

R A P P O R T
Retour d'expérience n°2
des aménagements
et des suivis faunistiques
sur le réseau
VINCI Autoroutes

REMERCIEMENTS:

VINCI Autoroutes tient à remercier l'ensemble des 43 partenaires impliqués dans le suivi des aménagements et grâce auxquels ce second retour d'expérience a pu voir le jour:

- Les agents d'environnement de Cofiroute;
- Biotope;
- CEN PACA;
- CERA Environnement (Adeline GROSJEAN, Benoît ROCHELET);
- Cistude Nature (Christophe COÏC, Thomas RUYS, Philippe LEGAY, Jean-Baptiste PONS, Akaren GOUDIABY);
- CPIE Loire Anjou (Thomas ROCHARD);
- CPIE Seignanx et Adour (Frédéric CAZABAN, Elisabeth MERCADER, Benoît LUYER TANET, Rachel CELO);
- Écologistes de l'Euzière (Clément LEMARCHAND, Yann SCHNEYLIN);
- ECO-MED;
- Écosphère;
- Egis environnement;
- Eure-et-Loir Nature (Eva CHERAMY);
- Fédération Départementale des Chasseurs d'Indre-et-Loire (Jérémy DEMOIS);
- Fédération Départementale des Chasseurs de l'Aude (Emma ROBERT, Garance GAUTHEROT);
- Fédération Départementale des Chasseurs de Charente-Maritime (David MARC, François RODRIGUEZ);
- Fédération Départementale des Chasseurs de Corrèze (Fred MAURY, Elisa CHALAUD);
- Fédération Départementale des Chasseurs de Dordogne (Mickaël BALAINE, Laetitia DEVILLE);
- Fédération Départementale des Chasseurs d'Eure-et-Loir (Valentin BARON);
- Fédération Départementale des Chasseurs de la Drôme (Jérôme GUILLOUD, Christophe MATHEZ);
- Fédération Départementale des Chasseurs des Landes (Jérôme CASTETS);
- Fédération Départementale des Chasseurs de la Loire (Claire BOYER, Rémi SCHMIDT, Frank VITAL);
- Fédération Départementale des Chasseurs du Puy-de-Dôme (Bérangère GROSBETY, Gilles GUILHOT);
- Fédération Départementale des Chasseurs du Rhône (François BRIDE);
- Fédération Départementale des Chasseurs des Pyrénées-Atlantiques (Christian PEBOSCQ, Lionel DAGUERRE);
- Fédération Départementale des Chasseurs de Vendée (Pascal BONNIN);
- Fédération du Puy-de-Dôme pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique (François DESMOLLES, Lilian BONNAFOUX);
- FRAPNA Loire (Mélanie HIGOA, Ludovic TAILLAND);
- FRAPNA Rhône (Julien BOUNIOL);
- GMHL (Cristian ESCULIER, Julien JEMIN, Manon DEVAUD, Claire CALDIER, Marie ABEL, François ALLONCLE, Gabriel METEGNIER);
- GREGE (Pascal FOURNIER et son équipe);
- LOGRAMI (Aurore BAISEZ, Quentin MARCON, Jean-Michel BACH);
- LPO Auvergne (Pierre TOURRET, Sabine BOURSANGE, Romain RIOLS);
- LPO France (Sylvain FAGART, Gwenaël QUAINTEENNE, Thierry MICOL);
- LPO Anjou (Benjamin MEME-LAFOND, Kévin LHOYER);
- LPO Drôme (Sébastien BLACHE, Alexandre MOVIA, Stéphane VINCENT);
- LPO Loire (Bertrand TRANCHAND, Emmanuel VERICEL);
- LPO Rhône (Aurélien SALESSE, Christophe D'ADAMO, Patrice FRANCO);
- LPO PACA (Aurélien JOHANET, Nicolas FUENTO);
- LPO Sarthe (Frédéric LECUREUR, Julien MOQUET);
- Naturalia-Environnement (Fabien CLAIREAU, Célia LHERONDEL, Guilhem BATTISTELLA);
- Nature en Occitanie (Ghislain RIOU, Hélène DUPUY, Pascale MAHE, Aurélien NARS);
- SCIMABIO Interface (Yann ABDALLAH, Arnaud CAUDRON, Julien BERGE, Marc Antoine COLLEU, Leny RIMBERT);
- SEPANT (Damien AVRIL);
- Sologne Nature Environnement (Angélique VILLEGGER);
- Fanny CAZENAVE (Stagiaire au sein de la Direction Technique de l'Infrastructure ASF*).

Rédacteurs :

Sylvain FAGART¹,
Jean-Pierre VACHER³,
Philippe CHAVAREN²,

Gwenaël QUANTENNE¹,
Mathieu BOURBOULON²,
Éric GUINARD⁴

Avec la participation de :

Claude MIAUD³,
Géraldine AUDIE-LIEBERT⁴,
Cédric HEURTEBISE²,
Arnaud GUILLEMIN²,
Pascal FOURNIER⁵,

Aurélien BESNARD³,
Virginie BILLON⁴,
Solange ALTAZIN²,
Caryl BUTON⁶,
Jean CARSIGNOL

Contributeurs aux retours d'expériences spécifiques :

SCIMABIO Interface: Yann ABDALLAH, Arnaud CAUDRON, Julien BERGE
NATURALIA Environnement: Fabien CLAIREAU
GREGE: Pascal FOURNIER

1. LPO France

2. VINCI Autoroutes

3. Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive (UMR du CNRS)

4. CEREMA

5. GREGE

6. Cabinet X-AEQUO

AVERTISSEMENT AU LECTEUR :

Ce rapport fait suite au premier retour d'expérience publié en juin 2016, *Restauration des continuités écologiques sur autoroutes – Retour d'expérience des aménagements et des suivis faunistiques sur le réseau VINCI Autoroutes*.

Il apporte notamment des compléments sur les facteurs qui conditionnent l'utilisation des passages à faune et tente, par l'analyse statistique, de répondre à la question beaucoup plus complexe de l'efficacité de ces aménagements.

Le premier rapport reste cependant le document de référence pour tout lecteur à la recherche d'éléments techniques sur la construction de tels ouvrages (cf. Fiches méthodologiques).

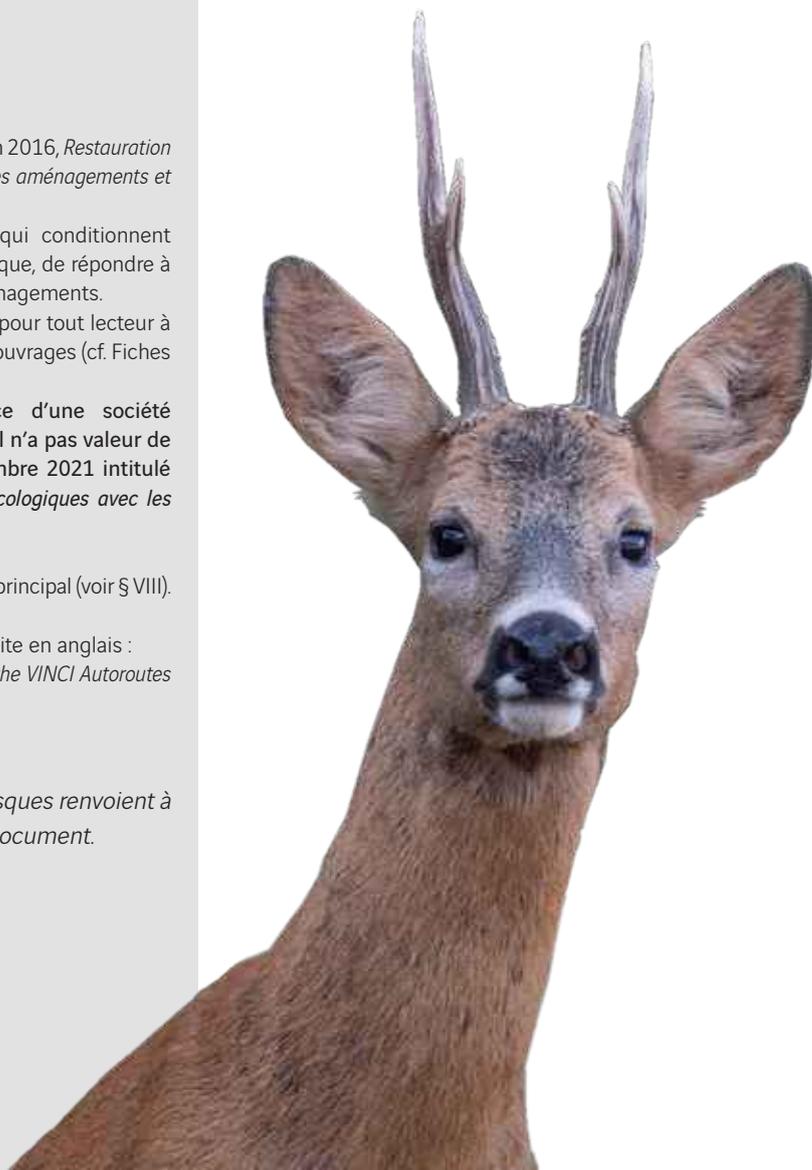
Il s'agit ici encore de partager le retour d'expérience d'une société concessionnaire d'autoroutes et de ses partenaires. En cela, il n'a pas valeur de guide, comme peut l'être celui du CEREMA* paru en décembre 2021 intitulé *Les passages à faune - Préserver et restaurer les continuités écologiques avec les infrastructures linéaires de transport*.

Trois rapports spécifiques sont publiés en parallèle de ce rapport principal (voir § VIII).

Ce document est également disponible dans une version traduite en anglais :
« *Feedback on experience 2: Wildlife structures and monitoring on the VINCI Autoroutes network, 2023* ».

*: Un glossaire est disponible en fin d'ouvrage. Les astérisques renvoient à la définition du mot associé, dans le glossaire en fin du document.

Photo de couverture : © Emmanuel RONDEAU



Les infrastructures de transport telles que les autoroutes ont des effets documentés sur les populations animales en jouant, par exemple, un rôle de barrière à la dispersion des individus. La réduction de cet effet peut passer par la réalisation de passages à faune. Ces ouvrages sont intégrés dans les projets d'infrastructure, car leurs emplacements – sous réserve des conditions techniques permettant leur construction – sont définis sur des critères biologiques comme la présence de voies de migration et/ou les déplacements connus des animaux ou encore par la présence d'environnements susceptibles d'être favorables à ces déplacements (présence de boisements, de zones humides, etc.).

Une fois implantés, ces ouvrages doivent présenter des caractéristiques favorables à leur fréquentation par des communautés plus ou moins spécifiques (p. ex. Mammifères, Reptiles, etc.). Enfin, étant donné le coût des infrastructures de transport pour les populations animales et pour l'aménagement de ces passages à faune, il est évidemment nécessaire d'en évaluer l'efficacité.

Publié en 2016, le rapport *Retour d'expérience des aménagements et des suivis faunistiques sur le réseau VINCI Autoroutes* décrit les caractéristiques techniques de l'implantation de 96 aménagements de différentes catégories (p. ex. écoponts, écoducs, ouvrages hydrauliques aménagés, chiroducs, passages mixtes, passes à poissons, sans oublier les systèmes de guidage comme les clôtures et palissades). Mais encore les méthodes de suivi de la fréquentation par la faune (Mammifères, dont Chiroptères, Oiseaux, Reptiles, Amphibiens) à l'aide d'un panel de méthodologies (enregistreurs photographiques, captures, prospections, etc.) et l'analyse des données récoltées pendant cinq années successives.

Ce rapport est un document de référence en écologie routière, amenant une quantité et une diversité d'informations inédites sur le suivi de la faune fréquentant les passages à faune. Les données de fréquentation sont principalement des nombres de passages détectés et des nombres de refus (grâce aux positionnements des détecteurs). La diversité des situations et des méthodes utilisées limite les possibilités d'interprétations plus généralistes comme l'influence des paramètres structurels (types et dimensions des ouvrages) et écologiques (environnements paysagers des ouvrages).

La corrélation positive observée entre le nombre de passages détectés et le nombre de jours de suivis réalisés montre bien la nécessité de consolider ces suivis. Un apport considérable de ce rapport est le retour d'expérience sur les méthodes de suivi de la faune utilisées, ainsi que l'expression des besoins de nouveaux développements méthodologiques exprimés par la description de suivis spécifiques (pièges à traces, détection des Amphibiens et des Chiroptères, suivi des Micromammifères, passes à poissons).

La difficulté de l'évaluation de l'efficacité des passages à faune provient de plusieurs facteurs concomitants. Le premier relève de la biologie des espèces susceptibles d'utiliser ces ouvrages. La présence d'une infrastructure de transport dans le domaine vital des animaux est susceptible d'impacter leur dispersion (c'est-à-dire le mouvement des individus de leur aire de naissance vers une autre aire pour leur première reproduction ou entre deux aires de reproductions successives), ou d'autres mouvements, par exemple saisonniers, avec des allers et retours entre les aires de nourrissage et d'hivernation.

Ces mouvements peuvent varier au cours du cycle vital des animaux (p. ex. différés entre les juvéniles, les adultes ou entre les sexes). On comprend donc que la fréquentation d'un passage à faune par

une espèce à un stade et à une période donnée relève de processus biologiques complexes, peu transposables d'une espèce à une autre, voire d'un contexte de l'implantation d'un ouvrage à un autre. Les capacités cognitives des animaux s'expriment également particulièrement dans leur capacité à évaluer leur environnement, et la présence d'un passage à faune est un élément du paysage qu'ils évaluent dans leur choix de déplacement au sein de leurs domaines vitaux. La deuxième difficulté relève de la méthode scientifique. Le test de l'efficacité des différentes caractéristiques des passages à faune (p. ex. longueur, largeur, substrats, etc.) devrait relever d'expériences comparant des ouvrages de caractéristiques variées dans des contextes similaires. On comprend bien que cela n'est pas possible du fait du dimensionnement de ces ouvrages. Les seules expérimentations qui ont pu être réalisées concernent de « petits » tunnels

où les facteurs comme la lumière, l'humidité ou la nature du substrat ont été testés. Quand l'expérimentation n'est pas possible, la méthode consiste à récolter suffisamment de données pour étudier les relations entre les caractéristiques (p. ex. des ouvrages) avec le paramètre d'intérêt (p. ex. la fréquentation par la faune) par des approches corrélatives. La difficulté principale est alors d'avoir suffisamment de données pour que les corrélations observées puissent être interprétées en relations de causalité.

