

Analyser la connectivité de la trame turquoise : définition, caractérisation et enjeux opérationnels

Céline CLAUZEL^{1,2}, Christophe EGGERT³, Simon TARABON⁴, Lili PASQUET⁵, Gilles VUIDEL⁶, Marion BAILLEUL⁷, Claude MIAUD⁸, Claire GODET⁹

¹ LADYSS UMR CNRS 7533, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 12 Place du Panthéon, 75005 Paris, France.

² Institut universitaire de France (IUF), France.

³ Fauna Consult, 28 Rue de la Marne, 22410 Saint-Quay-Portrieux, France.

⁴ Ubiquiste, 18 rue Imbert Colomès, 69001 Lyon.

⁵ Université Paris Cité, 85 boulevard Saint-Germain, 75006 Paris, France.

⁶ Université de Franche-Comté, ThéMA UMR CNRS 6049, 32 rue Mégevand, 25030 Besançon Cedex, France.

⁷ Syndicat de la rivière La Juine et de ses affluents, Parc industriel SUDESSOR, 39 avenue des Grenôts, 91150 Étampes, France.

⁸ CEFÉ, Université Montpellier, CNRS, EPHE-Université PSL, IRD, Montpellier, 1919 route de Mende, 34293 Montpellier Cedex 5, France.

⁹ Consultante, France.

Correspondance : Céline CLAUZEL, celine.clauzel@univ-paris1.fr

Reconnue pour contribuer à la préservation des continuités écologiques, la trame verte et bleue mobilise de nombreux acteurs sur le territoire. Elle vient s'enrichir aujourd'hui d'une nouvelle composante : la trame turquoise, abritant une diversité d'habitats aquatiques et terrestres cruciaux pour de nombreuses espèces. Cet article propose de contribuer à une meilleure définition et compréhension de ce concept émergent. Il présente également une approche inédite basée sur la théorie des graphes paysagers pour mieux comprendre et préserver cette trame turquoise, en identifiant les zones à préserver, les zones vulnérables, et les endroits où restaurer les habitats pour améliorer les connectivités.

La trame turquoise, un concept récent aux contours encore mal définis

La trame verte et bleue (TVB) est aujourd'hui un dispositif bien établi dans la planification territoriale. Parallèlement aux continuités terrestres et aquatiques et à la prise en compte des obstacles dits « matériels » (routes, barrages, etc.), de nouvelles trames ont progressivement été définies pour tenir compte des sources de fragmentation « immatérielle » (pollution lumineuse pour la trame noire, bruit et pollution sonore pour la trame blanche) ou des interactions complexes entre les milieux. C'est notamment le cas des continuités et fonctionnalités des sols pour la trame brune ou celles des milieux aquatiques et terrestres en interaction pour la trame turquoise. Cette nouvelle trame bénéficie d'une communication croissante et de nombreuses structures et collectivités territoriales commencent à mettre en œuvre des actions¹, alors même que sa définition et les méthodes de caractérisation ne sont pas encore stabilisées.

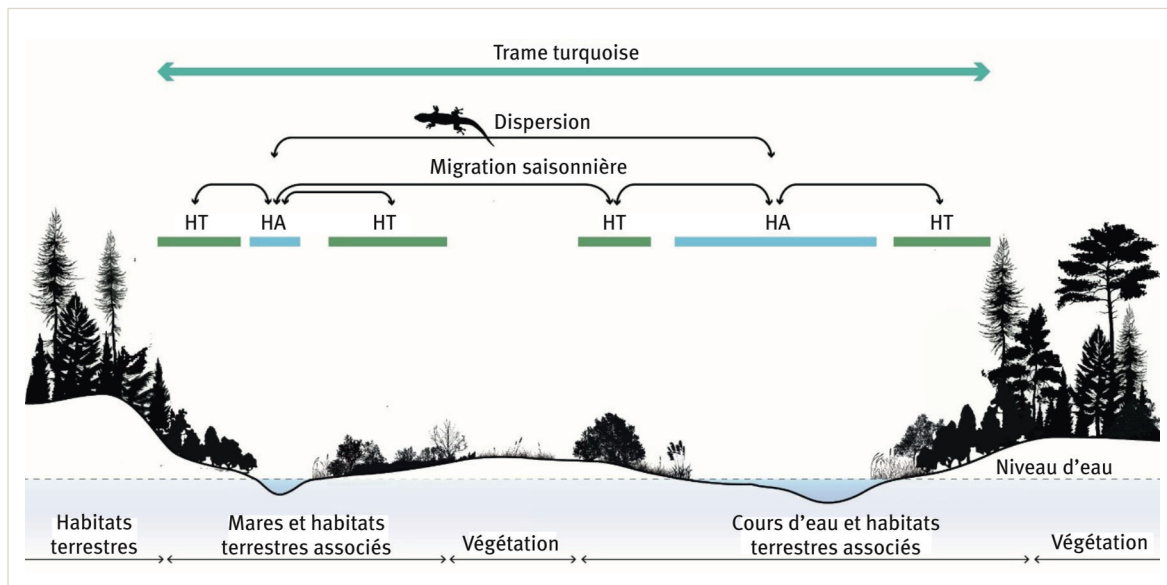
L'expression « trame turquoise » (ou turquoise infrastructure en anglais) est en effet encore peu questionnée dans

