

Améliorer la transparence écologique des grandes infrastructures de transport Le cas du réseau autoroutier du groupe Sanef

Les grandes infrastructures de transport affectent les continuités écologiques ainsi que le fonctionnement des écosystèmes et nécessitent la mise en place de mesures d'atténuation tels que les passages à faune. Afin d'aider les maîtres d'ouvrages et les services de l'État dans la sélection des solutions techniques et le choix des emplacements de ces aménagements, les auteurs de cet article proposent une méthodologie innovante couplant une expertise « de terrain » à une approche de modélisation. Appliquée à un vaste réseau autoroutier du Nord de la France, cette étude à visée opérationnelle a ainsi permis d'identifier les ouvrages existants à améliorer pour la faune au regard de leur localisation et les tronçons les plus favorables pour créer de nouveaux ouvrages.

Les interactions entre les sociétés humaines et la biodiversité affectent la faune et le fonctionnement des écosystèmes. Les grandes infrastructures de transport augmentent les risques mortels dus aux collisions, créent un effet de barrière et conduisent *de facto* à une altération sévère de la connectivité paysagère sur plusieurs dizaines de kilomètres de part et d'autre des infrastructures. En France, le réseau autoroutier représente en 2018 un total d'environ douze mille kilomètres¹ et souligne la nécessité de conserver les réseaux écologiques des espèces, à grande échelle. La transparence écologique des grandes infrastructures de transport est en effet d'une importance cruciale. La préservation des continuités écologiques permet d'assurer le bon fonctionnement des cycles biologiques des espèces, d'accroître les flux génétiques et donc la survie des populations, en particulier des mammifères, des reptiles et des amphibiens. Parmi les mesures existantes pour réduire l'effet barrière des autoroutes, les passages à faune (écoducs ou écoponts) se sont considérablement généralisés ces dernières décennies, et représentent les principales mesures de réduction des impacts, que les infrastructures soient existantes ou en projet.

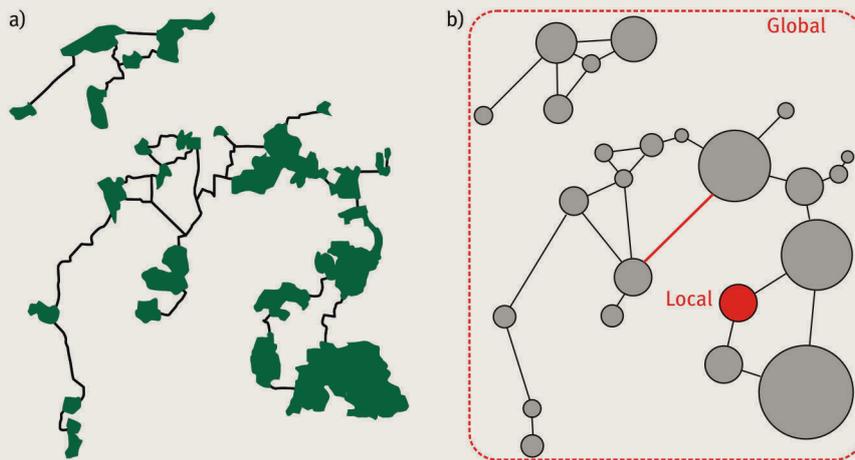
Pour garantir leur efficacité, les ouvrages doivent être construits au plus près des corridors écologiques. Leur localisation est souvent déterminée sur dire d'experts ou à partir d'approches basées sur des modèles d'habitats et de perméabilité du paysage. Les données de mouvement de type trajectométrie et de collisions peuvent également être utilisées, mais leur collecte prend du temps et est coûteuse. En outre, les bases de données des collisions ne sont pas exhaustives en termes d'espèces (les espèces de moyenne ou grande taille sont les plus fréquentes), et rarement menées sur l'ensemble d'un territoire. Ces dernières années, plusieurs études ont expérimenté des protocoles de modélisation pour améliorer la prise en compte des corridors écologiques dans la localisation des ouvrages. Parmi ces outils, ceux basés sur la théorie des graphes se sont révélés être un excellent compromis entre facilité de mise en œuvre et qualité des résultats. Les graphes paysagers sont une représentation simplifiée des réseaux écologiques dans lesquels les habitats apparaissent comme des nœuds et les mouvements potentiels de déplacement comme des liens reliant les paires de nœuds. Cette représentation permet le calcul de différentes métriques de connectivité pour évaluer la connectivité des habitats, tant à l'échelle locale que

1. Ministère de la Transition écologique, chargé des Transports, Service de la donnée et des études statistiques (SDES).

1 LES GRAPHES PAYSAGERS

Les graphes paysagers sont supports de calcul d'indices destinés à caractériser la connectivité de réseaux écologiques et évaluer les effets de différents scénarios de changement d'occupation du sol. On distingue les métriques locales qui permettent d'évaluer la connectivité à l'échelle de chaque élément des graphes, c'est-à-dire les nœuds ou liens, et les métriques globales qui caractérisent le graphe entier. La connectivité d'une tache d'habitat est dépendante de sa surface et de sa distance aux autres taches.