Ce second rapport, *Retour d'expérience des aménagements et des suivis faunistiques sur le réseau VINCI Autoroutes, 2023*, s'inscrit justement dans cette approche. Il rapporte le résultat de 10 ans de suivis faunistiques réalisés entre 2011 et 2021 sur 180 ouvrages répartis sur 21 autoroutes du réseau VINCI Autoroutes et ses trois sociétés concessionnaires : ASF (139 ouvrages), Cofiroute (35 ouvrages) et



Figure 1: Cerf élaphe traversant l'écopont de la Forêt de la Lande (A10) ©E. RONDEAU



© E. Rondeau

“ résultat de 10 ans de suivis faunistiques sur 180 ouvrages du réseau VINCI Autoroutes. ”

Escota (6 ouvrages), ainsi que la mobilisation de 42 partenaires techniques et scientifiques ayant conduit à la collecte de plus de 125 000 données d'observation de la faune sur et à proximité de ces ouvrages.

Ce rapport complète les recommandations pratiques du retour d'expérience de 2016 (p. ex. sur le choix de l'emplacement des ouvrages et leurs caractéristiques techniques, largement illustré), replace ces ouvrages dans leur contexte paysager suivant une description standardisée, et présente le suivi de la fréquentation des ouvrages en dégagant clairement ce qui relève des objectifs, des protocoles, des analyses et des résultats.

Le lecteur trouvera ainsi des descriptions très précises des protocoles pour les différents suivis réalisés (capteurs, pièges, détecteurs, etc.) grâce à un effort de terrain remarquable. 34 taxons de Mammifères (principalement déterminés au niveau de l'espèce et excluant les espèces domestiques) ont été détectés, en premier lieu des espèces considérées comme communes telles que le Blaireau européen, le Renard roux et le Chevreuil, et des espèces plus rares comme la Loutre d'Europe et l'Hermine. Cette fréquentation est décrite suivant l'heure et la phénologie des espèces, en fonction de la présence d'autres espèces (en particulier les Hommes et les espèces domestiques), les types d'ouvrages et leurs caractéristiques.

Au-delà de la fréquentation des ouvrages eux-mêmes, la somme des données accumulées permet de tester des hypothèses sur l'influence des variables paysagères (densités de routes, de haies, de rivières, etc.) sur la fréquentation des ouvrages situés à proximité pour les espèces où

le plus de données ont pu être récoltées. Cette approche fait rentrer ce rapport dans une liste restreinte de travaux en écologie de la route allant vers l'analyse des variables explicatives de la fréquentation des ouvrages. Les limites sont aussi présentées, car malgré la quantité de dispositifs suivis, on observe une certaine standardisation qui se prête mal aux tests, notamment pour la fréquentation des ouvrages en fonction de leur dimensionnement.

Le travail réalisé dans ce rapport est donc considérable par sa conception, son organisation, son animation, sa réalisation et sa valorisation. L'effort également réalisé pour sauvegarder les données acquises dans une base de données est également à souligner, et montrera certainement à l'avenir son utilité. On ne peut que lui souhaiter le même succès que le retour d'expérience 2016, et son appropriation par les différents acteurs responsables de la conception, réalisation et évaluation des passages à faune.

Je me permets un message plus personnel de remerciements aux personnes à l'origine de l'ensemble de ce travail – elles se reconnaîtront –, qui illustre l'intérêt d'une approche collaborative sur ces questions complexes d'évaluation environnementale. On peut espérer qu'il s'agit là d'une démarche modèle qui se poursuivra dans le domaine des infrastructures de transports, mais aussi dans les autres projets d'aménagement du territoire.

Claude Miaud

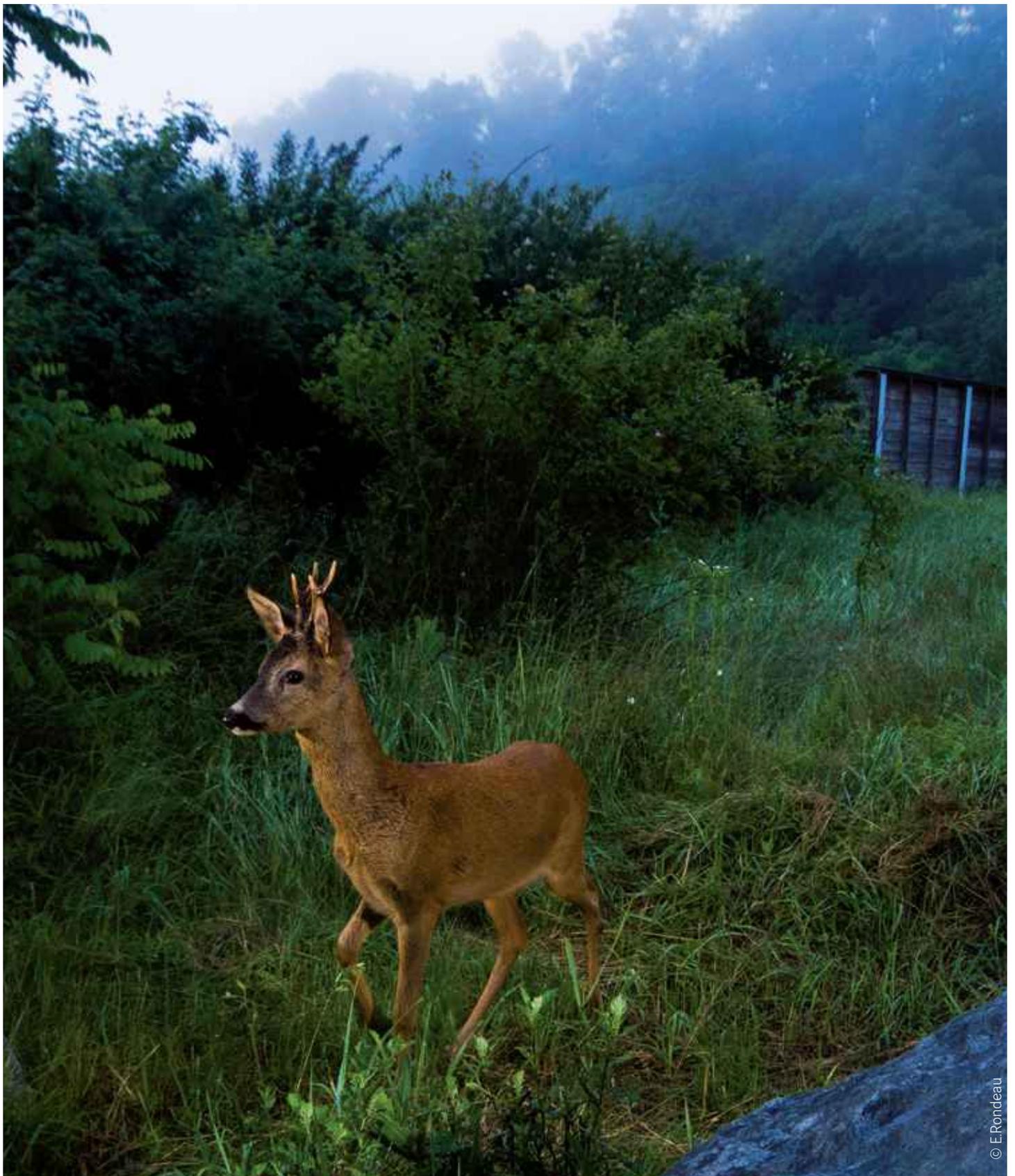
Directeur d'études à L'École pratique des hautes études

Montpellier, le 1^{er} décembre 2022

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE	4
I. CONTEXTE	11
1.1. Dans la continuité du premier retour d'expérience <i>rex 1</i> publié en 2016	11
1.2. Fondement législatif et politiques publiques	13
1.2.1. Évolution des SRCE vers les SRADDET	13
1.2.2. La loi biodiversité 2016	13
1.2.3. Une démarche inscrite dans les politiques publiques	14
II. CONSTRUCTION DES OUVRAGES	15
2.1. Choix de l'emplacement des passages à faune	15
2.2. Retour d'expérience sur les techniques de construction et de génie écologique des écoponts	16
2.2.1. Les techniques de construction des écoponts	16
2.2.2. Les techniques de génie écologique sur écopont	23
2.3. Retour d'expérience sur différents cas particuliers d'aménagements	33
2.3.1. Utilisation de substrat dans les écoducs	33
2.3.2. Les aménagements piscicoles	33
2.3.3. Les chiroducts	36
2.3.4. Les bioducs	36
2.3.5. Focus sur le jumelage de deux passages à faune de deux infrastructures parallèles : écopont du Bas-Bry au-dessus de l'A10 et de la ligne TGV	40
2.4. Entretien des ouvrages et aménagements	40
III. BASE DE DONNÉES DES OUVRAGES SUIVIS	43
3.1. Typologie et caractéristiques des ouvrages suivis	43
3.1.1. Ouvrages suivis retenus	43
3.1.2. Typologie des ouvrages	43
3.1.3. Paramètres retenus décrivant les ouvrages	43
3.2. Environnement des ouvrages suivis	46
IV. SUIVI DE LA FRÉQUENTATION DES OUVRAGES : OBJECTIFS, PROTOCOLES ET ANALYSES	47
4.1. Les objectifs	47
4.2. Les protocoles mis en place pour les suivis VINCI Autoroutes	49
4.2.1. Protocoles mis en place pour les ouvrages suivis par pièges photographiques (hors écopont)	49
4.2.2. Protocoles mis en place pour les suivis d'écoponts	50
4.3. Description des suivis	50
4.3.1. Organismes en charge des suivis	50
4.3.2. Description des périodes et durées des suivis	52
4.3.3. Description du matériel : pièges photographiques déployés	52
4.4. Modélisation de l'occurrence hebdomadaire des espèces dans les passages à faune	55
V. INFLUENCE DE LA CONCEPTION ET DE L'ENVIRONNEMENT DES OUVRAGES	57
5.1. Résultats introductifs : quelles espèces utilisent les ouvrages ?	57
5.2. Les dimensions des ouvrages ont-elles un impact sur la fréquentation par la faune ?	65
5.3. Quel dimensionnement pour un écopont ?	65
5.4. Les différents types d'ouvrages influencent-ils la fréquentation de la faune ?	67
5.5. Les passages inférieurs peuvent-ils contribuer au passage des chiroptères ?	72
5.6. Le paysage à proximité des aménagements a-t-il une influence sur la fréquentation des ouvrages par la faune ?	72
5.7. La présence de cours d'eau a-t-elle un effet sur la fréquentation ?	75
5.8. Quelle est l'aire d'influence d'un passage à faune ?	75

VI. INFLUENCE DE L'ÉCOLOGIE DES ESPÈCES (SAISONNALITÉ, INTERACTION, COMPORTEMENT)	77
6.1 La fréquentation des ouvrages par les humains ou la faune domestique a-t-elle un impact sur la fréquentation des ouvrages par la faune sauvage ?	77
6.2 Y a-t-il une saisonnalité observée dans les passages ?	79
6.3 La présence d'un piège photographique impacte-t-elle le comportement des animaux empruntant l'ouvrage ?	80
VII. AMÉLIORATIONS DES PROTOCOLES	81
7.1. Optimisation des suivis par pièges photographiques	81
7.1.1. Pose des pièges photographiques : recommandations détaillées	81
7.1.2. Quelques expérimentations à développer	82
7.1.3. Vers une standardisation de saisie semi-automatique et une gestion optimale des données récoltées	84
7.2. Dimensionnement des protocoles de capture-marquage-recapture (CMR) pour le suivi des aménagements pour la petite faune	86
7.2.1. Problématique	86
7.2.2. Recommandations pour l'élaboration des suivis de dispositifs de franchissement par identification des individus (CMR, RFID, pièges photographiques)	87
7.3. Questions/réponses en lien avec les protocoles :	89
7.3.1 Le piège photographique sous-estime-t-il le nombre de passages dans l'ouvrage ?	89
7.3.2 Impact de l'utilisation d'un relief de marquage devant les pièges photographiques	90
7.3.3 Comment traiter l'indépendance de passages successifs ?	90
7.3.4 Quelle période, durée et fréquence pour les suivis faunistiques d'aménagements ?	90
VIII. FOCUS SUR LES RÉSULTATS DE SUIVIS SPÉCIFIQUES	93
8.1. Suivis piscicoles	93
8.1.1. Suivi par radiotélémetrie - évaluation du franchissement des aménagements du seuil A89 sur la rivière Allier par le Saumon Atlantique (Puy-de-Dôme,63)	93
8.1.2. Suivis par la technologie RFID - évaluation du franchissement piscicole de la buse OH 448 de l'A89 sur la Durole (Puy-de-Dôme, 63)	94
8.2. Suivis chiroptérologiques	95
8.3. Suivis micromammifères	97
8.3.1. Suivi de l'utilisation d'une encoche à micromammifères intégrée dans une banquette sur l'A89.	97
IX. PERSPECTIVES : VERS DE NOUVEAUX OBJECTIFS ET SUIVIS ADAPTÉS	99
9.1. Les différentes problématiques de suivi	99
9.2. Quelle méthodologie pour quels objectifs ?	101
X. ANNEXES	105
GLOSSAIRE	111
BIBLIOGRAPHIE	112
DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE	115



© E.Rondeau

“ L’implication du Centre d’Écologie Fonctionnelle et Évolutive a permis de valoriser une base de données conséquente et inédite. ”

1.1. DANS LA CONTINUITÉ DU PREMIER RETOUR D'EXPÉRIENCE REX 1 PUBLIÉ EN 2016

Le premier plan de relance économique de 2008 a été l'occasion pour VINCI Autoroutes de proposer à l'État un programme dédié à la préservation de la biodiversité, le Paquet Vert Autoroutier (2009-2012), axé sur la restauration des continuités écologiques grâce à la construction de passages à faune. Cette expérience d'aménagements et de suivis faunistiques a été partagée dans un rapport (dénommé *Rex 1** dans le présent document) publié en juin 2016 sous le titre : *Restauration des continuités écologiques sur autoroutes – Retour d'expérience des aménagements et des suivis faunistiques sur le réseau VINCI Autoroutes*.

Ce document est téléchargeable sur le site internet du Centre de ressources pour la mise en œuvre de la Trame verte et bleue : <https://www.trameverteetbleue.fr/documentation/references-bibliographiques/retour-experience-amenagements-suivis-faunistiques-sur>.