la littérature scientifique. Elle apparaît brièvement en 2008 pour souligner l'importance du rôle de l'eau dans les réflexions sur les trames vertes (Mell, 2008). L'expression a ensuite été reprise par Childers *et al.* (2015) pour désigner les zones humides urbaines, puis par Capon et Pettit (2018) pour désigner les zones ripariennes à l'interface des cours d'eau et des milieux terrestres. C'est cette dernière définition qui semble être utilisée lorsque la trame turquoise est définie comme une zone tampon autour des cours d'eau. Dans la lignée de la proposition de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse², nous proposons d'élargir cette définition pour tenir compte également des milieux d'eau stagnante (étangs, mares permanentes ou temporaires, mouillères...) et non uniquement des cours d'eau. Nous définissons ainsi la trame turquoise comme les zones d'interface entre des milieux aquatiques (eau de surface courante ou stagnante, permanente ou temporaire) et des milieux terrestres en interaction et qui constituent un ensemble d'habitats composites et fonctionnels pour les espèces biphases.

1. Voir par exemple la journée technique du 4 avril 2023 : <https://formulaires.ofb.fr/trame-verte-et-bleue-prend-de-nouvelles-couleurs-1675701102>

2. La trame turquoise y est définie comme « l'espace fonctionnel nécessaire à la bonne expression de la biodiversité aquatique et humide » : https://www.eaurmc.fr/upload/docs/application/pdf/2019-10/aeap_biodiversite_2020_191022_v3.pdf

Figure 1 – Schéma de la trame turquoise, habitat composite des espèces biphasiques (d'après Tarabon *et al.*, 2023). La trame turquoise englobe toutes les zones où les habitats aquatiques (HA) et les habitats terrestres (HT) sont en interaction fonctionnelle.



Les amphibiens (*amphi* = double, *bios* = vie) sont un exemple emblématique des espèces biphasiques, dépendant à la fois des habitats aquatiques pour la reproduction et le développement embryonnaire et larvaire, et des habitats terrestres (forêts, prairies, etc.) pour le repos, l'alimentation et l'hivernage (Semlitsch, 2003). Leurs mouvements à travers le paysage sont donc multiples et se produisent à différentes échelles spatiales et temporelles (Cayuela *et al.*, 2020). Les individus se déplacent entre des habitats aquatiques et des habitats terrestres plus ou moins éloignés au cours des migrations saisonnières, mais aussi entre deux

habitats aquatiques en passant par un ou plusieurs habitats terrestres intermédiaires au cours de la dispersion interannuelle (figure 1). La disponibilité et la connectivité de ces réseaux d'habitats composites sont donc cruciales pour la colonisation, la reproduction et la persistance des populations d'amphibiens (Smith *et al.*, 2019).

Le projet INTERFACE, des réseaux multi-habitats pour une conservation intégrée des milieux d'interface

Le projet INTERFACE³ associe des chercheurs et chercheuses spécialistes de la modélisation des réseaux écologiques et des amphibiens, la Société nationale pour la protection de la nature (SNPN) et le Syndicat de la rivière La Juine et de ses affluents (SIARJA). Le projet part du constat que les dispositifs de gestion environnementale fondés sur la Trame verte et bleue tendent à cloisonner les enjeux de conservation entre les milieux terrestres et aquatiques. L'identification des habitats et des corridors importants, ainsi que les obstacles qui fragilisent ou rompent des connexions, se fait généralement séparément sur chacune des deux trames et leur analyse croisée est encore peu développée.