1 Représentation a) réaliste et b) topologique d'un graphe paysager représentatif d'un réseau écologique constitué d'habitats (nœuds) et de chemins de moindre coût (liaisons). Les métriques de connectivité peuvent être calculées à différents niveaux : à l'échelle locale (nœud et lien, en rouge) et à l'échelle globale (graphe entier).



globale (encadré 1). Ces approches ont gagné en popularité ces dernières années, en particulier pour évaluer la fragmentation et la perte de connectivité induites par les grandes infrastructures de transport, et cibler les secteurs où restaurer les continuités écologiques (voir par exemple Mimet *et al.*, 2016 et Tarabon *et al.*, 2020). Les études ciblent dans la plupart des cas les nouveaux passages à créer mais très peu cherchent à identifier ceux existants (buses, passages agricoles, ponts, etc.)² pouvant être améliorés et rendus plus fonctionnels pour la faune. En effet, on sait désormais que la création d'écoponts et d'écoducs est le plus favorable à la faune mais est aussi la mesure la plus coûteuse, en particulier lorsqu'on intervient sur des infrastructures de transport existantes. Améliorer la fonctionnalité écologique d'ouvrages déjà présents est plus rentable (gains/coût), sachant que pour un investissement équivalent, certains auteurs ont démontré que plusieurs petits passages à faune sont plus efficaces pour réduire les effets de barrière qu'un seul grand ouvrage (Karlson *et al.*, 2017). De récentes études sur l'efficacité des passages à faune (par exemple Deneboom *et al.*, 2021) montrent néanmoins qu'il existe des incertitudes importantes dans le succès des mesures, pouvant être causées par le dimensionnement et l'attractivité de l'ouvrage, mais aussi par sa localisation au sein des réseaux écologiques. La prise en compte de la connectivité des habitats et l'identification des groupes d'espèces potentiellement bénéficiaires est ainsi d'une importance cruciale pour augmenter les chances de réussite.

De plus, il est rare que dans les études qui visent à identifier les localisations les plus favorables pour créer de nouveaux ouvrages, les résultats (par exemple basés sur des outils de modélisation) mènent ensuite à des propositions concrètes d'aménagement (principes, chiffrage, procédures administratives, etc.) pour répondre aux besoins opérationnels (voir cependant Zhang *et al.*, 2019). Pour cause, l'expertise écologique est généralement dissociée de l'approche opérationnelle dans laquelle les réalités écologiques et techniques des sites potentiels d'implantation sont pris en compte. Aussi, il est récurrent que les approches de modélisation novatrices soient développées par des chercheurs, et l'opérationnalité de ces outils par les praticiens est encore lacunaire. Ainsi, coupler une expertise « de terrain » à une approche de modélisation est un véritable défi dans un contexte d'aide à la décision.

L'article se concentre sur les passages à faune comme moyen de réduire l'effet de « barrière écologique » d'un réseau autoroutier sur une vaste zone d'étude dans le Nord de la France. Nous avons défini un cadre méthodologique multi-espèces utilisant la théorie des graphes et l'expertise technique pour :

- identifier les ouvrages existants à améliorer en priorité,
- trouver les meilleurs emplacements pour en créer de nouveaux,
- préciser les détails techniques.

Le cadre méthodologique utilisé est présenté en figure 2.

2. Les viaducs, ponts et tunnels seulement ont été considérés dans Mimet *et al.* (2016).

Méthode et données mobilisées

Zone d'étude

L'étude porte sur l'ensemble du réseau autoroutier du groupe Sanef qui gère aujourd'hui plus de 1 800 km d'autoroutes (figure 3). Afin de tenir compte de l'ensemble des éléments constitutifs des réseaux d'habitats des espèces, et notamment des plus mobiles (voir paragraphe suivant), nous avons appliqué une zone tampon d'une quarantaine de kilomètres de part et d'autre des infrastructures. La