Fort de ces premiers résultats, de nouveaux programmes ont suivi, toujours dans le cadre d'opportunités décidées conjointement avec l'État, à savoir le Contrat de Plan (2012-2016), le Plan de Relance Autoroutier (2016-2020), le Plan d'Investissement Autoroutier (2018-2021), mais également dans le cadre de projets neufs ou d'élargissements tels que le dédoublement et le déplacement de l'A9 au droit de Montpellier (2017) ou du contournement ouest de Strasbourg sur l'A355 (2021).

Au total, plus d'une centaine d'ouvrages dédiés à la faune sont venus compléter ceux du premier programme, le Paquet Vert Autoroutier (PVA). **Ces ouvrages ont fait l'objet de suivis impliquant 38 partenaires techniques et scientifiques locaux et ont abouti à la collecte de plus de 125 000 données.**



Des suivis spécifiques ont également été lancés sur des ouvrages dédiés à la faune piscicole, aux Micromammifères semi-aquatiques et aux Chiroptères.

Le présent document (dénommé *Rex 2**) présente le bilan des suivis faunistiques réalisés sur l'ensemble des ouvrages réalisés depuis 2009, intégrant ceux du PVA, soit plus de 180 ouvrages. L'implication d'un nouveau partenaire scientifique, le Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive UMR 5175 (CEFE*) de Montpellier, a permis de valoriser, grâce à l'analyse statistique, une base de données conséquente et inédite. Certaines questions comme l'influence des paramètres liés aux ouvrages et à leur environnement sur leur utilisation par la faune sauvage ont pu ainsi être approfondies et des réponses sur des questions nouvelles, notamment sur l'efficacité de ces aménagements, ont pu être apportées.

À l'appui de 10 ans de suivis faunistiques sur un grand nombre d'ouvrages, le document propose des recommandations pratiques, des conseils d'utilisation des techniques et des protocoles d'évaluation, et suggère des améliorations.

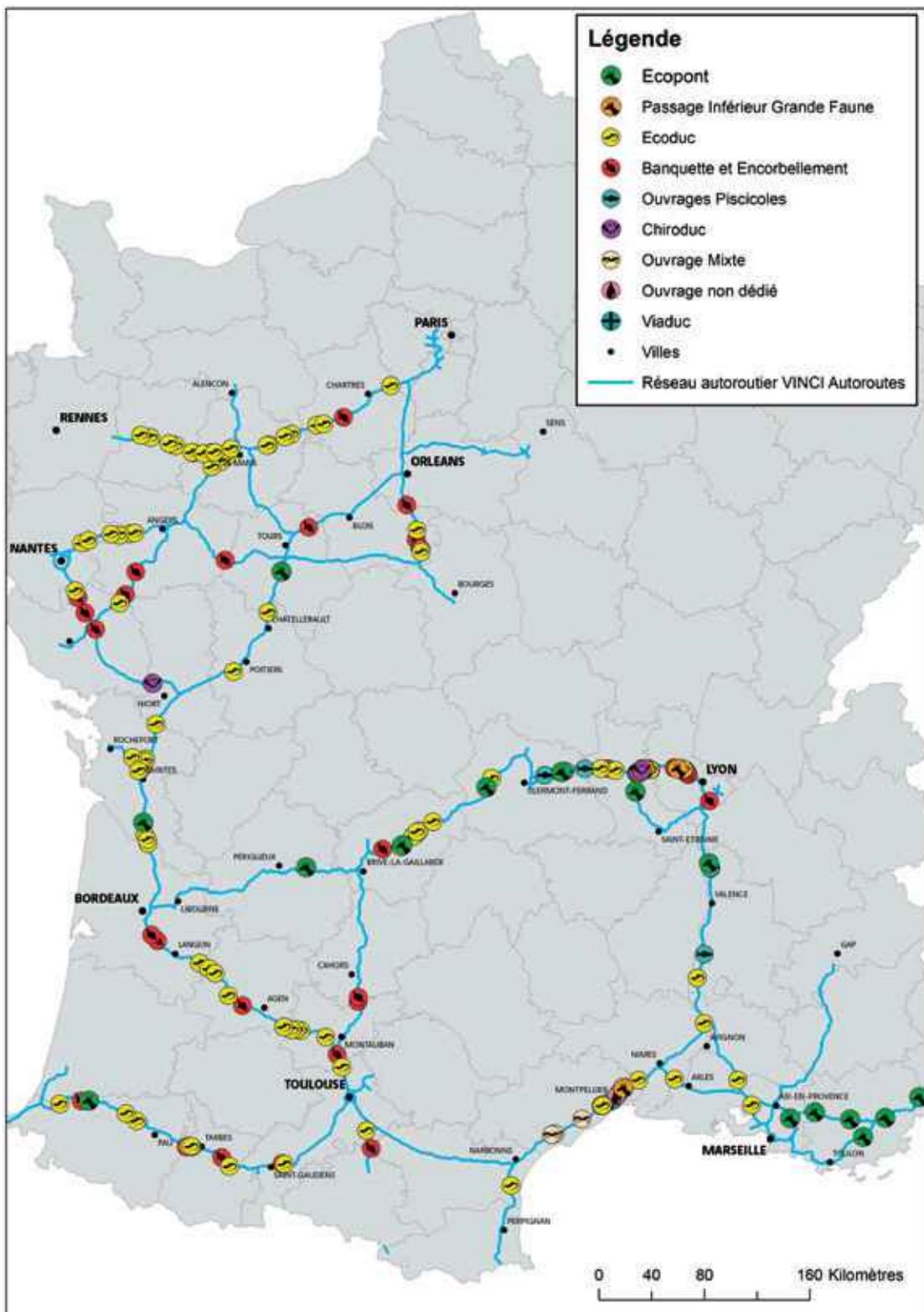


Figure 2 : Le réseau VINCI Autoroutes (4 443 kilomètres d'autoroutes en 2022) et la localisation des 190 passages à faune : 91 écoducs, 39 aménagements au sein d'ouvrages hydrauliques (banquette et encorbellement), 20 ouvrages non dédiés, 15 écoponts, 7 aménagements piscicoles, 6 ouvrages mixtes, 5 passages inférieurs grande faune, 4 viaducs et 3 chiroducs construits dans le cadre des programmes de requalification.

1.2. FONDEMENT LÉGISLATIF ET POLITIQUES PUBLIQUES

1.2.1. ÉVOLUTION DES SRCE VERS LES SRADDET

Au-delà de la Loi n° 1976-629 du 10 juillet 1976 relative à la Protection de la Nature, les lois fondatrices concernant les continuités écologiques sont issues du Grenelle de l'Environnement :

1. la Loi de programmation n° 2009-967 du 3 août 2009 de mise en œuvre du Grenelle de l'environnement dite « Loi Grenelle 1 » qui a instauré en droit français la Trame verte et bleue et la mise en place des Schémas Régionaux de Cohérence Écologique (SRCE) qui vise à la préservation et à la remise en bon état des continuités écologiques, en luttant contre la fragmentation des espaces naturels.
2. La Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant un engagement national pour l'environnement dite « Loi Grenelle 2 » a précisé les applications découlant de la « Loi Grenelle 1 » : elle prévoit l'élaboration d'orientations nationales pour la préservation et la remise en bon état des continuités écologiques, ces orientations devant être déclinées dans les schémas régionaux de cohérence écologique (SRCE) qui sont élaborés par les régions en partenariat avec l'État. Ainsi, les documents de planification et les projets relevant du niveau national (notamment les grandes infrastructures linéaires de l'État et de ses établissements publics) doivent être compatibles avec ces orientations, tandis qu'au niveau local, les documents de planification et les projets des collectivités territoriales doivent prendre en compte les SRCE et donc la Trame verte et bleue qui y est cartographiée (au 1/100 000^e).

3. La Loi n° 2015-991 du 7 août 2015 portant sur la nouvelle organisation territoriale de la République est venue compléter le précédent dispositif réglementaire : les régions doivent élaborer des Schémas Régionaux d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires (SRADDET*), alimentés par les SRCE qui sont de facto intégrés aux SRADDET. Les collectivités locales sont également invitées à prendre en compte les continuités écologiques et donc les mesures de transparence écologiques mises en place par les gestionnaires d'infrastructures de transport dans leurs documents d'urbanisme et projets de territoire.

1.2.2. LA LOI BIODIVERSITÉ 2016

La Loi n° 2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages oblige à la démonstration par les pétitionnaires de l'efficacité des mesures de réduction et de compensation : « Elles doivent se traduire par une obligation de résultat et être effectives pendant toute la durée des atteintes ». En cela, le présent travail (*Rex 2*) facilite l'application de cette loi. Il participe en effet au confortement de la démonstration des résultats en fournissant des méthodes et en précisant leur application pour le suivi des passages à faune qui, associés à des clôtures, constituent une mesure de réduction des collisions de la faune avec le trafic. Plus rarement, il peut s'agir également d'une mesure de compensation quand l'équipement et le suivi de passages à faune sont réalisés sur une autre infrastructure linéaire que celle du gestionnaire. C'est le cas, par exemple, des mesures compensatoires de la Ligne à Grande Vitesse Sud Europe Atlantique (LGV SEA) intégrant un programme de restauration des continuités écologiques sur les routes départementales de trois bassins versants en lien avec la LGV SEA.

1.2.3. UNE DÉMARCHE INSCRITE DANS LES POLITIQUES PUBLIQUES

En restaurant les continuités au droit des points noirs identifiés prioritaires dans les SRADDET et en participant ainsi à la réduction de la fragmentation du territoire, la création d'ouvrages spécifiques pour la faune sauvage s'inscrit indirectement dans la politique nationale de la Trame verte et bleue. Il va ainsi venir enrichir le Système d'Information des Passages à Faune (SIPAF*) en cours d'élaboration, recensant l'ensemble des passages à faune

sur les infrastructures linéaires de transport du territoire métropolitain. Il contribue, par ailleurs, à l'amélioration et à l'harmonisation des techniques de suivi des passages à faune permettant de conforter la validité des résultats des suivis. Cette contribution sera versée dans le futur guide sur les suivis faunistiques des passages à faune qui accompagnera le SIPAF.

Enfin, le *Rex 2* a permis de répondre également à l'objectif n° 39a du Plan Biodiversité du gouvernement de juillet 2018, visant à résorber 20 des principaux points noirs des SRCE/SRADDET.

II. CONSTRUCTION DES OUVRAGES

Ce chapitre traite de la conception des ouvrages et des aménagements pour la faune. Il vise à compléter la partie « réalisation des ouvrages » du Rex 1 en présentant des techniques et réalisations non abordées dans le document de 2016.

2.1. CHOIX DE L'EMPLACEMENT DES PASSAGES À FAUNE

En complément du Rex 1, pages 18 à 20.

Pour rappel, les étapes essentielles pour déterminer l'emplacement d'un passage à faune sont les suivantes :

- Réalisation d'études préalables (analyse spatiale et expertises écologiques).
- Analyse multicritère (enjeux par échelles, espèces cibles, contraintes techniques, pérennité, etc.).
- Concertation avec les acteurs du territoire (associations de protection de la nature, collectivités, etc.).

Les principales continuités écologiques existantes et à restaurer d'un territoire sont désormais recensées à différentes échelles dans les documents de planification et d'aménagements du territoire ainsi que les documents d'urbanisme associés. Les SRADDET intègrent dans leurs Documents d'Orientations et d'Objectifs une cartographie des trames vertes et bleues à une échelle supra-territoriale. Ces données sont en principe déclinées dans les PLU et PLUi des communes et intercommunalités. Il est difficile pour un gestionnaire d'infrastructures de garantir la pérennité des corridors menant à l'ouvrage. Il apparaît ainsi utile de s'appuyer sur ces documents afin de positionner les passages à faune dans la continuité des corridors recensés, ce qui ne doit pas exclure pour autant la possibilité de construire des passages hors de ces zones référencées si des expertises le

démontraient (limites des évaluations SRCE/SRADDET, évolution de l'occupation des sols).

Les données de l'exploitant concernant la mortalité animale sont peu fiables d'un côté, car incomplètes en raison de la prédation et des cadavres de petites espèces difficiles à retrouver, mais peuvent également être erronées en raison des difficultés d'identification des espèces. Et insuffisantes de l'autre pour indiquer un site accidentogène, les animaux heurtés pouvant être entrés dans les emprises par un point éloigné de la collision. Ces données restent ainsi indicatives¹ pour engager des diagnostics standardisés permettant d'objectiver les positionnements pressentis.

De nombreux outils d'écologie du paysage se développent pour modéliser les réseaux écologiques et mettre en évidence les solutions potentielles théoriques de restauration des continuités écologiques. Ces logiciels utilisent des méthodes lourdes à mettre en œuvre et nécessitent des outils puissants pour une modélisation à l'échelle d'un réseau autoroutier. Ils permettent d'apporter un premier niveau d'information requérant un croisement avec les ouvrages de l'infrastructure, mais ne peuvent se substituer à des expertises de terrain.

Ces expertises, basées sur des observations de terrain en lien avec les acteurs naturalistes du territoire (associations, Fédérations de chasse et de pêche, etc.) permettent, à une échelle plus fine, d'évaluer avec plus de précisions les déplacements de la faune, d'affiner la position des ouvrages ou de la définir.

À noter que pour optimiser l'utilisation de l'ouvrage par la faune sauvage, l'organisation d'une concertation avec le monde de la chasse est fortement conseillée et doit permettre d'établir des zones non chassables, notamment au niveau des entonnements, de limiter les battues ainsi

¹ Etude comparative de deux méthodes de relevé des collisions entre la faune et le trafic (Guinard, 2019)
https://www.ittecop.fr/en/content_page/item/231-comer-car

que les postes de tir à proximité immédiate. Cette concertation est à mener sous l'égide de l'État afin d'associer l'ensemble des partenaires acteurs proches de la zone des entonnements, mais hors de la maîtrise foncière du gestionnaire de l'infrastructure linéaire de transport.

2.2. RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION ET DE GÉNIE ÉCOLOGIQUE DES ÉCOPONTS

En complément du Rex 1, pages 25 à 34.

En se mettant au service du génie écologique, mais également de l'environnement, le génie civil permet la recherche de solutions durables par le choix des matériaux et des techniques de moindre impact sur la santé humaine et notre environnement, notamment concernant le réchauffement climatique. Il convient ainsi d'intégrer dans l'analyse multicritère un bilan des émissions de CO² liées à la nature et aux

volumes des matériaux utilisés (bois, ciment, béton, métal...). On peut se référer pour cela aux facteurs d'émissions de CO² proposés par le CEREMA.