Le projet INTERFACE vise ainsi à explorer une problématique encore peu connue : comment analyser la connectivité fonctionnelle de la trame turquoise dont dépendent les espèces utilisant des habitats de nature différente ? L'enjeu scientifique et opérationnel est de développer un protocole méthodologique original, basé sur la théorie des graphes (encadré 1), pour modéliser ces réseaux multi-habitats et développer des indicateurs évaluant la connectivité de manière intégrée en tenant compte des interactions spatiales fonctionnelles entre les différents milieux. Notre hypothèse est qu'une approche par réseaux multi-habitats est plus pertinente qu'une approche par réseaux mono-habitats pour étudier les relations entre la connectivité du paysage et la biodiversité de la trame tur-

Encadré 1 – La théorie des graphes adaptée aux réseaux multi-habitats.

La modélisation des réseaux écologiques par la théorie des graphes s'est largement développée ces dernières années, grâce notamment à l'outil Graphab (<https://sourcesup.renater.fr/www/graphab>).

Un réseau écologique est modélisé par un graphe dans lequel les nœuds correspondent à l'habitat de l'espèce considérée, et les liens aux connexions potentielles entre ces habitats en tenant compte de la résistance du paysage aux déplacements (voir par exemple Avon *et al.*, 2014 ou Le Roux *et al.*, 2014). De nombreuses études se concentrent sur les connexions directes entre les habitats de reproduction (les mares pour les amphibiens) et mesurent la connectivité du paysage à l'échelle de la dispersion. Bien que la dispersion soit un processus clé pour la viabilité des populations (Diniz *et al.*, 2020), cette approche ne reflète pas complètement la réalité pour les amphibiens car les connexions entre les habitats de reproduction ne sont pas directes mais passent nécessairement par un habitat terrestre intermédiaire utilisé l'hiver. Dans l'approche multi-habitat que nous proposons, le graphe contient deux types d'habitats distincts (les habitats aquatiques et les habitats terrestres) reliés par un jeu de liens inter-habitat. À partir de ce graphe bipartite, différents types de connectivité peuvent être mesurés en fonction du processus écologique étudié : à l'échelle de la migration entre un habitat aquatique et un habitat terrestre ou à l'échelle de dispersion entre des habitats aquatiques en passant obligatoirement par un habitat terrestre intermédiaire. L'approche multi-habitat a nécessité le développement d'une nouvelle version du logiciel Graphab (v.3.0) réalisée par le laboratoire ThéMA à Besançon.

3. <https://www.fondationbiodiversite.fr/la-frb-en-action/programmes-et-projets/le-cesab/interface/>

quoise. Pour la vérifier, nous avons modélisé les réseaux écologiques de plusieurs groupes d'amphibiens à partir d'une approche multi-habitats incluant les habitats aquatiques et les habitats terrestres, et à partir d'une approche mono-habitat (habitat aquatique uniquement). Les valeurs de connectivité obtenues ont été comparées aux données de présence, d'abondance et de richesse spécifique d'amphibiens pour identifier l'approche la plus pertinente. Le projet INTERFACE vise également à proposer des actions ciblées de restauration de la connectivité (création/restauration de mares ou de zones humides, plantation de haies, etc.) pour améliorer la fonctionnalité de ce réseau composite dans une perspective de conservation multi-espèces.