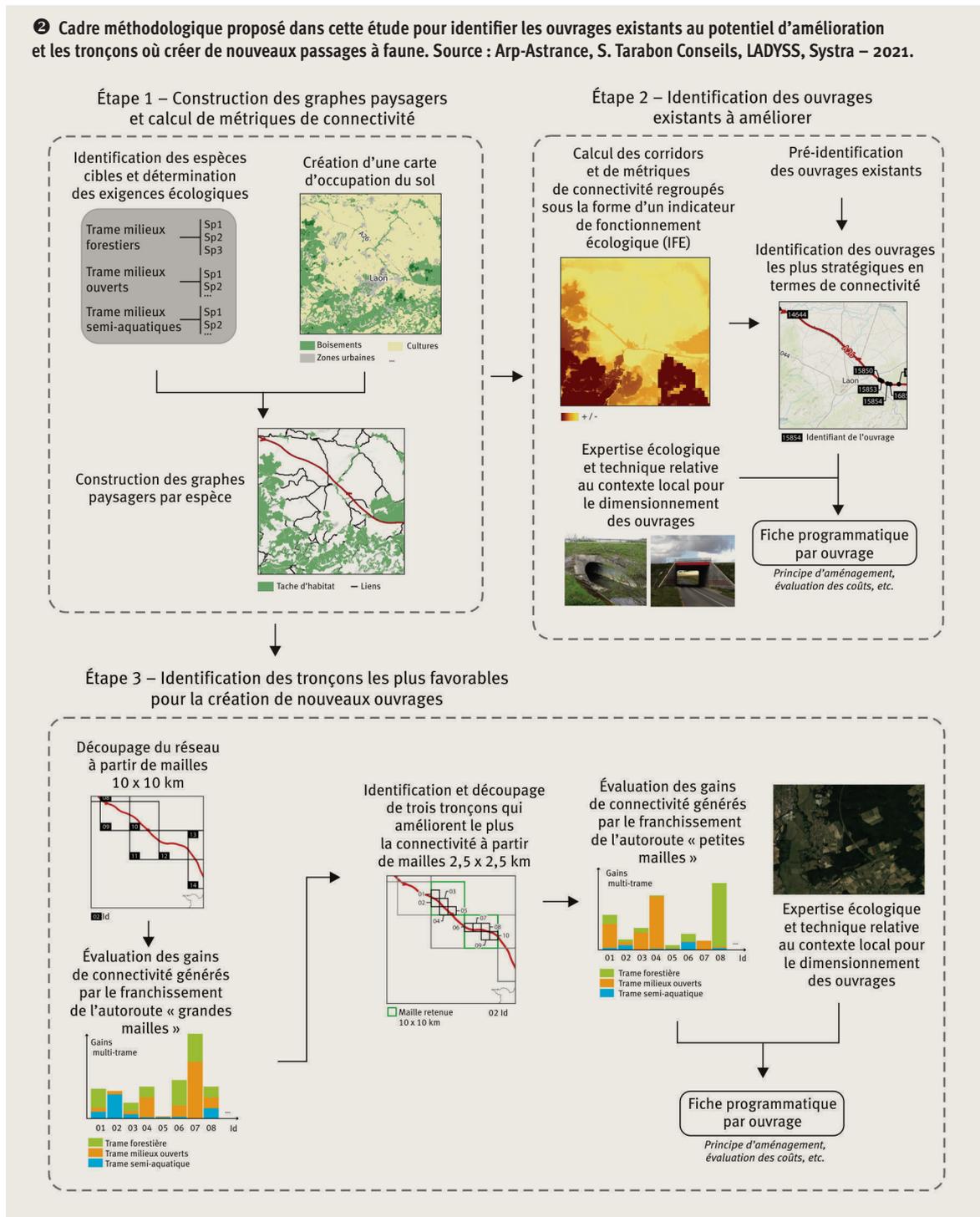
zone d'étude couvre ainsi plus de 95 000 km², soit quasiment un cinquième du territoire métropolitain.

Espèces cibles

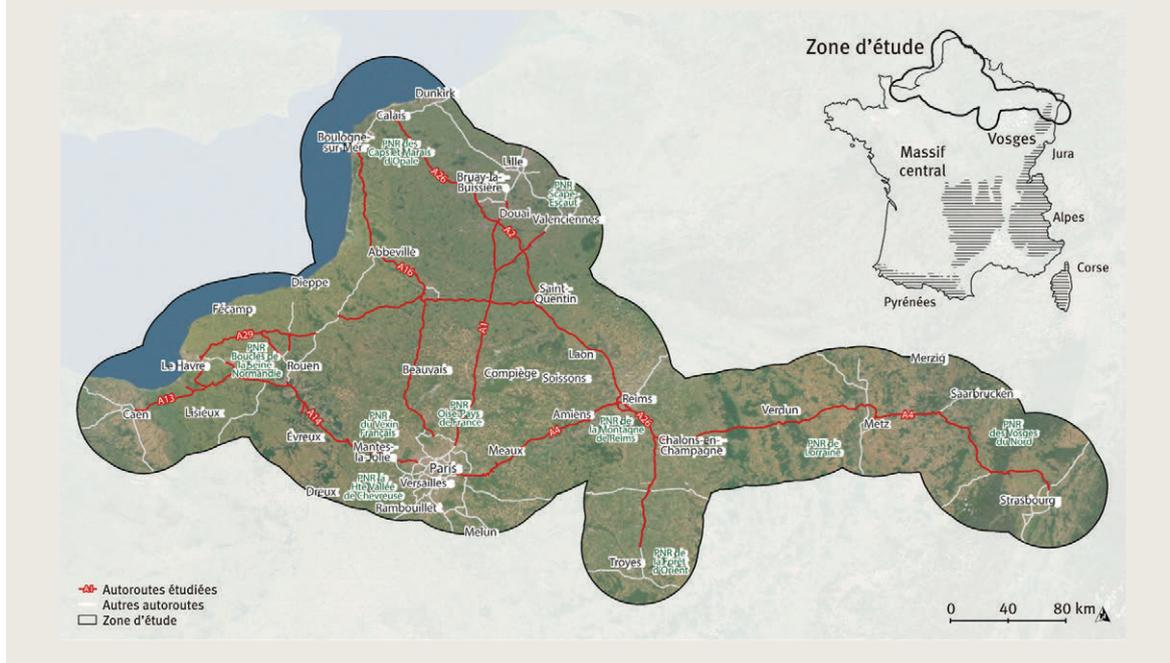
Afin de représenter la diversité d'espèces affectées par les infrastructures autoroutières et répondre à des objectifs de préservation et de restauration des continuités écologiques multi-espèces, nous avons sélectionné un panel d'espèces parapluies et indicatrices de la trame verte et bleue (TVB)³. Neuf espèces de différents groupes taxo-

