

## Planification de la séquence « Éviter-Réduire-Compenser » à l'échelle du paysage : quel apport de la modélisation des réseaux écologiques à la mise en œuvre des sites naturels de compensation ?

Plusieurs équipes de chercheurs ont développé ces dernières années des cadres méthodologiques et des outils de modélisation spécifiques permettant de prendre en compte la dimension dynamique de la biodiversité dans les évaluations environnementales. Aujourd'hui, ces approches en développement sont encore peu utilisées en France. Cependant, comme l'illustrent les auteurs de cet article, de récents travaux ont montré leur intérêt et leur pertinence à toutes les phases des projets, des réflexions préliminaires à la conception, tant à l'échelle des opérations qu'à celle de la planification territoriale.

### La prise en compte des réseaux écologiques dans la séquence « Éviter-Réduire-Compenser » : une dimension négligée dans les pratiques actuelles

Alors qu'elle doit s'appliquer à tout projet, plan ou programme susceptible d'occasionner des dommages à l'environnement, la séquence « Éviter-Réduire-Compenser » (ERC) est encore aujourd'hui principalement focalisée à l'échelle des projets. L'ensemble des observateurs scientifiques s'accordent sur l'intérêt de mieux l'intégrer à l'échelle de la planification territoriale pour améliorer son efficacité et ainsi contribuer à l'atteinte des objectifs de non-perte nette de biodiversité. La prise en compte des réseaux écologiques à différentes échelles spatiales apparaît notamment comme un levier majeur pour une meilleure évaluation de la biodiversité. Un réseau écologique est formé d'un ensemble d'habitats naturels connectés par des flux d'espèces, d'individus et de gènes dans une matrice paysagère. L'évaluation de la connectivité écologique permet d'estimer la fonctionnalité des réseaux écologiques et d'inférer sur la viabilité des métapopulations des différentes espèces. Face à la complexité scientifique et technique du sujet, à l'insuffisance des connaissances et des moyens mis en œuvre,

l'évaluation environnementale laisse peu de place à la prise en compte des réseaux écologiques. Dans les pratiques actuelles, aucune méthode n'est partagée ou maîtrisée par l'ensemble des acteurs (maîtres d'ouvrage, bureaux d'études, services de l'État, etc.) pour intégrer ces considérations.

Les travaux de recherche ont développé ces dernières années des cadres méthodologiques et des outils de modélisation spécifiques au fonctionnement des réseaux écologiques. Aujourd'hui, ces approches sont encore peu utilisées en France dans le cadre opérationnel (voir cependant Tarabon *et al.*, 2020). C'est pourtant bien dans le processus d'évaluation environnementale que le fonctionnement des réseaux écologiques doit être finement analysé, afin d'estimer l'ensemble des incidences des projets, plans et programmes sur la connectivité, d'en qualifier la significativité et de proposer des mesures qui permettent d'assurer une neutralité écologique des opérations.

Pourtant, les outils de modélisation numérique apparaissent comme une solution accessible, à coût raisonnable et intéressante pour analyser la connectivité écologique. Leur usage est pertinent à toutes les phases des projets (des réflexions préliminaires à l'exploitation puis

la remise en état) et à tous les niveaux, tant à l'échelle des opérations que de la planification territoriale. Dans le cas des études d'impacts par exemple, les approches de modélisation du fonctionnement des réseaux écologiques peuvent être intégrées aux processus décisionnels dès les premières étapes de la séquence ERC (Bergès *et al.*, 2019). Dans le cadre des politiques d'aménagement des territoires, ces outils permettent de faciliter l'identification des secteurs à enjeux à éviter en priorité, de délimiter les secteurs les plus importants à préserver dans les documents de planification locaux et d'organiser la compensation de manière à renforcer les réseaux écologiques (Calvet *et al.*, 2020). L'usage de la modélisation offre la possibilité de questionner à toutes les étapes les évolutions possibles au travers de scénarios exploratoires dépendant des objectifs recherchés (évaluation des impacts d'un projet et de ses alternatives, évaluation des gains de restauration d'habitats ou de continuités écologiques, etc.). L'approche prospective permet en outre de tester le succès escompté des mesures proposées en compensation et ainsi de contribuer à l'obligation de résultat inscrite dans la loi.