2.2.1. LES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION DES ÉCOPONTS

Le choix d'un type d'ouvrage suit le cheminement classique de la réalisation d'un ouvrage d'art en cherchant à répondre aux exigences des espèces animales ciblées. Le génie civil se met donc en quelque sorte au service du génie écologique. La solution optimale sera ainsi une réponse adaptée aux espèces animales visées et à l'ensemble des contraintes identifiées au cours d'une analyse multicritère : contraintes techniques (hauteur du remblai ou déblai, largeur de la brèche, réseaux existants, emprise nécessaire autour de l'emplacement de l'écopont, etc.), contraintes d'exploitation (gêne aux usagers, fermeture ou basculement de circulation), contraintes financières.

Les monotravées, par exemple, présentent une moindre gêne à l'exploitation, mais nécessitent une aire de construction du tablier à proximité du site d'implantation définitive qui sera ensuite transporté, ce qui n'est pas toujours possible. D'une manière générale, le nombre croissant de travées, qui est fonction de la possibilité d'implanter des appuis intermédiaires (présence de réseaux sensibles à dévier, etc.), impacte la portée dimensionnante et élargit le panel de solutions.

Les tabliers et entonnements

En complément du Rex 1, page 25.

Le tablier d'un écopont doit être étanche à l'eau et résistant aux racines des plantations afin de garantir la pérennité de l'ouvrage. Un contrôle permet de s'assurer d'une bonne étanchéité dans le temps. Ce contrôle doit être effectué avant qu'il ne soit recouvert de matériaux (Figure 11).

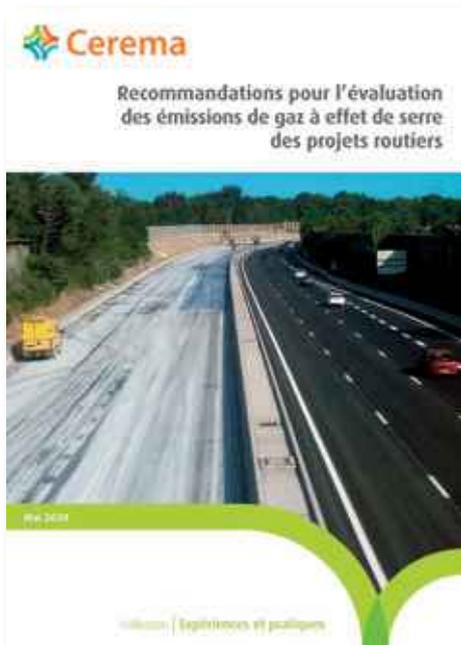


Figure 3 : Guide du CEREMA, *Recommandations pour l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre des projets routiers* (<https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/recommandations-evaluation-emissions-gaz-effet-serre-projets>)



Figure 4 : Écopont de Fuveau A50. ©Photothèque VINCI Autoroutes.



Figure 5 : Écopont La Pologne A89. ©KOOX.



Figure 6 : Écopont Le Causse - Les Grands Genèvevriers A89. ©KOOX



Figure 7 : Écopont Col du Grand-Bœuf A7. ©Photothèque VINCI Autoroutes.



Figure 8 : Écopont de Pourcieux A8. ©MARTINI.



Figure 9 : Écopont de Vidauban A8. ©Photothèque VINCI Autoroutes.



Figure 10 : Écopont Forêt de la Lande A10. ©MOULET.



Figure 11 : Tablier d'un écopont avant son recouvrement en matériaux. ©M. MARTINI.

L'effet diabololo d'un écopont est préférentiellement obtenu par des entonnements en trapèzes et un tablier rectangulaire qu'un tablier courbe (plus onéreux et compliqué en termes de mise en œuvre sous exploitation). La dissymétrie des entonnements permet de s'adapter aux configurations des sites d'implantation (Figure 12).

La couverture de terre

En complément du Rex 1 page 25.

Un compromis est nécessaire entre génie civil et génie écologique pour être en mesure de mettre en œuvre les aménagements écologiques de manière pérenne. Une épaisseur de terre insuffisante peut accentuer les contraintes hydriques sur les plantations (problématique aggravée par le nécessaire système de drainage du pont).

La terre est étalée sur place puis modelée afin de donner des mouvements naturels au terrain, avec une hauteur de substrat comprise entre 20 et 80 centimètres selon l'emplacement sur le tablier. Il est important de travailler cette terre dans de bonnes conditions en évitant les périodes trop humides ou trop sèches et de la compacter par roulage (étalement à reculons).

Sur les ouvrages à tablier plat, des banquettes de terre végétale de 80 centimètres d'épaisseur pour la plantation de bandes boisées sont réalisées de part et d'autre du tablier sur environ 5 mètres de large (cf. Figure 2 du *Rex 1*, page 25).

Entre ces banquettes, qui peuvent être délimitées et soutenues par des murets en pierres sèches (cf. le concept d'écorestanque), une épaisseur de 20 centimètres suffit pour maintenir un couvert herbacé bas, sans développement de ligneux, et donc un milieu ouvert.

Sur les ouvrages de type voûte, pour des contraintes techniques, on y trouve un remplissage plus faible en sommet de voûte que sur les côtés qui sont préalablement comblés par des matériaux de remplissage avant d'être recouverts par de la terre végétale.

Les écrans d'occultation

En complément du REX 1, page 25.

Les écrans d'occultation peuvent être conçus à partir de clins de bois verticaux non teintés de 2,20 à 2,60 mètres de haut. Il est conseillé d'utiliser des bois traités de classe 4, garantis 15ans contre les agressions fongiques et attaques d'Insectes xylophages, ou des bois rendus hydrophobes par réticulation. Ces écrans peuvent ensuite servir de supports pour des silhouettes d'animaux apposées à l'extérieur, permettant de signifier la fonction de l'ouvrage aux usagers de l'infrastructure. Côté intérieur, ils peuvent servir de supports pour les équipements de suivi de l'utilisation de l'ouvrage. À noter également le rôle de guidage pour les Chauves-souris.

Les brise-vues et clôtures

En complément du Rex 1, page 27.

L'utilisation de panneaux de brande* en brise-vue n'est pas recommandée dans des zones exposées à de forts vents. Une prise au vent trop importante entraîne un risque de rupture de la clôture. Elle doit alors être renforcée à l'aide de jambes de force réparties à distance régulière. En effet, la clôture est une mesure complémentaire indispensable pour assurer l'efficacité des passages à faune (Rytwinski *et al.* 2016), notamment pour guider les animaux vers les ouvrages.

Certaines espèces de Micromammifères, de Reptiles et d'Amphibiens sont capables de franchir les clôtures (grillages à mailles fines) installées pour la microfaune. Pour en améliorer l'efficacité, il est souvent préconisé la mise en place de bavolets (Figure 17). Ce type d'installation reste cependant délicat à mettre en œuvre et à pérenniser. Conan *et al.* (2022), à l'appui de tests d'efficacité des clôtures avec et sans bavolet, ont montré que la présence d'un bavolet améliorait l'efficacité de la clôture pour les Amphibiens, mais pas pour les Micromammifères. Ils

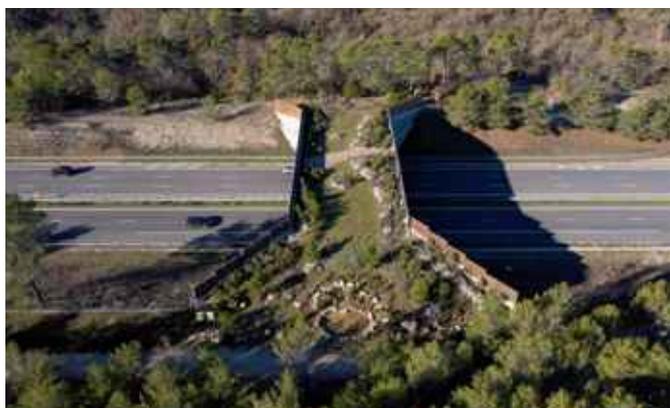


Figure 12 : Vue aérienne des écoponts : Fuveau A50, ©Photothèque VINCI Autoroutes; Brignoles A8, ©OLYA; Le Causse les Genévriers, ©KOOX; Forêt de la Lande A10, ©E.RONDEAU.



Figure 13 : Sur le contournement ouest de Strasbourg, les panneaux sont liés entre eux par un câble métallique et reliés au sommet des montants métalliques. Dans le cas d'une éventuelle rupture d'un des éléments, cela permet d'éviter une chute sur les voies (câble de 4 mm de diamètre en inox). ©VINCI Autoroutes.



Figure 14 : Cas d'un ouvrage en remblai (Bas-Bry - Cofiroute). Les écrans occultants sur l'ouvrage sont prolongés hors ouvrage au droit des murs en retour et en accompagnement du début des rampes d'accès sur les longueurs d'environ 15 mètres de part et d'autre de l'ouvrage. ©VCT.



Figure 15 : Rupture des poteaux de la clôture équipée de panneaux de bande à la suite de la tempête ANA en 2017. ©VINCI Autoroutes.



Figure 16 : Dans le cas d'utilisation de la bande pour les brise-vues, renforcer la clôture à l'aide de jambes de force réparties à distances régulières (tous les deux poteaux de clôtures). ©VINCI Autoroutes.



Figure 17 : Bavolet en maille fine en tête de grillage pour petite faune. Le dispositif le plus abouti possède un fil tendeur repris sur cornières. ©Cabinet X-AEQUO.



Figure 18 : Prototype de module fossé inox SANIEZ pour sécuriser les fossés en remplacement des seuils béton classiques. ©Cabinet X-AEQUO.

recommandent d'utiliser plutôt des clôtures opaques pour ces espèces.

Aussi, pour limiter les problèmes de dégradations de la petite maille (difficulté à la pose, casse de mailles lors des débroussaillages), il est recommandé de positionner la maille la plus fine (6,5 x 6,5 mm) entre la clôture grande faune et la clôture petite faune en renfort (25 x 13 mm ou 25 x 25 mm) (cf. *Rex 1*, Figure n°3, page 27). Des expérimentations d'autres dispositifs (opaques notamment) restent à conduire pour trouver des solutions adaptées.

Les franchissements de fossés/Cunettes

En complément du Rex 1, page 37.

Le franchissement d'un fossé sous la clôture est une véritable limite à l'efficacité des clôtures de petite faune en laissant une porte d'entrée notamment pour toutes les espèces semi-aquatiques (les grilles classiques ne sont pas adaptées). Des dispositifs spécifiques sont indispensables afin d'assurer une étanchéité maximale tout en limitant le comblement de

l'exutoire. Le dispositif présenté (Figure 18) repose sur un principe de clapet, mais il conviendrait de l'améliorer en prévoyant à l'avant une petite fosse de décantation des matériaux terreux ou graveleux pour éviter qu'ils n'empêchent l'obturation du clapet. Des solutions alternatives doivent encore être trouvées, en tenant compte des contraintes de ces dispositifs pour l'exploitation.

2.2.2. LES TECHNIQUES DE GÉNIE ÉCOLOGIQUE SUR ÉCOPONT

Les plantations

En complément du Rex 1, page 28.

De manière générale, le contexte climatique complique la réalisation des plantations et les garanties de reprise. Les végétaux sont soumis à un stress hydrique de plus en plus fréquent. Il est donc nécessaire de réfléchir à la sélection des essences utilisées et à la difficulté de réaliser des arrosages vis-à-vis des pénuries de la ressource en eau. Les semis et plantations arbustives sont par ailleurs préférables aux plantations de grands



Figure 19 : Installation d'un système de goutte-à-goutte. ©Cabinet X-AEQUO.



Figure 20 : Installation d'une cuve de stockage équipée d'un panneau solaire et alimentée par un forage. ©Cabinet X-AEQUO.



Figure 21 : La végétalisation par ensemencement des talus des ponts à doubles voûtes permet d'éviter le ravinement. ©M. MARTINI.

arbres tiges entre autres du fait des risques d'incendie. La réussite des plantations passe par la mise en œuvre de techniques telles que le travail du sol, l'apport en matière organique, et le paillage pour maintenir l'humidité et limiter la concurrence herbacée.

Différents tests ont été mis en œuvre en zone méditerranéenne :

- Adaptation de la palette végétale pour favoriser des végétaux résistants à la sécheresse. On peut citer les oléastres (cépées d'oliviers « sauvages »), à titre d'innovation originale qui a été réalisée dans le cadre des plantations effectuées sur les écoponts de Pignans et Brignoles. Il s'agit ici non pas de planter de beaux sujets de grande taille, mais de profiter des capacités de survies des souches d'oliviers.
- Augmentation des capacités de rétention d'eau dans le sol en combinant des apports

massifs de matière organique (broyats) avec l'incorporation d'hydrorétenteurs à base de copolymère d'acrylate et d'acrylamide de potassium réticulé, la mise en place d'un réseau d'irrigation fixe à partir du réseau local ou d'une cuve de stockage équipée d'un panneau solaire, et l'alimentation par un forage.

Pour faciliter les manipulations liées à l'entretien de l'ouvrage, il est recommandé de garder un espace de 2 mètres environ entre les plantations et les panneaux occultants.

Il est préconisé d'appliquer une période d'entretien et de garantie de 3 ans minimum, avec deux passages par an pour limiter le potentiel développement d'espèces invasives ainsi que de bien suivre la reprise de la végétation.



Figure 22 : Dans le contexte sec méditerranéen, création de fossés pour alimenter les mares. ©M. MARTINI.

Retour d'expérience sur l'aménagement de mares par la LPO PACA (sur le réseau SNCF) :

« L'aménagement de mares temporaires sur les écoponts ou à proximité immédiate montre une réelle plus-value écologique en constituant des habitats relais nécessaires aux espèces inféodées aux milieux humides, et en offrant un point d'attraction pour la faune (point d'eau, zone de chasse). Les Amphibiens se reproduisant dans les milieux temporaires apprécient particulièrement ces aménagements. Toutefois, bien que temporaires, il convient d'éviter un assèchement trop rapide des mares, ce qui est particulièrement le cas en milieu méditerranéen où les pluies sont épisodiques aux intersaisons. L'utilisation d'une couche d'étanchéité est déterminante pour assurer sous ce type de climat une bonne efficacité des mares. Lors de la création de mares, il convient de réfléchir à la pérennité de la couche d'étanchéité et d'investir dans un dispositif pour sa protection contre l'affouillement et la perforation par les sabots des Ongulés. La pose de dalles de pierre de grandes dimensions (ne pouvant être bougées par des Sangliers) a montré de bons résultats, mais nécessite des moyens mécanisés pour leurs poses compte tenu du poids. »

Micaël GENDROT, LPO PACA.