3. <http://www.trameverteetbleue.fr/documentation/references-bibliographiques/syntheses-bibliographiques-sur-trait-vie-39-especes>

2. Cadre méthodologique proposé dans cette étude pour identifier les ouvrages existants au potentiel d'amélioration et les tronçons où créer de nouveaux passages à faune. Source : Arp-Astrance, S. Tarabon Conseils, LADYSS, Systra – 2021.



3 Zone d'étude englobant le réseau autoroutier du groupe Sanef (en rouge). Source : S. Tarabon Conseils, Arp-Astrance – 2021.



nomiques (mammifères terrestres, reptiles, oiseaux et amphibiens) ont été retenues pour leurs exigences écologiques variées comme leurs préférences d'habitats et leur capacité de dispersion dans le paysage. Ces espèces ont été regroupées en trois groupes associés aux trames forestière, des milieux ouverts et semi-aquatiques (tableau 1). Les paramètres écologiques sont issus de la bibliographie existante, relativement bien documentée pour les espèces faisant partie de la liste de cohérence nationale de la TVB (Sordello *et al.*, 2013). Dans le cadre de cette étude, dix-huit experts naturalistes ou organismes ont été contactés⁴ pour valider les paramètres biologiques considérés dans les modèles et issus de la bibliographie.

Carte d'occupation du sol

La modélisation des réseaux écologiques s'appuie classiquement sur une carte du paysage adaptée à la zone d'étude et construite à partir des données écologiques des espèces cibles. Cette carte doit regrouper différentes catégories d'occupation du sol qui sont classées en fonction de leur degré de résistance aux déplacements des espèces étudiées. Nous avons retenu ici vingt-quatre catégories permettant aussi bien l'identification des habitats préférentiels que ceux qui influencent (favorablement ou défavorablement) les déplacements entre deux taches d'habitats. Nous avons combiné plusieurs bases de données (Carte OSO du Cesbio⁵, BD TOPO[®]

4. Les experts ou organismes ont été contactés pour leur champ de compétence sur nos espèces étudiées.

5. Carte d'occupation des sols du Centre d'études spatiales de la biosphère.

1 Liste des espèces considérées dans cette étude et regroupées en trois groupes distincts en fonction de leur préférence d'habitat. La taille minimum des habitats (Smin) et la capacité de dispersion maximale (Dmax) considérées dans cette étude montrent la diversité des profils écologiques.

Trame	Taxon	Espèces	Dmax	Smin
Trame forestière	Mammifère	Chevreuil européen, <i>Capreolus capreolus</i>	25 km	40 ha
	Mammifère	Chat forestier, <i>Felis silvestris</i>	10 km	100 ha
	Mammifère	Blaireau Eurasien, <i>Meles meles</i>	5 km	2 ha
	Mammifère	Écureuil roux, <i>Sciurus vulgaris</i>	3 km	1 ha
Trame des milieux ouverts	Reptile	Lézard vivipare, <i>Zootoca vivipara</i>	300 m	1 000 m ²
	Mammifère	Lapin de Garenne, <i>Oryctolagus cuniculus</i>	1,5 km	1 ha
	Oiseaux	Pie-grièche écorcheur, <i>Lanius collurio</i>	5 km	1,5 ha
Trame semi-aquatique	Mammifère	Campagnol amphibie, <i>Arvicola sapidus</i>	2 km	1 ha
	Amphibien	Triton crêté, <i>Triturus cristatus</i>	1 km	500 m ²

► de l'IGN⁶, inventaires participatifs des mares⁷ et les données du groupe Sanef sur les ouvrages existants) et produit une carte d'une résolution spatiale de 15 m² afin de représenter les éléments linéaires comme les haies et les ruisseaux qui ont une importance écologique pour certaines espèces⁸.