Depuis 2016, la compensation peut désormais être mise en œuvre de manière anticipée dans des sites naturels de compensation (SNC). Ces sites permettent notamment des mesures de grande ampleur, réalisées sur des espaces de grande superficie et mises sur le marché au sein d'une aire de service définie par l'opérateur gestionnaire du SNC. À cet égard, les approches de modélisation des réseaux écologiques présentent un intérêt particulier pour évaluer les gains de connectivité qui pourront être générés par le SNC au sein du territoire dans lequel il s'inscrit.

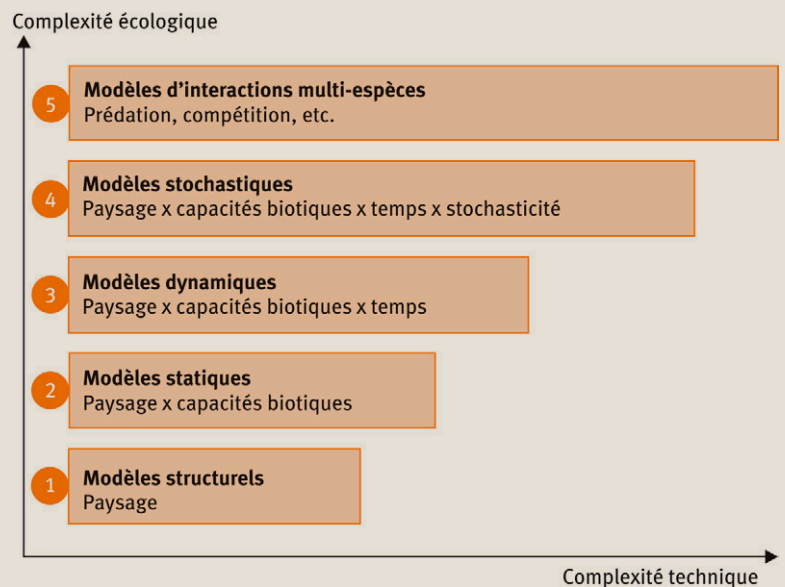
### La modélisation des réseaux écologiques : un compromis entre réalisme et faisabilité

Utilisée dans un cadre diagnostique et/ou prospectif, la modélisation permet de prédire sous certaines conditions la réponse d'un réseau écologique à une ou plusieurs modification(s) d'occupation ou d'usage des sols. L'objectif est de caractériser les impacts, tant positifs que négatifs, en comparant différents indicateurs de l'état de fonctionnement du réseau. La modélisation permet alors d'identifier spatialement les parcelles qui contribuent à la connectivité du territoire et de mettre en œuvre des mesures spécifiques pour éviter, réduire et compenser les incidences d'aménagements l'affectant.

À l'heure actuelle, les principales méthodes pour modéliser les réseaux écologiques dérivent de la théorie des graphes appliquée à l'écologie du paysage. Dans leur article fondateur de 2001, Urban et Keitt<sup>1</sup> proposent une représentation du graphe de fonctionnement d'une métapopulation spatialement explicite. Les populations ainsi représentées par les nœuds d'un graphe et les échanges entre ces populations par les arêtes (liens) sont désormais étudiés au regard de leurs positionnements relatifs et interactifs dans la matrice paysagère. La théorie des graphes apporte un cadre d'analyse et permet de mesurer

des indicateurs propres au réseau. Les graphes paysagers ont été un catalyseur des travaux sur la connectivité écologique dans la mesure où ils ont ouvert de nouvelles perspectives pour comprendre notamment les conditions de préservation des mouvements entre tâches d'habitats. Les éléments constituant le graphe peuvent être définis selon différentes approches ou modèles. Les modèles se distinguent par la complexité des processus écologiques considérés, les hypothèses de modélisation et les données nécessaires (figure 1). La confrontation des résultats avec des données terrains telles que les points d'inventaires, les suivis télémétriques et les prélèvements génétiques permet d'améliorer la fiabilité des modèles. De fait, l'utilisateur se retrouve généralement dans le besoin de faire un compromis entre le réalisme de son modèle et les compétences et ressources qu'il pourra allouer à l'acquisition des données pour le construire.