Figure 23 : Réalisation d'une mare par pose de dalles de pierres de grande taille. ©M.GENDROT.

Les mares

En complément du Rex 1, page 30

Ces mares se présentent sous forme de dépressions à pentes variables, avec différents niveaux de profondeur (jusqu'à 1 mètre) et d'une superficie d'environ 25 m² ou 50 m². L'implantation doit tenir compte de la topographie qui conditionne l'alimentation de la mare en eau. Les matériaux issus du terrassement sont régalés sur place.

Une mise en œuvre d'enrochement est éventuellement réalisée sur tout ou une partie du périmètre à l'aide de blocs de 60 à

100 centimètres de diamètre afin de limiter le passage de personnes, vélos ou motos. La mise en œuvre de ces enrochements est réalisée dans les règles de l'art afin d'assurer leur tenue dans le temps.

Dans le cas où une mare se trouve dans une zone fréquentée par du bétail, et afin d'éviter toutes dégradations, une clôture de type agricole (piquets en bois avec 2 rangées de fil barbelé) est mise en œuvre sur la périphérie.

L'étanchéité des mares demeure parfois problématique, notamment en raison de la présence de Sangliers.



Figure 24 : Enrochements réalisés autour de la mare afin de préserver du passage des Sangliers. ©Photothèque VINCI Autoroutes.





Figure 25 : Un essai de protection avec une nappe de grillage enterrée est en cours d'expérimentation (écopont des Adrets-de-l'Estérel). L'alternance de sable, de géotextiles, de membranes (Bidim/EPDM) associée à un grillage avec fers de placages ancrés donne de bons résultats après une année. ©Cabinet X-AEQUO.



Figure 26 : Affoulement d'une mare par des Sangliers. Une réflexion doit être envisagée à la création pour garantir la pérennité de l'aménagement et du dispositif d'étanchéité installé. ©VINCI Autoroutes.

Les éco-restanques

Inspirés des restanques provençales, ces murets constitués d'éléments préfabriqués en briques, de rondins et de pierres sèches compatibles avec la portance des ouvrages d'art, permettent à la fois de créer des banquettes de terre végétale pour la plantation de haies et des zones refuges pour la petite et microfaune. Pour éviter l'effet couloir, la hauteur de terre est limitée à 70-80 centimètres de hauteur (minimum compatible avec le développement racinaire d'arbres plantés). La Figure 27 illustre une restanque volontairement effondrée pour créer des coupures intermittentes permettant d'atteindre le niveau du sol. Pour plus de détails, une fiche technique est disponible sur le Centre de ressources de la Trame

verte et bleue : <http://www.trameverteetbleue.fr/retours-experiences/amenagement-ecopont-haute-fonctionnalite-ecologique>.

Les andains

En complément du Rex 1, page 30.

Évolution sur 18 ans d'un andain par O.G.E pour VINCI Autoroutes :

L'andain se végétalisant avec le temps, il n'est pas nécessaire de remplacer les éléments le constituant. Des ligneux vont se développer sur cette structure et recréer un corridor arbustif.

Il apparaît par ailleurs nécessaire de prolonger un maximum les andains afin d'optimiser la connexion avec les milieux environnants de l'ouvrage.



Figure 27 : Éco-restanque volontairement effondrée pour atteindre le niveau du sol. ©Photothèque VINCI Autoroutes



Figure 28 : Lézard ocellé sur une éco-restanque. ©V. MARIANI

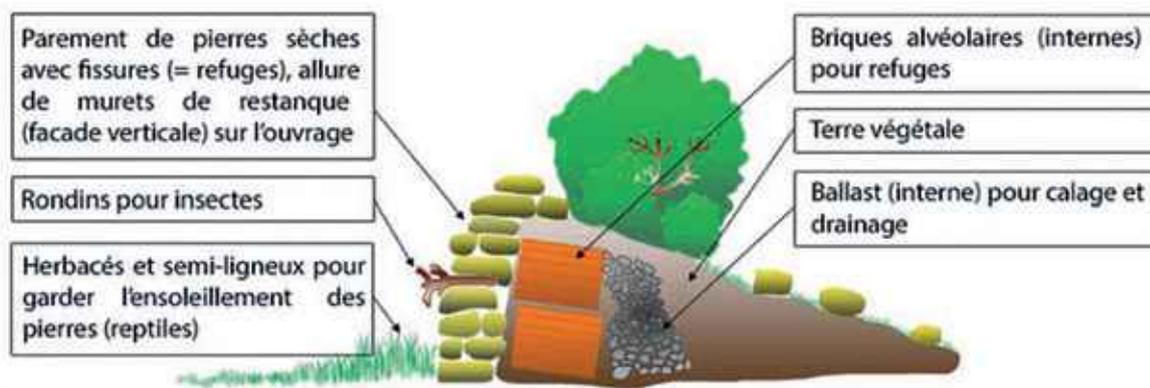


Figure 29 : Éco-restanque inspirée de la restanque provençale (muret en pierres sèches), ce dispositif permet de procurer une structure refuge pour la microfaune, ainsi que l'optimisation des volumes de terre nécessaires pour la plantation de haies. ©Cabinet X-AEQUO

Les dispositifs de guidage pour Chiroptères sur les ouvrages supérieurs

L'expérimentation d'un système de guidage des Chiroptères pour les espèces de bas vol afin de pallier – au moins temporairement – la faible taille des arbres, n'a pas montré de résultats probants. (Figure 30, ligne de boules de polystyrène reliées par une corde suspendue sur des mats à 2 mètres du sol). Les observations réalisées en début de nuit sur l'écopont de Vidauban, équipé de ce dispositif, semblent montrer que les espèces utilisent parfois les palissades comme structure guidant leur vol sans privilégier particulièrement le dispositif du câble et des boules. Des protocoles spécifiques devront être mis en place afin d'évaluer précisément la fonctionnalité d'un tel dispositif et de sa plus-value vis-à-vis des palissades. Ces observations, liées à la difficulté d'obtenir des arbres de haute taille compte tenu des contraintes de sol dans le contexte méditerranéen (faible épaisseur et sécheresse), plaident pour reconsidérer les objectifs de la végétalisation sur ces ouvrages. S'agissant de guider les Chauves-souris, l'objectif peut sans doute être atteint

par des équipements pérennes (palissades, barrières, etc., cf. Chapitre 8.2). Dès lors, le recours à des essences arborées de petite taille pourrait répondre à des objectifs écologiques autres (niches écologiques, ombrage, etc.), sans nécessairement chercher des hauteurs de houppier importantes (au moins sur le tablier des ouvrages de type passerelle).

Les dispositifs anti-intrusion

En complément du Rex 1, page 30.

L'utilisation des barrières anti-engins (brevetée) a été généralisée sur les ouvrages ESCOTA (Figure 32). Les suivis par pièges photographiques attestent de la transparence du dispositif pour toute la grande et moyenne faune (Cerf élaphe, Chevreuil, Sanglier, Loup gris, etc.).

Par ailleurs, des panneaux d'information sur les aménagements réalisés et leurs objectifs invitent à respecter la quiétude des lieux (Figure 33).

L'aménagement de pièges à traces

Certains écoponts ont été équipés de pièges à traces au nombre de 2 à 3 unités par ouvrage (1 à chaque tête de l'ouvrage et 1 au centre).



Figure 30 : Câbles et boules de guidage pour les chiroptères permettant de pallier le faible développement des haies sur l'ouvrage. ©VINCI Autoroutes et ©Cabinet X-AEQUO.



Cet ouvrage spécifique a été le premier à être équipé d'un andain de bois et de roches en France (la plus grosse souche est pointée d'une flèche jaune et sur les photos de cette page). Sur la photo de gauche, l'andain est mis en place depuis un an. Photo du 14 décembre 2001. Sur la photo de droite vue d'avion le 24 juin 2004, les coulées de la grande faune qui empruntent ce passage (sanglier, chevreuil, cerf) se voient distinctement de part et d'autre de l'andain (largeur de l'ouvrage 12 m). L'ouvrage à 4 ans. ©V. Vignon.



Vue de détail de l'andain 5 ans après sa réalisation, le 5 octobre 2005. Une haie se développe, notamment grâce aux graines apportées par les oiseaux qui se sont posés sur la structure. La lande à callune reprend sur les bordures. L'andain se « naturalise » progressivement. ©V. Vignon.



Vue de détail de l'andain 18 ans après sa réalisation, le 19 octobre 2018. Les écrans ont été repeints en marron. La haie, les jeunes arbres et la strate buissonnante qui s'est développée a été gérée par broyage. De l'andain, il ne reste que la structure rocheuse discontinue. Le bois a disparu sauf les grosses pièces de plus de 50 cm de diamètre (la grosse souche pointée par les flèches jaunes est la seule pièce de bois qui a peu changée). La haie qui a remplacé le bois joue son rôle fonctionnel pour la faune sur l'ouvrage. ©V. Vignon.

Figure 31 : Diagnostic dell'état actuel des passages pour la faune sur l'autoroute A28 : bilan de la gestion pratiquée, préconisations de gestion pour restaurer leur fonctionnalité. Note sur la gestion du site du « Canyon » près d'Alençon (72). © O.G.E.



Figure 32 : Barrières anti-intrusion. ©VINCI Autoroutes.



Figure 33 : Panneau informatif à destination des personnes fréquentant les abords de l'ouvrage invitant à respecter la quiétude du lieu. ©Photothèque VINCI Autoroutes.



Figure 34 : Piège à traces disposé sur un écopont. ©Photothèque VINCI Autoroutes.

Ces pièges à traces se présentent sous forme de plates-bandes sur l'ensemble de la largeur de l'ouvrage. D'une largeur de 3 mètres, ils peuvent venir compléter la détection et l'identification de la faune sauvage présente sur l'écopont, ou encore aider au positionnement de pièges photographiques sur des cheminements identifiés. Le matériau (sableux/argileux) doit être adapté. Il faut limiter l'usage de fines calcaires (risque de prises en masse), et d'argile (ne marque que si humide). Une granulométrie sablo-limoneuse serait à tester pour assurer le bon marquage et la tenue des empreintes dans le temps. Il est donc recommandé qu'un échantillon soit validé avec l'opérateur de suivi avant sa mise en œuvre.

La réalisation d'une « fosse » de 20 centimètres de profondeur est effectuée mécaniquement, et les matériaux sont régalez ou modelés sur zone. Un feutre anti-contaminant de 270 g/m² minimum est placé sur le fond de forme. Le remplissage de l'ensemble est réalisé à l'aide de deux substrats spécifiques dont les caractéristiques permettent un marquage facile, durable et reconnaissable des empreintes laissées par le passage des animaux sauvages. Sur les 10 premiers centimètres en fond de fosse, un mélange type terre et pierre est mis en place. Les 10 centimètres restant en surface

sont composés du substrat sableux répondant aux exigences mentionnées ci-dessus.

Il est également nécessaire que ce matériau puisse être ratissé facilement dans le cadre du suivi régulier du dispositif.

La réglementation

En complément du Rex 1, page 34.

Certains projets d'écoponts peuvent faire l'objet d'arrêtés de dérogation à l'interdiction de déranger, de déplacer ou de détruire une (des) espèce(s) ou habitat(s) d'espèce(s) protégée(s). Malgré leur impact positif sur la restauration des continuités écologiques et les mesures mises en œuvre dans le cadre de la démarche ERC, un impact résiduel peut en effet persister à terme. Ces arrêtés précisent ainsi des mesures de réduction, et/ou de compensation, d'accompagnement, de suivi. Des délais supplémentaires dans la programmation du projet sont à prévoir le cas échéant.

Par ailleurs, dans le cadre des décisions ministérielles autorisant la construction des écoponts, le maître d'ouvrage doit fournir les conditions de gestion, d'entretien et de suivi des ouvrages aux services de l'État (Direction des Infrastructures de Transport), après validation par les DREAL concernées.



Figure 35 : Exemple d'un substrat argileux en mottes sèches dans un écoduc de 120 centimètres de diamètre. ©Alexis Orseau/LPO France.

2.3. RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR DIFFÉRENTS CAS PARTICULIERS D'AMÉNAGEMENTS

2.3.1. UTILISATION DE SUBSTRAT DANS LES ÉCODUCS

Sur le réseau Cofiroute, un substrat sableux a été systématiquement étalé sur le fond des écoducs. Ce type de substrat présente l'avantage de rester plutôt lisse au fond de l'ouvrage par rapport à un substrat argileux qui peut être labouré par le passage des animaux et durcir ensuite en laissant un fond d'ouvrage très irrégulier. La Figure 35 illustre ce phénomène qui pourrait potentiellement gêner les traversées de la petite faune (Amphibiens, Micromammifères, etc.). Ce constat d'un substrat trop irrégulier pour les urodèles, par exemple, versus l'absence de substrat a également été fait dans le *Rex 1* (*Rex1*, page 130).

2.3.2. LES AMÉNAGEMENTS PISCICOLES

Le dimensionnement des dispositifs piscicoles se base sur la note d'information du SETRA « *Petits ouvrages hydrauliques et continuités écologiques* » (Gigleux & De Billy 2013) et le guide de l'ONEMA « *Information sur la Continuité Écologique* » (Baudouin *et al.* 2014).

La réalisation d'une étude hydraulique est un impératif pour la mise en œuvre de mesures en faveur de la continuité piscicole. L'objectif

des aménagements est d'assurer la continuité écologique du cours d'eau tout en respectant les contraintes hydrauliques, usuelles et de structures propres à l'ouvrage. Ces éléments sont définis en concertation avec les services de l'État (DDT, OFB*). Le dimensionnement doit prendre en compte les espèces cibles du cours d'eau concerné et permettre le franchissement pour des débits compris entre le QMNA 5 (débit mensuel d'étiage sur 5 années) et jusqu'à 2,5 fois le module (débit moyen interannuel).

En application de l'article R. 181-46 du Code de l'environnement, un porter à connaissance doit être réalisé. En fonction des travaux et des rubriques de la loi sur l'eau auxquelles est soumis le projet, une déclaration ou autorisation au titre de la loi sur l'eau est nécessaire, et doit être accompagnée d'une évaluation des incidences en site Natura 2000.

Les principaux problèmes de franchissabilité rencontrés dans les ouvrages sont les suivants :

- Rugosité trop faible à l'intérieur de l'ouvrage (vitesse d'écoulement trop importante);
- Hauteur d'eau limitante;
- Chute en aval de l'ouvrage;
- Seuil artificiel;
- Ombrage à l'intérieur de l'ouvrage.

Pour répondre à ces problématiques, différents travaux ont été mis en œuvre sur des cours d'eau du réseau VINCI Autoroutes.

