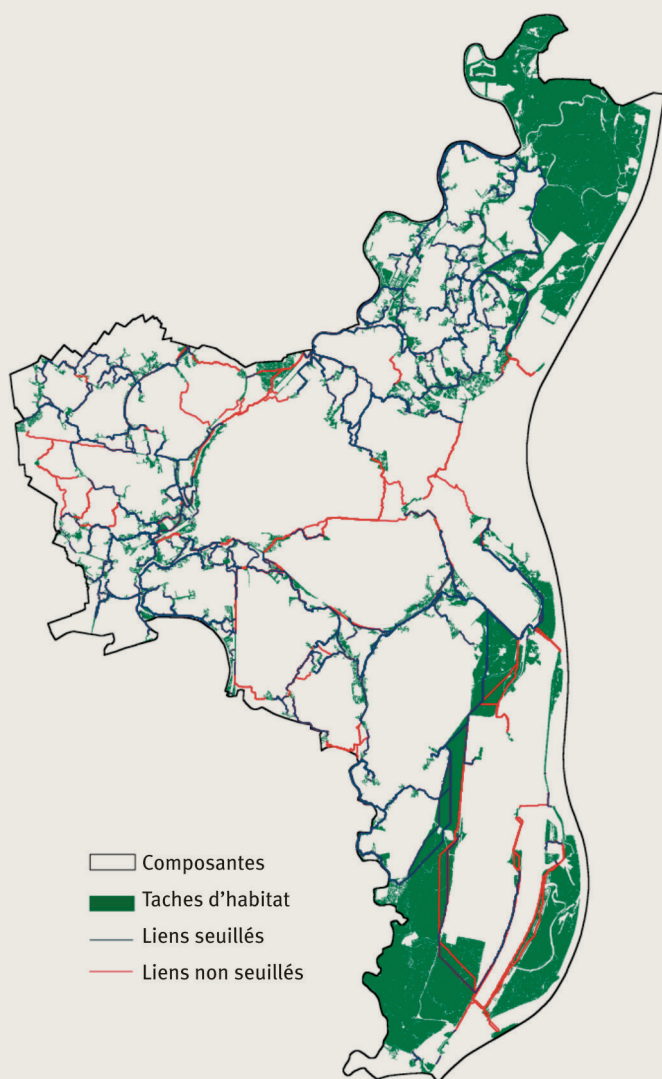
3 Représentation des nœuds en fonction du Flux (a), du coefficient de groupement (b), de la centralité de proximité (c) et de l'excentricité (d). La taille des taches d'habitat est proportionnelle à leur surface et la couleur montre l'importance des nœuds en fonction de la métrique considérée (les plus importants sont les plus foncés).



1 Métriques de connectivité dont le pouvoir explicatif est significatif dans les modèles de distribution de l'Écureuil roux sur le territoire de la ville de Strasbourg.

Code	Métrique	Signification
F	Flux	Capacité d'une tache d'habitat à émettre des individus par dispersion
CC	Coefficient de groupement	Rapport du nombre de taches d'habitat voisines d'une tache <i>i</i> sur le nombre total de taches d'habitat
Ec	Extremité	Distance maximale de la tache d'habitat <i>i</i> vers toutes les autres taches de sa composante
CCe	Centralité de proximité	Distance moyenne de la tache d'habitat <i>i</i> vers toutes les autres taches de sa composante

4 Superposition du graphe planaire seuillé (3 km) et du graphe planaire non seuillé en vue réaliste.



ville avec la forêt de la Robertsau au nord et les forêts d'Illkirch-Graffenstaden et du Neuhoef au sud. Les nœuds importants en terme de groupement sont, au contraire, des petits espaces fragmentés, principalement composés de parcs urbains comme le parc de la Citadelle, le parc de l'Orangerie, et le parc du Pourtalès à l'est, le parc des Sports et le parc de la Bergerie à l'ouest. On retrouve aussi des massifs forestiers de plus petite surface. Les métriques issues du graphe complet complètent ces informations; dans ce cas, on met en évidence les nœuds les plus éloignés (Ec) et les nœuds les plus centraux (CCe) (figure 3c et figure 3d). Globalement, les nœuds concernés représentent essentiellement les habitats situés dans la partie est de la ville de Strasbourg, exception faite de l'île du Rohrschollen. Paradoxalement, les nœuds dont la surface est la plus grande, ce qui peut potentiellement traduire une forte capacité pour accueillir une forte population, sont les nœuds les plus éloignés. Cette excentricité est néanmoins compensée par leur relative proximité avec leurs nœuds voisins.

Comparer différents scénarios

On a testé deux scénarios: l'un où seuls les liens répondant à la distance de dispersion maximale de l'Écureuil roux sont retenus (graphe planaire seuillé), et l'autre sans contrainte de distance de dispersion, correspondant à un scénario plus optimiste (graphe planaire non seuillé) (figure 4). Dans ce cas, les liens sont organisés en une seule composante. L'absence de connectivité entre la partie nord et la partie sud de la ville est alors compensée par plusieurs liens qui contournent le centre historique en s'appuyant sur des ripisylves, sur des haies et des alignements d'arbres en bord de route et d'autoroute. Néanmoins, ces liens jouxtent ainsi de grands obstacles, les franchissent parfois. Cette comparaison permet cependant de mettre en exergue les obstacles et d'identifier les endroits où la connectivité pourrait être renforcée.

Conclusion

La modélisation des réseaux écologiques sous-entend de prendre en compte tous les types d'espaces de nature en ville afin de constituer un véritable maillage du territoire urbain.