1 Évolution de la complexité technique (acquisition de données, nombre de paramètres, volumes de données, temps de calculs, etc.) en fonction de la complexité écologique des processus modélisés.



À chaque niveau de complexité écologique (de 1 à 5), les modèles intègrent les paramètres des échelons inférieurs. La plage potentielle de complexité technique augmente avec la complexité écologique. Les caractéristiques de chaque niveau sont les suivantes :

1. Les modèles structurels s'appuient exclusivement sur la configuration paysagère pour estimer la connectivité. Les indices portent par exemple sur la surface des habitats, leurs formes, leurs qualités et les distances qui les séparent.
2. Les modèles statiques associent aux éléments du paysage une valeur représentant les capacités d'interaction biotique des espèces. Ils permettent d'étudier la mobilité (dispersions ponctuelles, migration saisonnières, déplacements quotidiens) à partir d'indication de capacité de charge des milieux et de dispersion des espèces.
3. Les modèles dynamiques intègrent en plus une ou plusieurs composantes temporelles tenant compte de l'évolution au cours du temps des paysages et/ou des populations. Ces modèles permettent, par exemple, d'étudier conjointement la mobilité des espèces et les effets de la modification des milieux (changements climatiques périodiques, réchauffement climatique, aménagement du territoire).
4. Les modèles stochastiques intègrent une part d'aléatoire dans les processus écologiques estimés. La stochasticité peut intervenir dans la reproduction, la survie, certains déplacements et également sur le paysage avec des événements climatiques extrêmes.
5. Les modèles d'interactions interspécifiques intègrent explicitement plusieurs espèces co-dépendantes (prédation, compétition, etc.). Ces modèles sont encore très peu développés, les approches multi-espèces actuelles consistant à modéliser séparément chaque espèce et à compiler *a posteriori* les résultats.

1. URBAN, D., KEITT, T., 2001, Landscape connectivity: a graph-theoretic perspective, *Ecology*, vol. 82, n° 5, p. 1205-1218, <https://doi.org/10.2307/2679983>

1 Mesure compensatoire « à la demande » visant à recréer un boisement alluvial, mise en place dans le cadre de l'aménagement de la RD45 et du pont sur l'Isère, à Tullins.



© S. Tarabon - Ubiquiste

### Les principes de base du fonctionnement des outils de modélisation

La simulation numérique des réseaux écologiques nécessite plusieurs étapes incontournables :

- choix des espèces (espèces à forts enjeux, indicatrices ou parapluies) ou des guildes d'espèces cibles en fonction des enjeux locaux (Albert et Chaurand, 2018) en s'assurant que les espèces soient suffisamment nombreuses et complémentaires du point de vue de la niche écologique (liées aux milieux boisés, ouverts, culturels, aquatiques, etc.), capacités de dispersion (faible à grande), modes de dispersion (marcheuse, volante, nageuse, etc.) et traits d'histoire de vie (type de reproduction, stratégie de dispersion, etc.) ;
- construction d'une carte permettant de définir les besoins en habitats des espèces, qui peut se baser sur une carte d'occupation du sol, dont la résolution spatiale dépend des données disponibles pour la construire, des espèces mobilisées et des objectifs visés (Thierry *et al.*, 2020) ;
- paramétrage des modèles sur la base des connaissances disponibles sur les espèces (bibliographie scientifique, avis d'experts, données de terrains) ;
- analyse et interprétation des résultats en prenant en compte les incertitudes liées à la qualité des données d'entrée et aux hypothèses de modélisation.