Diagnostic de la connectivité de la trame turquoise

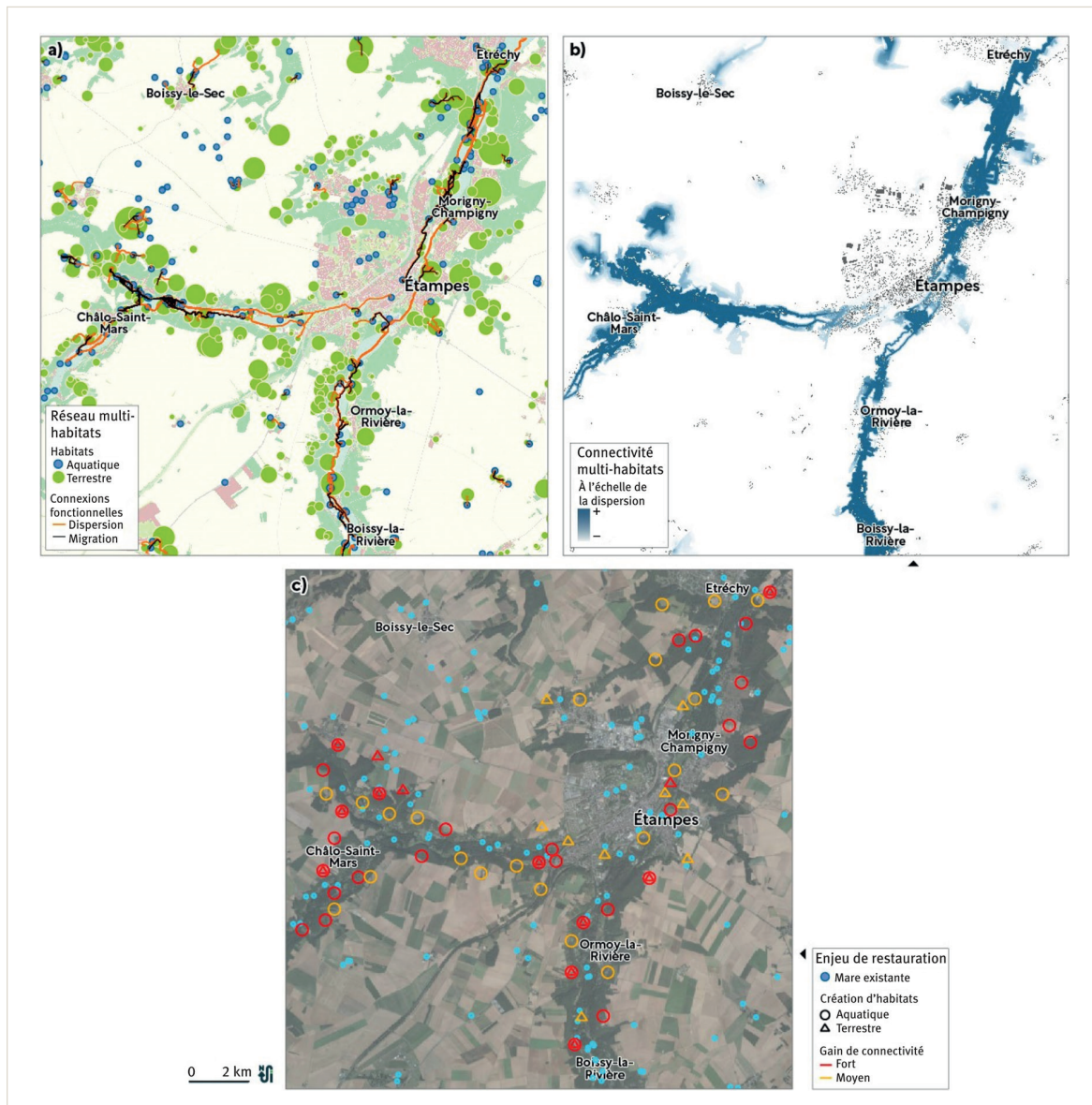
La zone d'étude du projet INTERFACE s'étend sur 155 km² au sud-ouest du département de l'Essonne (91). Le paysage est dominé par l'agriculture et l'urbanisation autour

de la ville d'Étampes. Les massifs boisés, les mares et les zones humides sont principalement concentrés dans la vallée de la Juine et de ses affluents.

L'analyse de la connectivité fonctionnelle de la trame turquoise s'est focalisée sur quatre espèces d'amphibiens présentes dans le secteur : la Rainette verte (*Hyla arborea*), la Grenouille rousse (*Rana temporaria*), le Triton crêté (*Triturus cristatus*) et la Grenouille agile (*Rana dalmatina*). Les habitats aquatiques correspondent aux petits plans d'eau (mares), alors que les habitats terrestres regroupent les forêts, les haies et les prairies humides.