Construction des graphes paysagers et calcul de métriques de connectivité

La modélisation des réseaux écologiques par la théorie des graphes a été réalisée avec le logiciel en libre accès Graphab (<http://thema.univ-fcomte.fr/productions/graphab/>), créé à l'occasion du programme ITTECOP (Infrastructures de Transports, Territoires, Écosystèmes et Paysages : <http://www.ittecop.fr>). Les nœuds des graphes paysagers ont été définis à partir des catégories d'occupation du sol correspondant aux habitats préférés et les liens identifiés à partir des chemins de moindre coût tenant compte de la perméabilité des milieux traversés et de la distance maximale pouvant a priori être parcouru par les individus entre deux taches d'habitats. Ces graphes paysagers sont le support de calculs de métriques de connectivité présentées en détails ci-après.

Identification des ouvrages à améliorer

Nous avons tout d'abord construit un indicateur de fonctionnalité écologique (IFE) du paysage à partir des corridors de moindre coût et de deux métriques de connectivité (nommées flux d'interaction ; Sahraoui *et al.*, 2017, et centralité intermédiaire ; Bodin et Saura, 2010) interpolées en tout point de l'espace⁹ afin de représenter différents enjeux : la perméabilité de la matrice paysagère, la contribution des taches d'habitats à la connectivité globale et la position centrale des taches dans le réseau. L'objectif de l'IFE est d'identifier les zones les plus stratégiques en termes de connectivité où une amélioration des ouvrages existants serait le plus profitable pour la faune. Ainsi, les métriques ont été calculées pour chaque espèce (c'est-à-dire chaque graphe paysager) et les valeurs ont été standardisées afin d'être agrégées et moyennées par trame puis toutes trames confondues, c'est-à-dire pour l'ensemble des espèces étudiées.

Nous avons ensuite pré-identifié les ouvrages existants avec un potentiel d'amélioration à partir de différents critères. Les ponts et tunnels < 50 m, hors grandes routes fréquentées, ainsi que les buses en béton ou métal¹⁰ d'un diamètre > 1,2 m ont été retenus dans cette étude sur la base des données géoréférencées transmises par le

concessionnaire autoroutier. Les 1 255 ouvrages retenus ont été hiérarchisés sur la base de l'IFE, toutes trames confondues, et les 150 ouvrages avec les valeurs les plus fortes ont fait l'objet d'une analyse technique et paysagère à partir des informations à notre disposition : photos de l'ouvrage, caractéristiques techniques, photos aériennes, etc. L'objectif de cette expertise a été de tenir compte du contexte local, des faisabilités techniques et foncières (profils en travers, éventuelles perturbations à proximité dues à d'autres infrastructures, développement urbain en cours ou à venir, etc.) pour évaluer le potentiel d'amélioration de ces ouvrages. Ainsi, seuls les ouvrages bénéficiant d'une possibilité réelle d'amélioration (voir par exemple figure 4) ont fait l'objet de principes d'amélioration (reconstitution d'un sol, création d'andains, mise en place d'écrans d'occultation, plantations, création de mares à proximité, mise en place de clôtures, informations du public, etc.) et d'un chiffrage des travaux sous la forme de fiches programmatiques.

Identification des tronçons les plus favorables pour créer de nouveaux ouvrages

Nous avons calculé une métrique de connectivité globale sur chaque graphe, l'indice de connectivité équivalente (EC ; Saura *et al.*, 2011) qui repose sur le concept de « quantité d'habitat accessible à l'échelle du paysage » pour une espèce donnée. Cette métrique a permis d'évaluer les gains générés par l'ajout de nouveaux passages à faune sur l'ensemble du réseau autoroutier, pour chaque espèce puis par trame. Nous avons pour cela utilisé la fonction Landmod, disponible en ligne de commande¹¹, pour tester l'effet sur la connectivité d'un ensemble de changements potentiels d'occupation du sol. Les tronçons les plus favorables pour créer de nouveaux ouvrages ont été identifiés en deux temps afin de réduire le temps de calcul et rendre les modélisations possibles à cette échelle et résolution. Nous avons tout d'abord découpé les autoroutes à partir de mailles de 10 × 10 km, donnant ainsi 201 tronçons que nous avons appelés « grandes mailles ». Pour chaque tronçon, un modèle a été créé en ne considérant plus l'autoroute comme un obstacle, mais comme un élément franchissable par la faune. Pour chaque tronçon, les gains de connectivité sont représentés par le taux de variation d'EC, que nous pouvons traduire comme un enjeu de défragmentation. Par exemple, l'enjeu de défragmentation sera faible pour un tronçon bénéficiant déjà d'ouvrages (pont, etc.) favorisant le franchissement de l'autoroute par la faune, alors qu'il sera

6. La BD Topo est la seconde composante du Référentiel à grande échelle produit par l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) français.

7. Inventaires de la Société nationale de la protection de la nature, des régions Grand-Est, Haut-de-France et Normandie.