Les expertises conduites sur le terrain ne sont généralement pas suffisantes pour appréhender les processus impliqués à moyenne ou large échelle dans des situations complexes. En effet, les prospections sont généralement restreintes aux périmètres des opérations d'aménagement et à leurs abords. Cette limitation peut être de nature économique, mais également technique. On comprend alors que l'usage de la modélisation prend tout son intérêt lorsque des inventaires naturalistes importants ne sont pas possibles à large échelle. L'approche par modélisation des réseaux écologiques permet de mieux appréhender les fonctionnalités écologiques des écosystèmes et est complémentaire des dires d'experts, qui restent

essentiels tout au long des différentes étapes de mise en œuvre de la modélisation (définition des espèces cibles, validation du paramétrage des modèles en fonction des capacités de dispersion déterminées *a priori*, validation/discussion des résultats des modélisations, etc.).

### La simulation numérique, une opportunité pour tendre vers l'absence de perte nette de connectivité

Dans la mesure où les changements d'usage des sols sont un facteur prépondérant de l'érosion de la biodiversité, la mise en œuvre de stratégies de conservation de la biodiversité conjointement aux projets d'aménagement est essentielle pour atteindre l'objectif d'absence de perte nette de biodiversité. Restaurer ou renforcer les réseaux écologiques à l'aide de mesures compensatoires permet d'améliorer la connectivité générale des habitats et donc le flux d'espèces et de gènes dans des matrices paysagères favorables. Certaines études ont montré que l'amélioration des continuités écologiques pouvait ainsi compenser à court terme la perte d'habitats et maintenir les populations dans un bon état de conservation<sup>2</sup>. En effet, le renforcement des réseaux écologiques permet de lutter contre l'isolement des populations induit par la fragmentation des espaces naturels.

Les mesures compensatoires suivent très majoritairement, dans les pratiques actuelles, une modalité dite « à la demande », c'est-à-dire qu'elles sont réalisées au cas par cas pour chaque projet (photo 1). Largement commentés par les observateurs nationaux depuis de nombreuses années, ces usages se heurtent à la considération trop tardive des incidences environnementales des projets, ce qui explique en partie le recours quasi

2. HERSPERGER, A.M., LANGHAMER, D., DALANG, T., 2012, Inventorying human-made objects: A step towards better understanding land use for multifunctional planning in a periurban Swiss landscape, *Landscape and urban planning*, vol. 105, Issue 3, p. 307-314, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.01.008>

exclusif à l'expertise pour apprécier les fonctionnalités écologiques des sites évalués. Les SNC correspondent à une modalité de mise en œuvre d'une compensation anticipée à une plus large échelle et peuvent être de bons candidats pour opérer un changement de pratiques, en lien avec la planification de la séquence ERC. Les outils de modélisation peuvent permettre d'améliorer les diagnostics écologiques d'un territoire et opérer un travail prospectif permettant de mieux construire ces stratégies de SNC.

### Établir les sites naturels de compensation pour renforcer les réseaux écologiques : vers une amélioration des pratiques de compensation

En théorie, la mise en place d'un SNC doit être planifiée à l'échelle d'un territoire écologiquement cohérent (tenant compte des processus écologiques et non des limites administratives) au sein duquel les unités de compensation seront proposées à la vente. Il s'agit de son « aire de service », qui devrait donc être définie suivant les bénéfices potentiels qu'apportent les gains écologiques aux espèces, habitats et fonctions qui s'y expriment. Cette notion d'aire de service contribue à la reconnaissance d'un principe de proximité fonctionnelle, plutôt que géographique, pour la localisation des mesures compensatoires.

Les opérateurs doivent donc, préalablement à toute opération, caractériser les composantes écologiques du site qu'ils souhaitent faire agréer et identifier sa contribution aux réseaux écologiques du territoire pour estimer les gains de connectivité qu'ils pourraient obtenir. Les modèles dynamiques (figure 1) contribuent à l'identification et la compréhension des réseaux écologiques et à l'évaluation de l'apport d'un projet de SNC à la connectivité globale, au sein de son aire de service.