Le graphe bipartite (figure 2a) révèle une trame turquoise extrêmement fragmentée. Les connexions fonctionnelles entre habitats aquatiques et habitats terrestres sont peu nombreuses et majoritairement concentrées dans les vallées : celle de la Juine au nord et au sud d'Étampes et autour de ses affluents (la Louette, la Chalouette et la Marette) à l'ouest. Sur ce dernier secteur, le réseau apparaît déconnecté de celui de la vallée de la Juine et ce,

Figure 2 – Apports des réseaux multi-habitats pour le diagnostic (a), la cartographie (b) et la restauration (c) de la trame turquoise.



même à l'échelle de la dispersion (figures 2a et 2b). Quelques micro-réseaux sont également présents en dehors des vallées dans des paysages agricoles (Boissy-le-Sec, par exemple) ou proche des zones urbanisées, mais leur isolement est tel que la connectivité y est quasi nulle. La trame turquoise présente ainsi une faible densité de connexions en raison de l'absence de mares dans certains secteurs pourtant occupés par des habitats terrestres (au sud d'Étampes ou dans les massifs boisés situés en dehors des vallées), et inversement de la présence de mares dans des secteurs sans habitat terrestre (sud de Boissy-le-Sec ou figure 3, zone E).

Apports pour la restauration d'habitat

Le SIARJA mène depuis 2021 un programme de restauration de mares sur la zone. Nous avons saisi cette opportunité pour tester l'apport des graphes bipartites pour identifier les secteurs qui amélioreraient le plus la connectivité fonctionnelle à l'échelle du paysage pour de futures restaurations de mares (habitat aquatique) et/ou de zones humides ou arbustives (habitat terrestre). À partir du graphe bipartite, une grille régulière de 100 m a été appliquée. La fonction « ajout de taches » du logiciel Graphab a permis de simuler l'ajout d'un habitat aquatique et/ou terrestre dans chaque cellule et de les hiérarchiser en fonction du gain de connectivité que procurerait son ajout.

Les résultats montrent que les plus forts gains de connectivité (en rouge sur la figure 2c) sont localisés en bordure des vallées. Selon la configuration initiale du réseau, certains secteurs apparaissent importants pour la restauration d'habitat aquatique seulement ou d'habitat terrestre, ou les deux cumulés.

Les emplacements identifiés par le modèle ont ensuite fait l'objet d'une description précise de terrain (contexte paysager, type de sol, pente, présence de barrières ou de perturbations potentielles). Certains emplacements présentent un paysage très favorable pour la création d'une mare : localisés dans des zones humides, souvent proches des cours d'eau et d'autres mares, ou dans des sous-bois avec des mares temporaires (photo 1a). D'autres emplacements présentent des contraintes comme la proximité avec des routes ou le statut privé des parcelles (par exemple, dans le parc du Château de Jeurre, sur le terrain d'une plantation de cresson et dans l'enceinte d'un centre équestre). Enfin, certains emplacements identifiés par le modèle n'apparaissent finalement pas favorables comme les zones de forte pente (photo 1b) qui rendent impossible le creusement d'une mare.

Perspectives d'application des réseaux multi-habitats

L'approche multi-habitat développée montre que certaines configurations paysagères sont favorables à la connectivité au sein de la trame turquoise. Les configurations les plus efficaces sont celles qui présentent une forte densité d'habitats aquatiques et terrestres connectés. Elles se retrouvent principalement dans les vallées, mais aussi dans les zones forestières comportant un grand nombre de mares et où le paysage favorable offre une faible résistance aux mouvements (figure 3).

Notre méthodologie offre un outil opérationnel pour la conservation et la gestion des réseaux écologiques pour les espèces biphasiques, mais aussi pour certaines espèces de poissons qui pondent leurs œufs dans des milieux humides (frayères en forêts alluviales ou prairies inondables). Elle est particulièrement intéressante dans les zones d'expansion urbaine et agricole où le morcellement des trames fonctionnelles pour ce type d'espèces est plus difficile à mettre en évidence. Alors que l'artificialisation des sols et le changement climatique conduisent à des transformations paysagères rapides et profondes, le maintien d'une trame turquoise est essentiel à la préservation de la biodiversité à long terme. Cette nouvelle méthode de modélisation permet d'évaluer l'impact de changements paysagers sur la qualité, la disponibilité et l'accès-

Figure 3 – Réseau écologique de la trame turquoise (a) et niveaux de connectivité multi-habitat (b). Les zones A, B et C regroupent des habitats aquatiques et terrestres bien connectés, où les valeurs de connectivité sont élevées (bleu foncé). À l'inverse, les zones D et E regroupent un réseau dense de mares mais avec peu ou pas d'interaction avec les habitats terrestres, les valeurs de connectivité pour la trame turquoise y sont très faibles voire nulles.