Dans un premier temps, la modélisation permet aux acteurs de s'approprier plus facilement la démarche de préservation et de développement des espaces de nature en ville. Dans ce cas, l'approche « espèce » donne un repère et permet de déterminer une connectivité fonctionnelle. La visualisation des graphes sous la forme de carte met en évidence l'importance des petits éléments de nature à préserver ou à restaurer, tout à fait compatibles avec les aménagements urbains, et appuie l'existant. De plus, l'extraction des propriétés des graphes sous la forme de métriques de connectivité invite à adopter une approche globale plutôt que de se focaliser sur une zone restreinte. Ainsi, on a pu mettre en évidence une déconnexion nette entre le Nord et le Sud de la ville qui n'est pas distinctement perceptible sur une carte paysagère et qui pourrait être contournée en renforçant certaines continuités.

Dans un second temps, la modélisation peut être utilisée comme un outil de diagnostic des opportunités et des menaces afin de mieux évaluer l'importance de certains espaces de nature dans les processus de planification. Les graphes paysagers constituent ainsi un bon outil en termes d'aménagement du territoire et d'évaluation de la politique de la collectivité (Galpern *et al.*, 2011 ; Lechner *et al.*, 2015). En effet, l'identification et l'élaboration du TNU fournit à ce jour un état zéro dont les scénarios, à moyen et à long terme, pourraient être vérifiés afin d'identifier les pertes mais également les gains d'éléments de nature.

La modélisation des réseaux écologiques par la méthode des graphes paysagers s'avère donc être un outil pertinent pour définir une connectivité fonctionnelle, afin d'atténuer les effets de la fragmentation en milieu urbain. Cependant, l'application d'un modèle unique ne peut pas être idéale. Dans le cadre du TNU, le modèle « Écu-reuil roux » reste pour le moment exploratoire et il serait intéressant de le croiser avec d'autres espèces. De plus, les graphes gagneraient en précision en augmentant la répartition de la pression d'observation afin d'améliorer le pouvoir explicatif des métriques de connectivité. Enfin, la modélisation pourrait être optimisée en couplant à la base de données d'occupation du sol d'autres informations comme des indices d'hostilité liés à la fréquentation humaine ou à la circulation routière, afin d'identifier les espaces particulièrement vulnérables au dérangement.

L'approche des graphes paysagers permet néanmoins de présenter une conception différente du développement urbain en alliant la nature et la ville et en proposant un continuum végétal pour relier les espaces de nature de la ville. L'habitant pourra alors redécouvrir sa ville, guidé par un cheminement végétal. ■

Les auteurs

**Eugénie SCHWOERTZIG
et Michèle TRÉMOLIÈRES**

Laboratoire Image Ville Environnement
(UMR 7362, CNRS, UNISTRA),
3 rue de l'Argonne, Strasbourg, F-67000, France

✉ eugenie.schwoertzig@live-cnrs.unistra.fr

✉ michele.tremolieres@live-cnrs.unistra.fr

Adine HECTOR et Suzanne BROLLY

Strasbourg Eurométropole, 1 parc de l'Etoile,
Strasbourg Cedex, F-67076, France

✉ adine. Hector@strasbourg.eu

✉ suzanne.brolly@strasbourg.eu

Stéphanie KAEMPF

ODONAT, 8 rue Adèle Riton,
F-67000, Strasbourg, France

✉ stephanie.kaempf@odonat-alsace.org

Remerciements

Les travaux ayant conduit à la rédaction de cet article ont bénéficié du soutien de l'Association nationale de la recherche de la technologie (ANRT) sous le contrat n° 2013/0025 et de l'Eurométropole de Strasbourg. Les auteurs tiennent à remercier l'Office des données naturalistes d'Alsace (ODONAT) pour la fourniture des données et leur disponibilité, le Groupe d'étude et de protection des mammifères d'Alsace (GEPMA) pour leurs conseils, Manon Combeau pour son implication dans ce projet ainsi que Jean-Nicolas Beisel pour sa relecture avisée.

EN SAVOIR PLUS...

- ✉ **AVON, C., BERGÈS, L., ROCHE, P.**, 2014, Comment analyser la connectivité écologique des trames vertes ? Cas d'étude en région méditerranéenne, *Sciences, Eaux & Territoires*, n° 14, p. 14-19, <http://www.set-revue.fr/comment-analyser-la-connectivite-ecologique-des-trames-vertes-cas-detude-en-region-mediterraneenne>.
- ✉ **GALPERN, P., MANSEAU, M., FALL, A.**, 2011, Patch-based graphs of landscape connectivity: a guide to construction, analysis and application for conservation, *Biological Conservation*, n° 144, p. 44-55.
- ✉ **FOLTÊTE, J.-C., CLAUZEL, C., VUIDEL, G.**, 2012, A software tool dedicated to the modelling of landscape networks, *Environmental Modelling & Software*, n° 38, p. 316-327.
- ✉ **LECHNER, A.M., DOERR, V., HARRIS, R.M.B., DOERR, E., LEFROY, E.C.**, 2015, A framework for incorporating fine-scale dispersal behaviour into biodiversity conservation planning, *Landscape & Urban Planning*, n° 141, p. 11-23.
- ✉ **VERBEYLEN, G., DE BRUYN, L., ADRIAENSEN, F., MATTHYSEN, E.**, 2003, Does matrix resistance influence Red squirrel (*Sciurus vulgaris* L. 1758) distribution in an urban landscape ?, *Landscape Ecology*, n° 18, p. 791-805.