Sur la base des données d'occupation du sol, des habitats naturels, et des éventuelles connaissances sur les populations d'espèces d'intérêt, les modèles peuvent estimer comment les actions écologiques potentielles bénéficieront au fonctionnement des réseaux écologiques. Cette approche permet ainsi à l'opérateur de hiérarchiser des sites spécifiques et des aménagements écologiques à prévoir pour maximiser les bénéfices de ses actions sur la connectivité des réseaux d'habitats étudiés.

Lorsqu'ils sont mobilisés à l'échelle d'un SNC et de son aire de service, l'intérêt des modèles est encore renforcé parce qu'ils permettent de quantifier les gains de connectivité obtenus dans l'ensemble de cette aire. Contrairement à la compensation au « cas par cas », où pertes et gains sont évalués séparément et qui repose sur des hypothèses relatives à l'équivalence écologique entre deux entités écologiques distinctes, il est ainsi possible de :

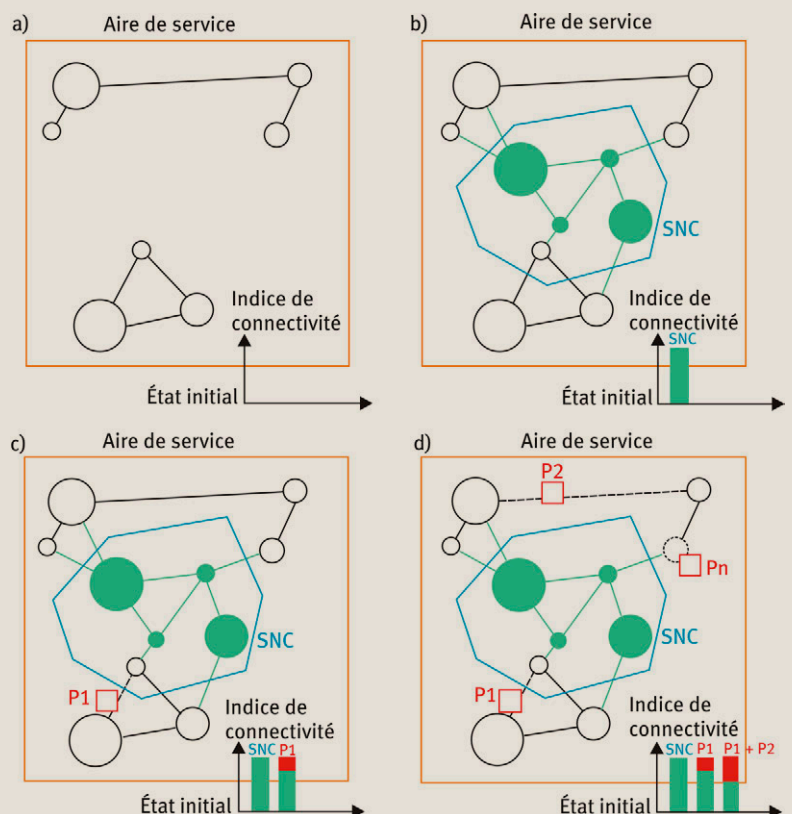
- quantifier l'effet global du SNC sur la connectivité des réseaux écologiques (figure 2a, b),
- évaluer, pour chaque projet souhaitant acheter des unités de compensation, ses effets sur la connectivité de ces mêmes réseaux (figure 2c).

Cette approche d'évaluation itérative élargie à l'aire de service présente donc l'avantage de tenir compte des effets cumulés de plusieurs projets (figure 2d).