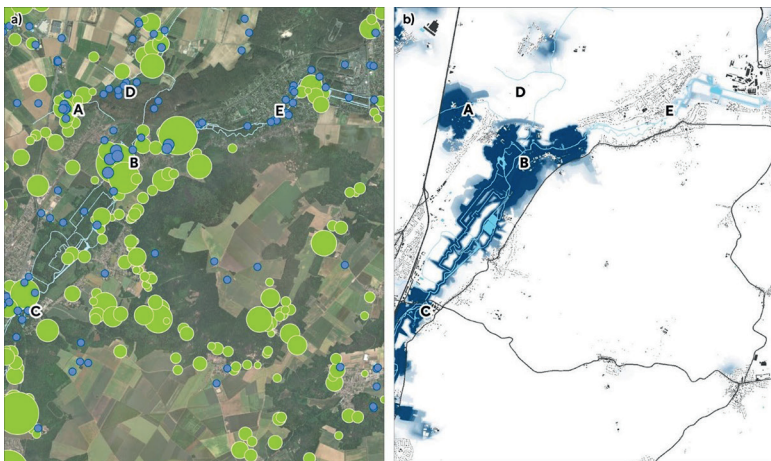


Photo 1 – Exemples d'emplacements pré-identifiés pour la restauration d'habitat. Emplacement favorable (a) contenant une mare temporaire dans un sous-bois humide entre la Louette et la Chalouette. Emplacement non approprié (b) en raison de l'inclinaison du terrain. Crédit photo : Lili Pasquet.



sibilité des habitats aquatiques et des habitats terrestres de la trame turquoise. Associée à une connaissance fine du terrain, elle permet un diagnostic plus intégré tenant compte des interactions fonctionnelles entre ces habitats, sans se limiter aux seuls milieux aquatiques (figure 3). Si les mares sont très sensibles au changement climatique, les milieux terrestres peuvent également être affectés modifiant ainsi l'ensemble du réseau d'habitats composites (Jantz *et al.*, 2015). En parallèle de la restauration de réseaux de mares fonctionnels, la restauration d'habitats terrestres, constituant des micro-refuges climatiques et des micro-habitats, serait un moyen d'atténuer l'effet du changement climatique sur les espèces de la trame turquoise (Shoo *et al.*, 2011).

Dans les études d'impact environnemental, il serait également possible d'évaluer les effets des transformations du paysage (par exemple, la conversion des prairies en cultures, l'urbanisation, la restauration des mares, le reboisement, etc.) sur les différents types d'habitats utilisés par les espèces et de révéler ainsi quel processus écologique serait le plus affecté. Nous supposons en effet que les impacts sont actuellement sous-estimés pour les espèces de la trame turquoise lorsque la connectivité n'est évaluée qu'à l'échelle de la dispersion directe entre les sites de reproduction. De même, les mesures de compensation écologique sont aujourd'hui souvent axées sur la restauration d'habitats aquatiques ou de zones humides pour la conservation des amphibiens. Ces habitats sont en effet très souvent affectés par l'urbanisation et l'intensification agricole alors qu'ils sont cruciaux pour la reproduction des amphibiens et donc pour la viabilité des populations. Cependant, la création d'habitats aquatiques sans tenir compte de l'accessibilité des habitats terrestres peut limiter l'efficacité de ces mesures. Les réseaux multi-habitats pourraient ainsi être utiles pour

évaluer le gain indépendant et cumulatif des restaurations de différents types d'habitats pour la connectivité à plusieurs échelles.

Conclusion

La modélisation par les réseaux multi-habitats offre ainsi de nouvelles opportunités pour identifier la trame turquoise et quantifier sa connectivité en intégrant les interactions fonctionnelles entre habitats aquatiques et habitats terrestres. Elle permet d'aller au-delà de la simple délimitation d'une simple zone tampon autour des cours d'eau ou des mares. La modélisation et les cartes qu'elle produit permettent d'identifier les zones fonctionnelles à préserver, les zones vulnérables et les points de conflits où il serait intéressant de restaurer des habitats et/ou des corridors pour améliorer les capacités des paysages à accueillir des populations durablement viables, dans un environnement de plus en plus contraint. Nous encourageons la poursuite des travaux théoriques et empiriques sur les réseaux multi-habitats afin de consolider les résultats et d'évaluer leur plein potentiel pour la conservation de la biodiversité.