8. Un travail de hiérarchisation des différentes couches est nécessaire lorsque les données proviennent de différentes sources. Les données les plus précises et les plus importantes dans le déplacement des espèces (en tant qu'effet barrière ou, au contraire, favorisant les mouvements d'individus) doivent être situées au-dessus pour ne pas perdre d'informations déterminantes. Pour un amphibien, par exemple, la carte d'occupation du sol produite ne sera pas nécessairement la même que pour un mammifère terrestre, car pour un amphibien, la continuité créée par un cours d'eau est importante ; pour un mammifère, c'est l'effet obstacle de la route qui est en jeu.

9. Comme précisé dans l'encadré 1, les métriques locales sont calculées au niveau des nœuds et des liens des graphes. L'interpolation spatiale permet d'attribuer les valeurs de connectivité des taches en tout point de l'espace (i.e. à chaque cellule) en utilisant une fonction de pondération décroissante à partir de la bordure des taches.

10. Une intervention sur des ouvrages en béton a été privilégiée pour des questions techniques. Néanmoins, les ouvrages en métal également ont été retenus car beaucoup sont présents sur l'A1 et en très mauvais état. Les intégrer à l'analyse permet de cibler les ouvrages sur lesquels intervenir en priorité. Ce parti pris n'est pas nécessairement celui à prendre en toutes circonstances.

11. https://sourcesup.renater.fr/www/graphab/download/reference_cli-2.2-fr.pdf

④ Exemple de différents scénarios rencontrés dans l'analyse au cas par cas des 150 ouvrages analysés :

a) ouvrage au potentiel d'amélioration en créant par exemple une banquette permettant le franchissement par la faune, b) en améliorant le couvert arbustif à proximité de l'ouvrage pour améliorer son attractivité et c) ceux au potentiel d'amélioration faible du fait d'un niveau de perturbation trop important (mixité d'usage, trafic important, etc.) ou d) du fait d'une fonctionnalité écologique déjà importante.



© Sanef

élevé en l'absence d'ouvrages. Nous avons retenu les 15 tronçons « grandes mailles »¹² les plus favorables pour préciser ensuite, à l'intérieur de ceux-ci, la localisation de potentiels nouveaux ouvrages. Pour cela, nous avons redécoupé ces tronçons prioritaires à partir de mailles de 2,5 x 2,5 km. Soixante-trois tronçons « petites mailles » ont été testés selon le même processus et hiérarchisés par rapport aux gains moyens multi-trames. L'identification des tronçons les plus favorables pour créer de nouveaux ouvrages a conduit à une expertise plus fine de ces secteurs en tenant compte une nouvelle fois du contexte local et des faisabilités techniques. Cette analyse a permis de définir, sous la forme de fiches programmatiques, les caractéristiques techniques minimales des ouvrages à créer et les aménagements à prévoir (similaire aux ouvrages à améliorer) pour garantir une bonne fonctionnalité écologique, une estimation des coûts des travaux et, les études et procédures réglementaires à mener par la suite.

Résultats

Sur les 150 ouvrages existants retenus à partir de l'IFE, ceux identifiés dans les zones les plus stratégiques sur le plan fonctionnel, 41 présentaient selon notre analyse « de terrain » une source de perturbation à proximité ou n'avaient pas une configuration spatiale appropriée pour espérer une amélioration des flux d'individus. Ainsi, 109 ouvrages ont fait l'objet de principes d'amélioration spécifiques, d'une évaluation des coûts des travaux, d'une estimation des diagnostics et procédures préalables requises *a minima*, ainsi que des modalités d'entretiens et du suivi de l'efficacité attendus (figure 5). L'estimation du coût des travaux des ouvrages identifiés (qui ne représente pas la totalité de l'investissement puisque ne tient pas compte du coût des études, des procédures, de la maîtrise d'œuvre et de l'acquisition du foncier) varie entre 15 000 € et 1,42 M€¹³ et représente un coût total de travaux d'environ 9,81 M€.

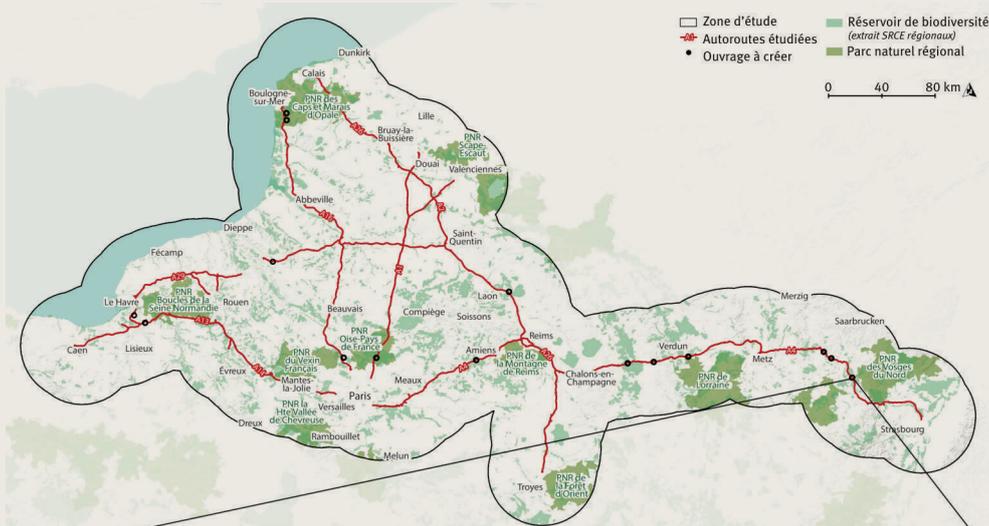
12. Au regard de la zone d'étude, cela représentait le meilleur compromis entre les nouveaux modèles à produire ensuite et les temps de calcul nécessaires.