Par ailleurs, la modélisation permettrait également d'identifier, sur l'aire de service, les espaces à forte contribution pour la connectivité. Ces espaces structurants sont indispensables au maintien de la fonctionnalité générale des réseaux écologiques et doivent alors être préservés d'éventuelles incidences, au risque de rendre l'action de compensation trop peu significative, voire inopérante, à l'échelle du paysage. L'opérateur de SNC n'a pourtant pas, a priori, de rôle direct à jouer dans l'identification des zones à fort enjeu pour l'évitement au sein des territoires. Cependant, les résultats de ses opérations sont nécessairement dépendants du maintien d'un niveau de fonctionnalité à cette même échelle.

Enfin, rappelons que l'opérateur est chargé de gérer ses SNC tout au long de leur existence, mais également d'assurer le suivi des gains écologiques obtenus. Si celui-ci s'est appuyé sur la modélisation des réseaux écologiques pour évaluer la contribution de ses sites, il peut également actualiser les modèles tout au long de son activité

- 2 Processus d'évaluation de la connectivité écologique au sein de l'aire de service d'un site naturel de compensation (SNC) au cours des différentes étapes de sa mise en œuvre :
- avant la mise en œuvre du SNC, l'état initial de la connectivité du réseau dans son aire de service est évalué à l'aide d'un ou plusieurs modèles, selon les habitats et les espèces choisis ;
  - les mesures mises en œuvre (SNC) permettent un gain global de connectivité à l'échelle de l'aire de service (en vert dans le graphique) ;
  - un premier projet (P1) impacte certaines composantes du réseau et minimise le gain global par rapport à l'état initial (en rouge dans le graphique). Le bilan à l'échelle de l'aire de service reste positif.
  - un second projet (P2) impacte d'autres composantes. Le cumul des incidences de P1 et P2 est évalué à l'échelle de l'aire de service mais le bilan est toujours positif. Pour chaque projet suivant (Pn), les modèles devront être actualisés. Lorsque le gain global atteint sera nul (retour à l'état initial), les projets réalisés dans l'aire de service ne seront plus compensables par le site naturel de compensation.



► pour suivre plus précisément les effets de ses actions à l'échelle du paysage. En parallèle, il se trouve en situation de documenter les incidences causées par l'aménagement du territoire sur ses fonctionnalités écologiques.

### La modélisation pour les opérateurs de sites naturels de compensation, intérêts et enjeux pour la préservation de la biodiversité

Dans cet article, nous avons montré comment la modélisation de la connectivité paysagère permet de prédire les évolutions des réseaux écologiques à la suite de modifications du paysage (qu'elles aient des effets positifs ou négatifs). Dans l'application de la séquence ERC, ces outils de modélisation permettent de quantifier les pertes et les gains de connectivité et d'arbitrer en conséquence en faveur des opportunités les plus favorables à l'atteinte de l'objectif d'absence de perte nette de biodiversité. Leur utilisation impose néanmoins des données de qualité à l'échelle du paysage, notamment concernant l'occupation des sols et nécessite donc une meilleure anticipation des processus nécessaires à l'acquisition de ces connaissances.

Les outils de modélisation de la connectivité des réseaux écologiques constituent une approche plus cohérente pour évaluer les objectifs de neutralité entre sites de compensation et projets d'aménagement, mais aussi pour imaginer l'évolution du rôle de l'opérateur qui, suivant la nécessité de faire agréer les SNC dont il porte les projets, devra également s'assurer du maintien des bénéfices écologiques obtenus au sein d'une matrice paysagère soumise à différentes perturbations.

En accompagnant la mise en œuvre de SNC, les outils de modélisation des réseaux écologiques pourront également trouver un public nouveau et être appliqués dans un cadre opérationnel favorisant ainsi les rapprochements entre la recherche en écologie et l'expertise nécessaire aux évaluations environnementales des projets, plans et programmes. En généralisant leur utilisation, les parties prenantes pourront alors motiver les choix de leurs actions avec un langage commun centré sur le fonctionnement des écosystèmes et la préservation d'une biodiversité dont le déclin se poursuit. ■