REMERCIEMENTS

Cette recherche est issue du projet « Interface » financé par la Fondation française pour la recherche sur la biodiversité (FRB), le ministère de la Transition écologique (MTE) et l'Office français de la biodiversité (OFB). Les auteurs remercient particulièrement Paul Savary, Jean-Christophe Foltête et Stéphane Garnier pour les sessions de travail sur les réseaux multi-habitats ; ainsi que la Ligue de protection des oiseaux (LPO Ile-de-France) pour le partage de ses données sur les amphibiens. Les calculs de modélisation ont été effectués sur le serveur TGIR Huma-num (<https://www.huma-num.fr>).

RÉFÉRENCES

- Avon, C., Bergès, L. & Roche, P. (2014). Comment analyser la connectivité écologique des trames vertes ? Cas d'étude en région méditerranéenne. *Sciences Eaux & Territoires*, 14, 14-19. <https://doi.org/10.3917/set.014.0011>
- Capon, S. J., & Pettit, N. E. (2018). Turquoise is the new green: Restoring and enhancing riparian function in the Anthropocene. *Ecological Management & Restoration*, 19, 44-53. <https://doi.org/10.1111/emr.12326>
- Cayuela, H., Valenzuela-Sánchez, A., Teulier, L., Martínez-Solano, I., Lena, J., Merila, J., Muths, E. L., Shine, R., Quay, L., Denoel, M., Clobert, J., & Schmidt, B. (2020). Determinants and consequences of dispersal in vertebrates with complex life cycles: a review of pond-breeding amphibians. *The Quarterly Review of Biology*, 95, 1-36. <https://doi.org/10.1086/707862>
- Childers, D. L., Cadenasso, M. L., Grove, J. M., Marshall, V., Mc Grath, B., & Pickett, S. T. A. (2015). An ecology for cities: A transformational nexus of design and ecology to advance climate change resilience and urban sustainability. *Sustainability* 7(4), 3774-3791. <https://doi.org/10.3390/su7043774>
- Diniz, M. F., Cushman, S. A., Machado, R. B., & De Marco Júnior, P. (2020) Landscape connectivity modeling from the perspective of animal dispersal. *Landscape Ecology*, 35, 41-58. <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00935-3>
- Jantz, S. M., Barker, B., Brooks, T. M., Chini, L. P., Huang, Q., Moore, R. M., Noel, J., & Hurtt, G. C. (2015). Future habitat loss and extinctions driven by land-use change in biodiversity hotspots under four scenarios of climate-change mitigation. *Conservation Biology*, 29, 1122-1131. <https://doi.org/10.1111/cobi.12549>
- Le Roux, M., Luque, S., Vincent, S., & Planckaert, O. (2014). Intégration de la connectivité dans la gestion et la conservation des habitats. *Sciences Eaux & Territoires*, 14, 20-25. <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2014.14.04>
- Mell, I. C. (2008). Green infrastructure: Concepts and planning. *FORUM Ejournal* 8(1), 69-80.
- Semlitsch, R. D. (2003). *Amphibian conservation*. Smithsonian Books, 324 p.
- Shoo, L. P., Olson, D. H., Mc Menamin, S. K., Murray, K. A., Van Sluys, M., Donnelly, M. A., Stratford, D., Terhivuo, J., Merino-Viteri, A., Herbert, S. M., Bishop, P. J., Corn, P. S., Dovey, L., Griffiths, R. A., Lowe, K., Mahony, M., McCallum, H., Shuker, J. D., Simpkins, C., Skerratt, L. F., Williams, S. E., & Hero, J. M. (2011). Engineering a future for amphibians under climate change. *Journal of Applied Ecology*, 48, 487-492. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01942.x>
- Smith, L. I., Subalusky, A. I., Atkinson, C. I., Earl, J. E., Mushet, D. M., Scott, D. E., Lance, S. L., & Johnson, S. A. (2019). Biological Connectivity of Seasonally Pounded Wetlands across Spatial and Temporal Scales. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 55, 334-353. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12682>
- Tarabon, S., Godet, C., Vuidel, G., Eggert, C., Bailleul, M., Miaud, C., & Clauzel, C. (soumis). Turquoise infrastructure: assessing the impacts of global change on multi-habitat connectivity from a landscape management perspective. *Landscape and Urban Planning*.