Ces ouvrages ont fait l'objet de suivis spécifiques (cf. Chapitre 8.1).

EXEMPLE DE LA DUROLLE

Objectif: Rétablissement de la franchissabilité pour la truite fario et le chabot commun par un traitement amont, aval et intérieur de l'ouvrage hydraulique consistant à réduire la vitesse d'écoulement et à créer de nombreuses caches et zones de repos pour les poissons. Les aménagements réalisés sont les suivants :

- Création d'un tapis d'enrochement sur le fond du cours d'eau sur une emprise d'environ 20 mètres.
- Réalisation de protections des berges en enrochements libres.
- Ajout de macro-rugosités en quinconce sur le fond de l'ouvrage sur le radier béton.
- Suppression de la chute de 40 centimètres en aval de la buse métallique.
- Comblement de la fosse de dissipation et arasement léger de la crête de surverse.

Cette adaptation morphologique de l'ouvrage permet de répondre au besoin de remontée des poissons et à la continuité sédimentaire, en tenant compte des enjeux de stabilisation du lit et des berges du cours d'eau.



Figure 36 : Réalisation d'une planche test de la disposition des macro-rugosités disposées en quinconce et séparées par des blocs de roches saillants (+/- 10 centimètres). ©Photothèque VINCI Autoroutes



Figure 37 : Mise en place de macro-rugosités en fond d'ouvrage pour permettre de diminuer la vitesse d'écoulement et de créer des zones de repos pour la faune piscicole. ©Photothèque VINCI Autoroutes



Figure 38 : Mise en place de batardeaux et dérivation du cours d'eau pour permettre un travail en assec. ©Photothèque VINCI Autoroutes



Figure 39 : Avant/Après: La fosse de dissipation a été comblée, la chute de 40 centimètres en sortie de buse supprimée, et des rugosités ont été ajoutées à l'intérieur de la buse pour influencer sur la vitesse d'écoulement. ©Photothèque VINCI Autoroutes

EXEMPLE DE L'ALLIER

Objectif : Rétablissement de la franchissabilité pour les espèces à forts enjeux, notamment les grands salmonidés migrateurs, avec un enjeu fort pour réduire les retards de montaison. Deux seuils sous concession ASF entravent la circulation piscicole et sédimentaire. Ils entrent dans le champ d'application de l'arrêté de classement en liste I et II du 10 juillet 2012 et de l'article L.214-17 du Code de l'environnement, impliquant une obligation de résultat.

Le seuil A89 n'offre pas les conditions d'écoulement satisfaisantes et totalement compatibles avec les capacités de franchissement de l'ensemble des espèces à forts enjeux. Il est globalement infranchissable pour les petites espèces.

Le seuil de Joze est considéré comme franchissable en étiage et en fortes eaux, mais avec un impact morpho-écologique par la formation d'un verrou sédimentaire.

Des études intégrant modélisations, profils topométriques et bathymétriques, sondages, prélèvements, analyses diachroniques, diagnostics ICE* et analyses multicritères de variantes d'aménagements ont permis d'aboutir au dimensionnement d'un projet pour chaque seuil sous l'autorité d'un comité de pilotage composé de l'ONEMA, de la DREAL, de la DDT, et de l'Agence de l'eau. Ces projets ont également fait l'objet d'une validation auprès de la DRJSCS* et de la Fédération Française de canoë-kayak.

Les aménagements réalisés ont été les suivants :

- Pour le seuil A89
 - ▶ Arasement de la crête de seuil sur une hauteur de +/- 0,80 mètre sur 96 mètres.
 - ▶ Création d'une brèche asymétrique de 5 mètres de large et de 25 mètres de long dotée d'une rugosité de fond et d'une pente de 4 % (franchissement piscicole et canoë).
 - ▶ Réfection en enrochements des protections latérales impactées.
- Pour le seuil de Joze:
 - ▶ Dérasement sur toute la hauteur du seuil (environ 1 mètre) sur 84 mètres de longueur.
 - ▶ Nivellement du fond de l'Allier.
 - ▶ Réfection en enrochements des protections latérales impactées.



Figure 40 : Réalisation d'une planche de test pour la création de la rampe destinée au franchissement de la faune piscicole et aux canoës. ©Photothèque VINCI Autoroutes



Figure 41 : Les travaux sont réalisés de manière progressive depuis une berge vers l'autre, dans le lit en amont du seuil et nécessitent le déplacement de blocs volumineux pour la formation de la rampe. ©Photothèque VINCI Autoroutes

2.3.3. LES CHIRODUCS

Les ouvrages destinés au passage des Chiroptères sont encore peu nombreux. Ceux réalisés par VINCI Autoroutes l'ont été à titre expérimental, avec deux designs : un premier en « berceau », un second sous la forme d'un portique de signalisation. La réussite de ces ouvrages dépend en grande partie de leur localisation et du contexte paysager.

Deux ouvrages en « berceau » ont été construits sur la section est de l'A89, entre Lyon et Balbigny. Des études préalables à la construction de l'autoroute ont permis d'identifier les principales routes de vol des espèces cibles, notamment la Barbastelle d'Europe. Ces ouvrages métalliques sont relativement imposants (plusieurs dizaines de tonnes d'acier) et ont nécessité des études de faisabilité techniques importantes. Il a fallu tenir compte notamment de certaines contraintes telles que le dénivelé, les risques sismiques, les chocs de véhicules et l'accumulation de givre ou de neige sur l'ouvrage. La longueur de 40 mètres permet de couvrir la largeur de l'infrastructure. La structure en « berceau » positionnée à plus de 9 mètres du sol permet ainsi de guider les Chiroptères à une hauteur leur permettant d'éviter des collisions.

2.3.4. LES BIODUCS

Pour réduire autant que possible l'interdistance entre les ouvrages de transparence écologique dans des zones en déblais où des ouvrages sont complexes à implanter (passage supérieur avec une longueur de brèche conséquente) et coûteux, la réalisation de passages à faune, et notamment pour les hamsters, appelés bioducs a été mise en œuvre. Ces bioducs constituent une mesure de transparence écologique perpendiculaire à l'infrastructure.

Les bioducs sont positionnés latéralement (côté nord pour diminuer l'ensoleillement et la chaleur à l'intérieur) sur les tabliers des ouvrages en passage supérieur (PS) franchissant les déblais. Ils créent des passages transversaux de l'autoroute,

dédiés aux hamsters et à d'autres espèces de petite faune.

L'ajout d'un bioduc sur un ouvrage existant nécessite une étude spécifique et un calcul des charges pour ne pas remettre en cause l'intégrité et la pérennité de ce dernier.

Les dimensions utiles des bioducs sont de 60 centimètres de haut sur 40 centimètres de large. Des aménagements sont effectués aux abords des accès (pente douce, accompagnement végétal) afin de rendre attractifs ces ouvrages pour en augmenter la fonctionnalité.

Le bioduc est fixé en rive du tablier, à l'intérieur de la corniche de l'ouvrage. Une couche de 10 centimètres de matériaux drainants (sables) est mise en place afin de reconstituer un sol naturel dans le passage. Une galerie artificielle (tuyau PVC de 10 centimètres de diamètre) permettra aux hamsters de circuler de façon protégée. Plusieurs ouvertures de petit diamètre (8 centimètres) sont prévues dans la galerie tout au long du passage supérieur afin de permettre la fuite des individus qui utiliseraient le bioduc en extérieur à cette galerie.

Le bioduc est réalisé avec un caisson en U dont la partie supérieure est en tôle perforée afin de bénéficier d'une ventilation naturelle.

Les rampes d'accès aux bioducs, le long des remblais des passages supérieurs, sont limitées à une pente de 25 % (4/1).

Afin de faciliter l'utilisation de ces ouvrages spécifiques, les rampes d'accès aux bioducs sont aménagées de manière à constituer un milieu favorable pour le déplacement de la petite faune. Il ne s'agit pas de constituer des habitats de vie, mais d'y aménager un couvert favorable constitué d'une végétation prairiale.

Les passages supérieurs rétablissant les routes au-dessus de l'autoroute sont équipés de dispositifs de retenue (glissières en béton) qui, associés à un muret en L au droit de l'entrée du bioduc font office de clôture ou d'obstacle évitant que les animaux entrants ou sortants du bioduc ne puissent accéder à la route rétablie.

	Chiroducts A89 : structure en berceau	Chiroduc A83 : structure en portique
	 <p><i>Chiroduc Moulin-Paris A89. ©PBOUFFARD.</i></p>	 <p><i>Portique à Chiroptères A83. ©KOOX.</i></p>
Localisation	2 ouvrages expérimentaux sur l'A89, département de la Loire (1 ouvrage au PR 496,1, commune de Saint Marcel-de-Félines et 1 ouvrage au PR 493,7, commune de Saint-Just-la-Pendue).	1 ouvrage expérimental sur l'A83, département des Deux-Sèvres (PR 119,5, commune de Saint Pompain).
Choix des sites	Routes de vols identifiées dans le cadre des études préalables à la construction de l'autoroute A89, notamment l'étude d'impacts. Un enjeu particulier concernant la Barbastelle d'Europe a été noté, en particulier dans le vallon du Bernand. À noter également la présence de plusieurs tunnels désaffectés dans la zone d'étude, utilisés en hiver.	Le site retenu se trouve au cœur d'une grande zone agricole intensive avec peu d'éléments linéaires (haies) favorables au déplacement des Chiroptères. Une ancienne voie ferrée abandonnée et enfrichée depuis 1971 traverse cette zone agricole et croise perpendiculairement l'A83 formant ainsi l'unique corridor écologique local entre deux vallées. Le portique expérimental a été installé dans la continuité de ce corridor, au-dessus des voies circulées.
Techniques / Dimensions	<p>Ouvrage métallique constitué d'une tôle pleine d'une épaisseur de 12 millimètres, montée sur une structure tubulaire fondée.</p> <p>Maîtrise d'œuvre (calculs) = SETEC Constructeur = BAUDIN CHATEAUNEUF Longueur = 40 mètres Largeur = 4,82 mètres Hauteur maxi = 9,66 mètres Hauteur de guidage des Chiroptères variable de 1,65 à 2,45 mètres.</p> <p>Quantités pour 1 ouvrage :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 49 tonnes d'acier de construction S355K2+N, S355N, S355J2H NF. ▶ 35 m³ de béton C30/37. ▶ 2 tonnes de ferrailage HA 500. ▶ 860 m² d'un complexe (3 couches) de peinture C3ANV930 gris lumière, RAL 7035. 	<p>L'ouvrage est un portique de signalisation modifié, d'une longueur de 29,4 mètres, et d'une hauteur (tirant d'air) variant de 6 à 6,5 mètres. Le portique est rehaussé d'une grille dont la maille en losange est de 4,13 x 1,3 centimètres. Ces dimensions standards ont été choisies dans une optique de reproductibilité facilitée.</p> <p>Le portique est certifié «NF», la structure étant calculée selon la norme «XP P98550-1».</p> <p>Dix arbres de hauts jets de 5 mètres de hauteur ont été plantés de part et d'autre de l'ouvrage afin de combler la zone dépourvue de ligneux et améliorer le guidage des Chiroptères vers l'ouvrage en lien avec la végétation de l'ancienne voie ferrée.</p>
Contraintes	Sismiques, dénivelé topographique. Chocs de véhicules. Accumulation de neige, de givre.	Sismiques, dénivelé topographique. Chocs de véhicules.
Suivi	Cf. Chapitre 8.2.	Cf. Chapitre 8.2.

Tableau 1 : Comparaison des caractéristiques des deux types de chiroducts expérimentés sur le réseau VINCI-Autoroutes.

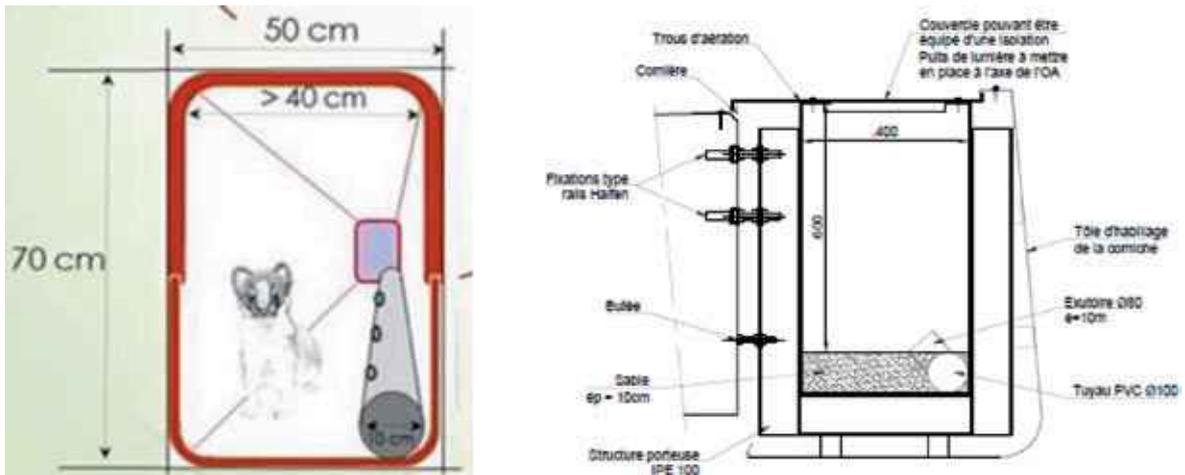


Figure 42 : Schéma de principe du bioduc. ©SOCOS.