13. La grande variabilité des coûts d'aménagements estimés s'explique à la fois par la diversité des typologies d'ouvrages à améliorer (passage supérieur, inférieur, fonction hydraulique ou simple servitude agricole, etc.), la nature des aménagements qui peuvent être mis en en fonction des caractéristiques techniques des ouvrages existants et la qualité des milieux aux abords des ouvrages (nécessitant plus ou moins d'aménagements paysagers).

exigences écologiques variées. Les modèles ont été développés à partir d'un panel d'espèces, représentatives de la trame verte et bleue en France, que nous avons regroupées par trame en lien avec leur profil écologique. Ce choix a facilité l'approche multi-espèces et multi-trames dans la spatialisation des gains de connectivité et des scénarios d'aménagement envisagés. Le croisement de ces résultats exploratoires à une expertise opérationnelle pour le dimensionnement des ouvrages représente une véritable plus-value. Il ne s'agit pas simplement de cibler les secteurs à enjeux, mais de proposer une analyse fine à partir de laquelle le contexte local et les contraintes techniques sont pris en compte. Ce travail a mené sur la définition de travaux spécifiques pour 109 ouvrages existants et 15 tronçons où en créer de nouveaux (écoponts

ou écoducs). Les fiches programmatiques pour chaque ouvrage précisent les espèces visées, les principes d'aménagement, l'évaluation des coûts des travaux, les études préalables à mener *a minima*, ainsi que la gestion et le suivi à mener sur le long terme, et offrent ainsi au maître d'ouvrage toutes les clés en main pour améliorer la transparence écologique du réseau autoroutier. La modélisation des réseaux écologiques par la théorie des graphes est connue pour être un bon compromis entre les données nécessaires en entrée (carte d'occupation du sol, données biologiques), les résultats en sortie, mais également pour être facilement mise en œuvre avec des outils en libre accès tel que Graphab. Cette méthode peut néanmoins poser une question de capacité de calcul dès lors que l'emprise de l'étude est

⑥ Synthèse des 16 secteurs pertinents pour créer de nouveaux passages à faune et ayant fait l'objet d'une fiche programmatique (dont le contenu synthétique est rapporté en exemple). Source : S. Tarabon Conseils, Arp-Astrance, LADYSS, Systra – 2021.



Fiche ouvrage – Tronçon n°31

Écopont



1. Piste sableuse, 2. Andains,
3. Prairie maigre et rase,
4. Haie composite et tache pré-forestière

Contexte paysager



Objectif écologique

Améliorer les fonctionnalités écologiques pour la trame forestière et dans une moindre mesure celle des milieux ouverts.

Critères de conception

Géométrie générale

Longueur de l'ouvrage : de l'ordre de 45 m.
Longueur de l'ouvrage : 18 m minimum.
En fonction de la localisation retenue, des remblaiements pourront être nécessaires aux entonnements pour garantir une pente maximale de 25 %, le paysage alentour étant un paysage vallonné.

Aménagement sur l'écopont

Ouvrage étanche et surmonté d'un lit drainant d'une épaisseur de 20 cm.
Épaisseur de terre végétale variable (30 cm pour les graminées/herbacées au centre du tablier sur 10 m de large, et 80 cm pour les plantations arbustives aux abords).
Plantations visant à reconstruire un effet de lisière.
Aménagement d'une mare de 20 cm de profondeur sur le tablier.
Mise en place d'andains de 80 cm de haut et d'écrans d'occultation de 2 m de haut.

Aménagement des abords de l'ouvrage

Renforcer l'écran végétal le long de l'autoroute, constituer des taches de végétation

pré-forestières et créer deux mares étanchéifiées.
Prévoir un alignement de blocs hors tablier pour empêcher l'intrusion de véhicules.
Repositionner la clôture routière pour la relier à l'entonnement de l'ouvrage.
...

Coût estimatif des travaux < 5 M€

Diagnostics et procédures préalables requises *a minima*

Études nécessaires au dimensionnement de l'ouvrage et au choix de solution technique. Diagnostic écologique et environnemental.
Procédures réglementaires requises.

Modalités d'entretien

Fauchage tardif à prévoir annuellement à l'entrée de l'ouvrage et recapeage des arbustes les cinq premières années. Surveillance et entretien annuels des mares et des clôtures.