### Les auteurs

#### Brian PADILLA

Muséum national d'Histoire naturelle,  
PatriNat (UAR 2006),  
4 avenue du Petit Château, F-91800 Brunoy, France  
✉ [brian.padilla@mnhn.fr](mailto:brian.padilla@mnhn.fr)

#### Simon TARABON

Ubiquiste, F-69001 Lyon, France.  
✉ [s.tarabon@ubiquiste.fr](mailto:s.tarabon@ubiquiste.fr)

#### Sylvain MOULHERAT

1. TerrOïko - OïkoLab,  
2 Place Dom Devic, BP 26, F-81540 Sorèze.  
2. Station d'écologie théorique et expérimentale,  
2 Route du CNRS, F-09200 Moulis, France.  
✉ [sylvain.moulherat@terroiko.fr](mailto:sylvain.moulherat@terroiko.fr)

#### Jules BOILEAU

1. TerrOïko - OïkoLab,  
2 Place Dom Devic, BP 26, F-81540 Sorèze.  
2. Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive,  
1919 Route de Mende, F-34293 Montpellier 5,  
Laboratoire de géographie et d'aménagement  
de Montpellier, Route de Mende, 3F-4199 Montpellier.  
✉ [jules.boileau@terroiko.fr](mailto:jules.boileau@terroiko.fr)

#### Marie SORET

1. TerrOïko - OïkoLab,  
2 Place Dom Devic, BP 26, F-81540 Sorèze.  
2. Territoire, environnement, télédétection et information  
spatiale, INRAE, Maison de la Télédétection,  
500 rue Jean-François Breton, F-34000, Montpellier.  
✉ [marie.soret@terroiko.fr](mailto:marie.soret@terroiko.fr)

#### Guillaume PAPET

INRAE, Aix Marseille Univ, UMR RECOVER,  
F-13182, Aix-en-Provence, France.  
✉ [guillaume.papet@inrae.fr](mailto:guillaume.papet@inrae.fr)

#### Laurent BERGÈS

Univ. Grenoble Alpes, INRAE, UR LESSEM,  
F-38402 St-Martin-d'Hères, France.  
✉ [laurent.berges@inrae.fr](mailto:laurent.berges@inrae.fr)

### EN SAVOIR PLUS ...

▣ ALBERT, C.-H., CHAURAND, J., 2018, Comment choisir les espèces pour identifier des réseaux écologiques cohérents entre les niveaux administratifs et les niveaux biologiques ?, *Revue Sciences Eaux & Territoires*, Trame verte et bleue : la continuité écologique en marche dans les territoires, n° 25, p. 26-31,

✉ <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2018.25.05>

▣ CALVET, C., DELBAR, V., CHAPRON, P., BRASEBINN, M., PERRET, J., MOULHERAT, S., 2020, La biodiversité à l'épreuve des choix d'aménagement : une approche par la modélisation appliquée à la Région Occitanie, *Revue Sciences Eaux & Territoires*, Éviter, réduire, compenser : et si l'on s'organisait à l'échelle des territoires ?, n° 31, p. 24-31, ✉ <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2020.1.06>

▣ TARABON, S., THEURIAU, F., BERGÈS, L., DUTOIT, T., ISSELIN-NONDEDEU, F., 2020, Améliorer la prise en compte des fonctionnalités écologiques dans la séquence Éviter-Réduire-Compenser, *Revue Sciences Eaux & Territoires*, article hors-série n°61, 8 p., ✉ <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2020.HS.01>

▣ THIERRY, C., LESIEUR-MAQUIN, N., FOURNIER, C., DELZONS, O., GOURDAIN, P. & HERARD, K., 2020, Comment cartographier l'occupation du sol en vue de modéliser les réseaux écologiques ? Méthodologie générale et cas d'étude en Île-de-France, *Revue Sciences Eaux & Territoires*, article hors-série n° 65, 8 p., ✉ <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2020.HS.05>



Établir les sites naturels de compensation pour renforcer les réseaux écologiques : vers une amélioration des pratiques de compensation