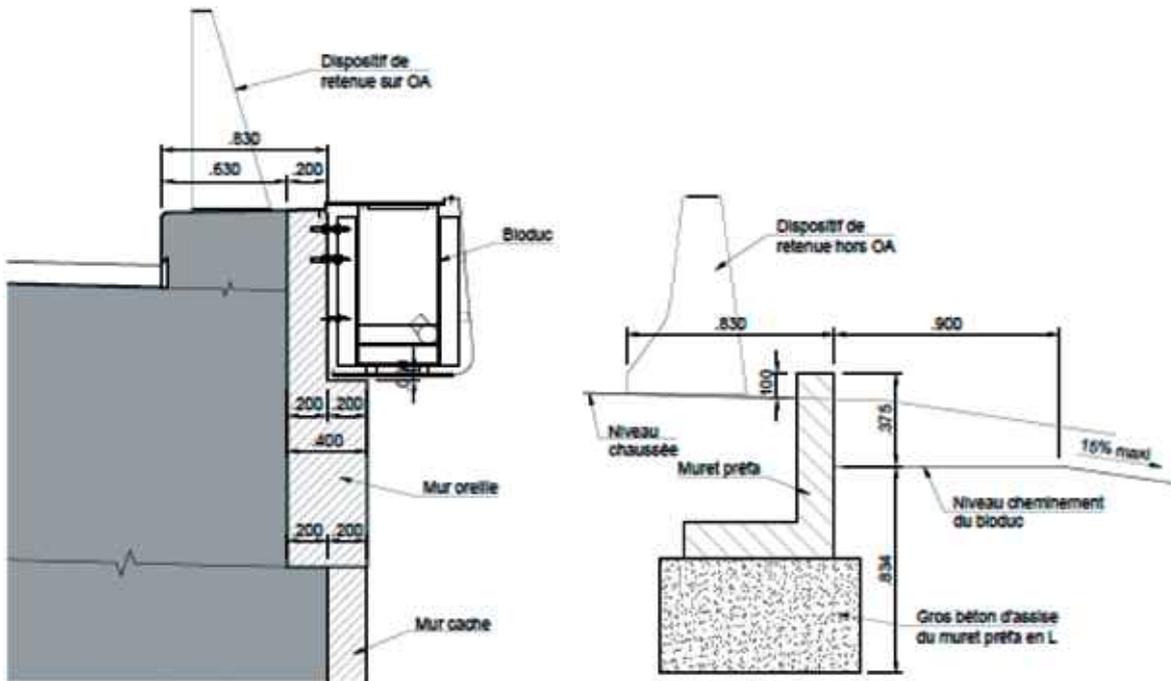


Figure 43 : Principe d'aménagement du bioduc sur le tablier, et de raccordement au talus routier du passage supérieur. ©SOCOS.



Figure 44 : ©Photothèque VINCI Autoroutes



Figure 45 : Caniveau de 70 x 40 cm en alliage d'aluminium brut d'épaisseur 2 mm, fixé sur le support par des vis en inox A4. © Photothèque VINCI Autoroutes

“

De nombreuses espèces ont déjà été observées empruntant l'ouvrage, notamment le Grand Hamster d'Alsace, espèce phare ciblée par cet aménagement.

”



Blaireau



Belette



Renard



Mulot



Chat sauvage



Grand Hamster

Figure 46 : Espèces empruntant un bioduc (de haut en bas et de gauche à droite) : Blaireau européen ; Belette ; Renard roux ; Mulot sylvestre ; Chat forestier ; Hamster d'Europe. Captures par piège photographique. ©Photothèque VINCI Autoroutes.

Ces dispositifs innovants font l'objet d'un suivi de leur fonctionnalité en phase d'exploitation par des pièges photographiques. Les premiers résultats sont encourageants.

2.3.5. FOCUS SUR LE JUMELAGE DE DEUX PASSAGES À FAUNE DE DEUX INFRASTRUCTURES PARALLÈLES : ÉCOPONT DU BAS-BRY AU-DESSUS DE L'A10 ET DE LA LIGNE TGV

En cas de jumelage d'un projet de passage à faune avec un autre ouvrage à faune (sur une autre infrastructure, par exemple), il convient de s'assurer de la bonne franchissabilité des deux ouvrages en continuité. Afin d'éviter de créer un effet « tunnel » (long couloir étroit) avec les deux ouvrages, il convient de préférer un positionnement décalé (décalage en douceur) avec une zone de tranquillité entre les deux

ouvrages. Par ailleurs, les lignes courbes doivent donner un aspect d'intégration de l'ouvrage. Il faut aussi travailler le plan architectural du passage entre les deux ouvrages avec des modelages doux et un aménagement végétalisé adapté pour maximiser les chances d'utilisation des deux ouvrages dans la continuité. Une zone de tranquillité entre les deux ouvrages doit être aménagée pour garantir une zone de repos et de sécurité aux animaux entre deux traversées.

2.4. ENTRETIEN DES OUVRAGES ET AMÉNAGEMENTS

Afin de garantir une fonctionnalité pérenne des aménagements pour la faune, un entretien régulier et une veille de vérification des équipements sont nécessaires à mettre en place.



Figure 47 : Écopont Le Bas-Bry, un passage pour la faune au-dessus de deux infrastructures. ©VINCI Construction Terrassement.



Figure 48: Vue satellite du site. ©Ortophotos Geoportail IGN.

Clôtures	Les clôtures et renforcements par grillage à petites mailles permettent le guidage de la faune vers les ouvrages traversants. Ces clôtures doivent être maintenues dans un état correct et remplacées en cas de détérioration. Une attention particulière doit être portée sur les points de raccords avec les ouvrages et les équipements et sur les équipements eux-mêmes (portails, portillons, passes-américaines, etc.) afin que le dispositif soit parfaitement étanche.
Brise-vues	Les brise-vues ont pour objectif de renforcer et prolonger l'occultation aux abords des ouvrages. Sensibles aux intempéries et notamment à une prise au vent importante, une surveillance régulière est nécessaire.
Végétation	<p>Après l'entretien lié à la garantie de reprise, un contrôle et un retrait progressif des tuteurs, attaches et protections anti-rongeurs doit être réalisé. Si des tailles s'imposent, les produits de tailles sont laissés sur place débités et placés au pied des plantations ou sur les amas pour servir de refuge pour la petite faune. Quant à la végétation spontanée, qui va naturellement se développer aux abords immédiats des entrées des passages inférieurs et sur les écoponts, des interventions ponctuelles sont à prévoir..</p> <p>Pour les passages inférieurs et notamment les écoducs, banquettes et encorbellement, l'objectif de l'entretien est d'éviter que cette végétation n'obture ou ne masque les accès immédiats à l'ouvrage pour en permettre la visite.</p> <p>Pour les écoponts, la logique est différente avec une largeur d'ouvrage et des entonnements permettant de raisonner par zones. L'objectif est d'obtenir une mosaïque de milieux ouverts et boisés pour conserver une partie dégagée et ouverte pour l'attractivité de la grande faune, et en parallèle des zones couvertes pour la petite et moyenne faune qui cherchera à se déplacer à couvert. L'attention se portera également sur la taille d'arbres de hauts jets qui se développeraient au-dessus des voies circulées.</p> <p>La fréquence d'intervention, dépendant notamment des conditions climatiques, sera de l'ordre d'une fois tous les 2 à 3 ans.</p> <p>Afin de respecter les périodes favorables à la faune, cet entretien doit être réalisé entre septembre et fin février. Lors des fauchages/débroussaillages mécaniques ou manuels, une attention doit être apportée aux grillages spécifiques à la petite faune qui sont plus fragiles afin de ne pas les dégrader.</p>



Figure 49: Développement excédentaire de la végétation dans une mare ©FNE Loire

Aménagements écologiques	<p>Les aménagements spécifiques (mares, abris petite faune) doivent faire l'objet d'une surveillance régulière. Les mares doivent être curées pour éviter un atterrissement progressif et/ou nettoyées de la végétation excédentaire qui s'y développe naturellement afin de maintenir la capacité en eau. Cette opération peut être réalisée tous les 3 à 5 ans en fonction de l'évolution du milieu et sur au moins 2/3 de la surface. Le curage est réalisé manuellement afin de ne pas percer l'éventuelle géomembrane qui assure l'étanchéité, en septembre-octobre lors de la période d'assec et en dehors des périodes de reproduction des Amphibiens (février/mars à juin).</p> <p>Les amas de bois, hibernaculum*, qui sont des gîtes à petite faune doivent être contrôlés et rechargés en branches, troncs, souches si besoin (dégradation naturelle, volontaire ou involontaire) de manière à maintenir une dimension d'environ 1 mètre par 1 mètre.</p>
Rampes piscicoles	<p>Les rampes piscicoles doivent être visitées régulièrement pour supprimer les éventuels embâcles (déchets, végétation) qui peuvent les obstruer et empêcher la circulation des poissons, en tenant compte du régime des crues. Les rémanents sont à valoriser sur la berge en abris pour la petite faune.</p>
Dépôts sauvages	<p>Il est nécessaire de veiller à la salubrité et à la tranquillité des lieux pour la faune en empêchant toute dégradation, tout stockage, en évacuant les dépôts sauvages, et en réparant les équipements dégradés.</p>



Figure 50 : Embâcle en entrée de rampe piscicole, rendant l'aménagement inutilisable par les poissons ©Photothèque VINCI Autoroutes

3.1. TYPOLOGIE ET CARACTÉRISTIQUES DES OUVRAGES SUIVIS

3.1.1. OUVRAGES SUIVIS RETENUS

Les ouvrages retenus pour la constitution de la base de données initiale concernent ceux ayant fait l'objet a minima d'un suivi par piège photographique dont les protocoles uniformisés depuis le premier retour d'expérience sont jugés suffisamment homogènes. Ces suivis réalisés entre juin 2011 et mars 2021 concernent **180 ouvrages** répartis sur 21 autoroutes du réseau VINCI Autoroutes et ses trois sociétés concessionnaires : ASF (139 ouvrages), Cofiroute (35 ouvrages) et Escota (6 ouvrages).

En moyenne, la mise en service des tronçons autoroutiers où les ouvrages ont été construits et suivis date de 1990 (\pm ET 15 ; minimum : 1961 ; maximum : 2017). Ces ouvrages se situent donc sur des tronçons autoroutiers assez anciens, à l'exception des ouvrages suivis sur la dernière section de l'autoroute A89 avec une mise en service en janvier 2013 entre Balbigny (Loire) et La Tour de Salvagny (Rhône), ainsi que pour le dédoublement et déplacement de l'A9 au droit de Montpellier (Hérault) achevé en 2017. Les ouvrages suivis ont été mis en service entre février 2011 et février 2019 dans le cadre du Paquet Vert Autoroutier (2009-2012), d'un contrat de Plan (2012-2016), du Plan de Relance Autoroutier (2016-2020), ou dans le cadre de nouveaux projets de construction autoroutiers comme l'A89 ou l'A9.

3.1.2. TYPOLOGIE DES OUVRAGES

La classification des ouvrages reprend ici le référentiel de VINCI Autoroutes adopté à l'issue du *Rex 1* qui différencie les ouvrages suivis retenus en **11 types d'ouvrages (Tableau 2)**. Si la majorité des ouvrages sont des ouvrages

dédiés au passage de la faune (150 ouvrages), certains ouvrages mixtes (6) et non dédiés (24) ont également été suivis :

- Passage mixte : passage aménagé en partie pour la faune (par exemple : route avec trottoir végétalisé).
- Passage non dédié : ouvrage non dédié à la faune (viaduc, passage supérieur/inférieur de rétablissement de voirie, ouvrage hydraulique) pouvant éventuellement permettre le passage de la faune.

Le **tableau 10 de l'annexe 1** indique par type d'ouvrage le nombre d'ouvrages suivis (par piège photographique) pris en compte dans la base de données.

3.1.3. PARAMÈTRES RETENUS DÉCRIVANT LES OUVRAGES

Certains aménagements et éléments de conception peuvent influencer l'utilisation des ouvrages par la faune. Un ensemble de 10 variables décrivant les ouvrages et leurs aménagements ont été testées pour expliquer l'occurrence hebdomadaire des espèces dans les ouvrages :

- Type d'ouvrage
- Largeur utile (mètres)
- Hauteur utile (mètres)
- Clôture grande faune enterrée
- Clôture petite faune
- Clôture petite faune pliée
- Clôture petite faune bas volet
- Protection acoustique
- Type de substrat au sol
- Puits de lumière

Les ouvrages suivis sont de longueurs relativement homogènes. Ne disposant pas de suffisamment d'ouvrages de longueurs différentes, cette variable liée à la dimension des ouvrages n'a pas été retenue pour l'analyse.

Types d'ouvrages suivis	Description	Illustration	
AMÉNAGEMENTS DÉDIÉS			
Écoduc	Buse sèche (sans vocation hydraulique) circulaire, dalot. Passage inférieur de petites à moyennes dimensions (jusqu'à environ 2 mètres de large) permettant le passage de la petite et moyenne faune sous l'infrastructure de transport (avec ou sans substrat terreux rapporté au sol).		
Banquette	Marche simple ou multiple, calée sur le radier et latéralement au sein d'un ouvrage hydraulique permettant le passage de la faune à pied sec (1 seule rive ou les 2 peuvent être aménagées).		
Encorbellement	Structure fixée aux parois d'un ouvrage généralement hydraulique, et connectée à la berge, permettant le passage à pied sec (1 seule rive ou les 2 peuvent être équipées).		
Enrochement/ berges naturelles	Berge reconstituée en enrochements permettant le passage de la faune à pied sec dans un ouvrage hydraulique (1 seule rive ou les 2 peuvent être aménagées).		
Passage inférieur toute faune	Passage inférieur d'une largeur suffisante et aménagé pour l'ensemble de la faune sauvage (petite, moyenne et grande). Une diversité d'habitats attractifs peut être créée aux abords de l'ouvrage (semis, plantations, mares, etc.) ou à l'intérieur (andains, gîtes, etc.) pour permettre le passage d'un maximum d'espèces animales en dessous de l'infrastructure de transport.		
Écopont (ou passage supérieur toute faune)	Passage supérieur végétalisé d'au moins 10 mètres de large, aménagé pour l'ensemble de la faune sauvage (petite, moyenne et grande), en créant une diversité d'habitats (semis, plantations, mares, andains, etc.) pour permettre le passage d'un maximum d'espèces animales au-dessus de l'infrastructure de transport.		

Tableau 2: Classification des ouvrages suivis (page suivante également)

Types d'ouvrages suivis	Description	Illustration
OUVRAGES MIXTES		
Passage inférieur mixte	Ouvrage d'art initialement conçu exclusivement pour la circulation routière et qui, dans un second temps, a été aménagé (à l'aide généralement d'un trottoir en revêtement naturel) pour faciliter les déplacements de la faune dans l'ouvrage, tout en maintenant la circulation routière.	
Passage supérieur mixte	Ouvrage d'art initialement conçu exclusivement pour la circulation routière et qui, dans un second temps, a été aménagé en partie supérieure pour faciliter les déplacements de la faune, tout en maintenant la circulation routière.	
OUVRAGES NON DÉDIÉS		
Passage inférieur non dédié	Passage inférieur (routier, agricole, forestier, etc.) non aménagé pour le passage de la faune, mais dont la configuration semble adaptée au passage de certaines espèces.	
Ouvrage hydraulique non dédié	Ouvrage hydraulique non aménagé pour le passage de la faune, mais dont la configuration semble adaptée au passage de certaines espèces, notamment en dehors des périodes en eau.	
Viaduc	Passage supérieur enjambant un talweg (vallée, rivière) et ses axes de déplacements associés.	