Suivi de l'efficacité

Piégeage photographique en partie centrale et sur chaque entonnement.

► grande, la résolution fine et le nombre de graphes à tester important. Dans cette étude, tous les calculs ont été optimisés par parallélisation en utilisant une architecture multi-processeurs et multi-cœurs, permis par le recours à des serveurs informatiques. Si les calculs sont impossibles dans d'autres études similaires, i) la résolution spatiale de la carte d'occupation du sol peut être dégradée, mais le niveau de détails ne sera pas équivalent, ii) et/ou les modèles peuvent être construits à l'échelle de sous-réseaux, à condition que les résultats soient standardisés pour être comparables sur l'ensemble de la zone d'étude initiale.

Cette étude innovante à visée opérationnelle constitue une véritable aide à la décision pour le maître d'ouvrage et les services de l'État, soucieux d'améliorer le franchissement des infrastructures de transport par la faune. La modélisation des réseaux écologiques et des emplacements pertinents pour améliorer ou créer de nouveaux ouvrages à faune ouvre ainsi des perspectives intéressantes, que ce soit en amont ou en aval des projets de construction des infrastructures. Nous montrons par l'approche présentée l'importance de l'expertise de terrain en consolidation des modèles, aussi bien au moment des études opérationnelles que lors du suivi à moyen et long terme pour s'assurer de l'efficacité des ouvrages. ■

Les auteurs

Claire GODET et Tolga COSKUN

Arp-Astrance, F-75008 Paris, France.

✉ godet.claire9@gmail.com

✉ tcoskun@arp-astrance.com

Simon TARABON

(auteur correspondant)

Ubiquiste, F-69100 Villeurbanne, France.

✉ s.tarabon@ubiquiste.fr

Céline CLAUZEL

LADYSS, UMR 7533 CNRS, Université de Paris,

F-75013 Paris, France

✉ celine.clauzel@u-paris.fr

Suzanne LIAGRE

Systra, F-75015 Paris, France

✉ sliagre@systra.com

EN SAVOIR PLUS...

- 📄 **BODIN, Ö., SAURA, S.,** 2010, Ranking individual habitat patches as connectivity providers: integrating network analysis and patch removal experiments, *Ecological Modelling*, vol. 221, n° 19, p. 2393-2405, ✉ <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.06.017>
- 📄 **DENNEBOOM, D., BAR-MASSADA, A., SHWARTZ, A.,** 2021, Factors affecting usage of crossing structures by wildlife—a systematic review and meta-analysis, *Science of The Total Environment*, vol. 777, 146061, ✉ <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146061>.
- 📄 **KARLSON, M., SEILER, A., MÖRTBERG, U.,** 2017, The effect of fauna passages and landscape characteristics on barrier mitigation success, *Ecological Engineering*, vol. 105, p. 211-220, ✉ <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.04.059>
- 📄 **MIMET, A., CLAUZEL, C., FOLTÊTE, J.-C.,** 2016, Locating wildlife crossings for multispecies connectivity across linear infrastructures, *Landscape Ecology*, 31, p. 1955-1973, ✉ <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01297307>
- 📄 **SAHRAOUI, Y., FOLTÊTE, J. C., & CLAUZEL, C.,** 2017, A multi-species approach for assessing the impact of land-cover changes on landscape connectivity, *Landscape ecology*, 32, p. 1819-1835, ✉ <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01577903>
- 📄 **SORDELLO, R., CONRUYT-ROGEON, G., MERLET, F., HOUARD, X., & TOUROULT, J.,** 2013, *Synthèses bibliographiques sur les traits de vie de 39 espèces proposées pour la cohérence nationale de la Trame verte et bleue relatifs à leurs déplacements et besoins de continuité écologique*, Muséum national d'histoire naturelle (MNHN)-Service du Patrimoine naturel et Office pour les insectes et leur environnement (Opie), 20 p. + 39 fiches, ✉ <http://www.trameverteetbleue.fr/documentation/references-bibliographiques/syntheses-bibliographiques-sur-traits-vie-39-especes>
- 📄 **TARABON, S., THEURIAU, F., BERGES, L., DUTOIT, T., ISSELIN-NONDEDEU, F.,** 2020, Améliorer la prise en compte des fonctionnalités écologiques dans la séquence Éviter-Réduire-Compenser, *Sciences, Eaux & Territoires*, article hors-série n° 61, 8 p., ✉ <http://www.set-revue.fr/ameliorer-la-prise-en-compte-des-fonctionnalites-ecologiques-dans-la-sequence-eviter-reduire>
- 📄 **ZHANG, B., TANG, J., WANG, Y., ZHANG, H., WU, D., XU, G., LIN, Y., WU, X.,** 2019, Designing wildlife crossing structures for ungulates in a desert landscape: A case study in China, *Transportation research part D: transport and environment*, vol. 77, p. 50-62, ✉ <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2019.10.015>