Le **tableau 10 de l'annexe 1** précise par type d'ouvrage, les dimensions moyennes des ouvrages suivis par piège photographique pris en compte dans la base de données.

L'ensemble des combinaisons de ces variables a été également testé pour expliquer l'occurrence des espèces en incorporant les coordonnées des ouvrages dans les deux axes d'une analyse factorielle de données mixtes (AFDM ; Lê *et al.* 2008) comme variable explicative aux modèles (c.f §4.4. modélisation).

3.2. ENVIRONNEMENT DES OUVRAGES SUIVIS

Dix variables décrivant l'environnement autour des ouvrages ont été retenues (les couches sources sont précisées entre parenthèses):

- les pourcentages d'occupation des sols en (1) zones boisées (BD Forêt® 2014), (2) zones bâties (BD TOPO®, v.2020), (3) prairies et (4) fourrages (Registre parcellaire graphique, RPG v.2020);
- les densités de (5) routes (Bd ROUTE 500®, v.2020), (6) haies (BD TOPO®, v.2020), (7) cours d'eau (BD Topage®, v.2019);
- les distances aux plus proches (8) cours d'eau (BD Topage®, v.2019), (9) lisières forestières (BD Forêt®, 2014) et (10) espaces protégés (SIC*, ZPS*, RNN*, RNR*, RNCFS*, ZNIEFF1*, ZNIEFF2* et APPB*; INPN 2021).

Ces variables ont été extraites dans les zones tampons respectivement de 500 mètres, 1 kilomètre, 5 kilomètres et 10 kilomètres autour des passages à faune (Pebesma 2018; Bivand & Rundel 2021; QGIS Development Team 2021;

RCore Team 2021), soit quatre échelles d'études. L'analyse de ces variables montre que les ouvrages suivis se répartissent le long de deux gradients d'habitats, et ceci pour les quatre échelles étudiées:

- un gradient depuis des habitats forestiers vers des paysages ouverts (prairies, cultures);
- un gradient depuis des habitats à sols naturels, agricoles ou forestiers vers des habitats à sols artificialisés (bâti/routes).

Aucun groupe d'ouvrage ne ressort en particulier, c'est-à-dire que les ouvrages se répartissent le long de ces deux axes. Quelques ouvrages se trouvent dans des paysages purement forestiers ou ouverts, mais la plupart se situent dans des paysages à occupation des sols variée. Ce patron s'observe aux quatre échelles étudiées.

Pour sélectionner l'échelle la plus pertinente pour chacune des variables paysagères, les variables aux quatre échelles ont été sélectionnées une à une par comparaison de modèles, en sélectionnant les modèles les plus explicatifs de l'occurrence hebdomadaire des espèces (c.f §4.4. modélisation).

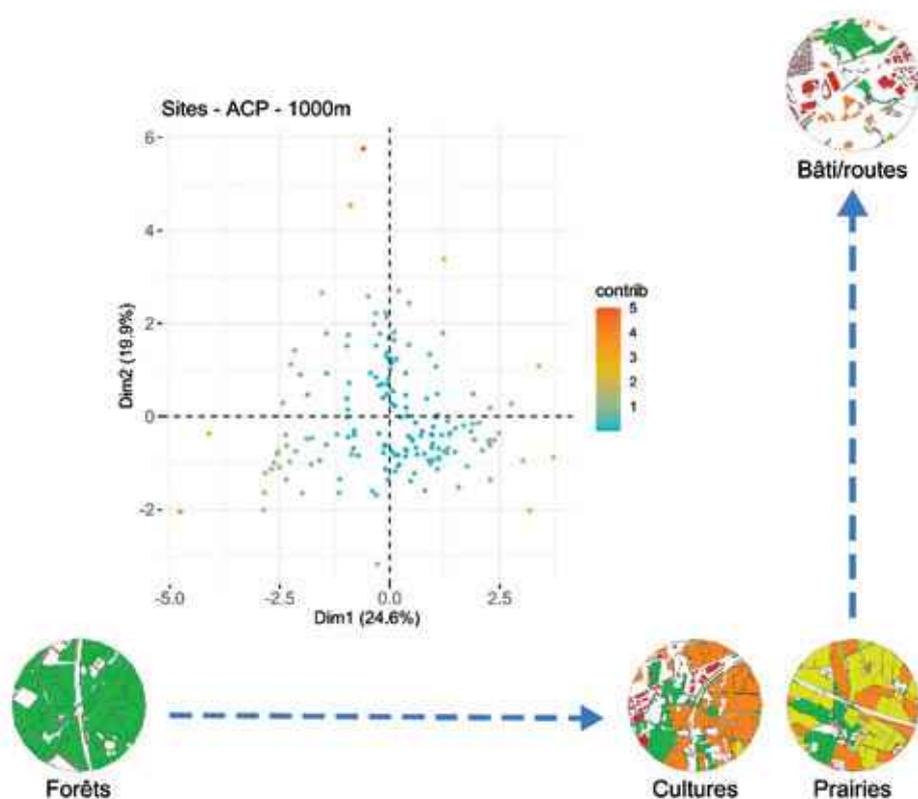


Figure 51 : Répartition des ouvrages (points) dans les deux premiers axes de l'espace factoriel de l'ACP (Analyse en Composante Principale ; Bates et al. 2015) portant sur l'environnement autour des ouvrages (ici, zone tampon d'un kilomètre). L'axe 1 (horizontal) représente un gradient d'habitats forestiers vers des habitats ouverts, et l'axe 2 (vertical) représente un gradient d'habitats à sols naturels, agricoles ou forestiers vers des habitats à sols artificialisés.

IV. SUIVI DE LA FRÉQUENTATION DES OUVRAGES : OBJECTIFS, PROTOCOLES ET ANALYSES



Figure 52 : Groupe de Blaireaux européens traversant une buse de 120 centimètres. ©ASF/LPO Sarthe.

4.1. LES OBJECTIFS

L'objectif premier des ouvrages étudiés ici est de rétablir en tout (restauration) ou en partie (atténuation) les mouvements de la faune de part et d'autre des autoroutes qui, en France, sont clôturées vis-à-vis de la grande faune pour limiter les risques de collisions entre les véhicules et la faune sauvage.

L'objectif des suivis faunistiques menés depuis 2011 sur le réseau VINCI Autoroutes a été de répondre en premier lieu à la question de l'utilisation : **l'aménagement mis en œuvre permet-il le franchissement de l'autoroute par la faune sauvage ?** Les suivis proposés ont ainsi pour objectif d'estimer **les espèces qui utilisent les ouvrages et leur fréquence**. Les données collectées depuis près de 10 ans par des protocoles standardisés offrent également l'opportunité aujourd'hui de comparer les résultats

de suivis obtenus sur près de 180 ouvrages pour étudier **les facteurs propres à l'environnement et aux ouvrages qui influencent les fréquences de passage des espèces**.

La question de l'efficacité des ouvrages et des moyens nécessaires à mettre en place pour tenter d'y répondre est abordée dans le chapitre 9. Cette question, qui s'intéresse non pas à la seule utilisation de l'ouvrage, mais à l'utilité qu'il représente pour maintenir en bon état de conservation une population d'une espèce animale donnée, est en fait beaucoup plus complexe et difficile à traiter. Par exemple, le passage unique d'un Cerf élaphe sur une saison entière peut rendre finalement un ouvrage plus efficient et utile qu'un ouvrage très fréquenté par une espèce abondante de part et d'autre de l'autoroute.

Mouvements et dispersion

Les animaux peuvent réaliser de nombreux mouvements au cours de leur cycle vital. Il existe de nombreuses classifications de ces mouvements, mais un consensus scientifique se fait grâce à une définition unifiée de la dispersion. La dispersion est définie comme le mouvement d'un individu de son aire de naissance vers une autre aire pour sa première reproduction (dispersion natale), ou le mouvement entre deux aires de reproduction successives (dispersion de reproduction). Cette définition est donc très intimement liée au phénomène de reproduction, le mouvement des individus pouvant s'accompagner d'un flux génique si la reproduction est réussie. La dispersion diffère donc des autres mouvements que réalisent les animaux pour leurs besoins fondamentaux comme la recherche de nourriture ou d'abri, par exemple, pour l'hivernage. Ces mouvements migratoires sont souvent saisonniers, avec des allers et retours entre les aires où ils se nourrissent, estivent ou hivernent. La dispersion et les mouvements migratoires relèvent de processus différents. La dispersion est décrite comme un processus en trois étapes : l'émigration (le mouvement de départ de l'aire de naissance ou de reproduction), le mouvement de transit dans la matrice paysagère et l'immigration (le mouvement d'arrivée dans l'aire de reproduction).

La dispersion est un processus central en écologie et en évolution, car elle influence fortement la dynamique des populations (qui sont distribuées dans des espaces favorables, mais discontinus, séparés par une matrice paysagère défavorable), les flux géniques et en conséquence les phénomènes évolutifs. Les individus peuvent être confrontés à un choix (faire le mouvement ou pas) aux différentes étapes de la dispersion. Le déterminisme de la dispersion peut dépendre de facteurs individuels (la dispersion peut être dépendante de la condition des individus comme leur stade – juvéniles versus adultes – ou leur condition corporelle) et de facteurs environnementaux (la dispersion est dépendante du contexte, comme les ressources ou la densité).

Dans le contexte des paysages anthropisés, les populations animales sont souvent confinées dans des espaces favorables et entourées d'une matrice paysagère défavorable et/ou parcourue par des infrastructures jouant le rôle de barrières. Les différents mouvements des animaux (terrestres) et la dispersion peuvent donc être affectés. Les passages à faune peuvent alors permettre l'expression de mouvements journaliers (p. ex. pour l'alimentation d'une Loutre d'Europe dans son territoire) et saisonniers (p. ex. pour le cantonnement de Chevreuils différents entre l'hiver et le printemps). Ils concourent à la réussite de la dispersion en permettant à des individus de réaliser leur reproduction dans des aires réparties de part et d'autre de l'infrastructure de transport.



Figure 53 : Piège photographique installé dans un écoduc de 120 centimètres. ©Alexis Orseau/LPO France.

4.2. LES PROTOCOLES MIS EN PLACE POUR LES SUIVIS VINCI AUTOROUTES

Les suivis concernés par cette étude rassemblent l'ensemble des suivis de passages à faune VINCI Autoroutes (ASF, COFIROUTE et ESCOTA) menés depuis 2011 et jusqu'à début 2021.

Entre-temps, le *Rex 1* publié en 2016 a été l'occasion de standardiser en partie la collecte et la saisie des données, en donnant par exemple des consignes sur la pose des pièges photographiques dans les ouvrages, sur les protocoles de suivi de la petite faune sur les écoponts, et sur les protocoles de saisie des données collectées selon des formats standardisés.

Cependant, en dépit des efforts menés vers une standardisation des protocoles, une certaine hétérogénéité demeure toujours qui est notamment liée à la diversité des acteurs intervenant dans les suivis (p. ex. les différents concessionnaires autoroutiers) et aux contraintes sur certains sites (risque de vol de matériel, accessibilité, etc.).

4.2.1. PROTOCOLES MIS EN PLACE POUR LES OUVRAGES SUIVIS PAR PIÈGES PHOTOGRAPHIQUES (HORS ÉCOPONT)

Pour répondre à la question de l'utilisation par la grande et moyenne faune de passages inférieurs de dimensions variables (de l'écoduc de moins de 1 mètre au passage inférieur de 3-4 mètres de large), les suivis de VINCI Autoroutes s'appuient principalement sur des suivis multispécifiques réalisés avec des pièges photographiques (Tableau 3) positionnés au sein des ouvrages (Figure 53). Les performances de ces appareils permettent de détecter de façon relativement homogène l'utilisation d'ouvrages inférieurs par la grande et la moyenne faune (Ongulés, Lagomorphes, Renards roux, Mustélidés*, etc.). La limite des appareils utilisés réside notamment dans le rapport distance de détection/taille de l'animal, l'emplacement du matériel doit donc être adapté en fonction de la taille de l'ouvrage suivi et des espèces cibles. Différents systèmes de déclenchement (infrarouge, vibration, Time-Lapse*) peuvent aussi être utilisés (cf. §4.2.). Dans tous les cas, un

	ASF	COFIROUTE
Matériel	Piège photographique infrarouge (Reconyx HC600)	Piège photographique infrarouge (Reconyx HC600) ou piège photographique à vibration (Cuddeback E3)
Position/orientation du matériel	<ul style="list-style-type: none"> ▶ positionné à l'intérieur de l'ouvrage, ▶ orienté vers l'intérieur (côté le plus long), ▶ hauteur de fixation entre 30 cm et 130 cm selon les espèces cibles, avec une inclinaison adaptée (cf. recommandations <i>Rex 1</i>, p. 118-119) ▶ pose d'un élément (grosse pierre) permettant à la faune de marquer devant le piège photographique 	
Réglages piège photographique	mode photo / sensibilité max / déclenchements 24h/24h / pas de délais	
Durée du suivi	3 ans	3/6/12 mois
Consignes de saisie	1 ligne saisie pour chaque passage détecté, a minima : date / heure / espèce / nb d'ind. / sens de déplacement / refus / remarque	
	saisie des passages d'humains et de faune domestique	
	modèle fichier Excel standardisé	modèle fichier Excel

Tableau 3 : Principales recommandations demandées par les concessionnaires pour les suivis d'ouvrages, hors écopont, par piège photographique.

minimum de recommandations est nécessaire afin d'optimiser la détectabilité des pièges photographiques et de collecter des données homogènes sur l'ensemble des suivis.

Le tableau suivant récapitule les principales recommandations transmises aux opérateurs de suivis depuis 2016 sur la collecte et la saisie des données de suivis multispécifiques dans l'objectif d'évaluer l'utilisation des ouvrages par la faune.

4.2.2. PROTOCOLES MIS EN PLACE POUR LES SUIVIS D'ÉCOPONTS

Du fait de leur taille importante et des aménagements spécifiques qui y sont installés (végétation, andains, mares, etc.), les écoponts ciblent une multitude d'espèces. Afin de répondre à la question des espèces qui utilisent les écoponts (en termes de traversée ou d'habitat de vie), différents protocoles de suivi sont mis en place.

La pose de plusieurs pièges photographiques est préconisée pour évaluer l'utilisation de l'ouvrage par la grande et la moyenne faune. La disposition des pièges photographiques doit alors être adaptée à la configuration des écoponts pour maximiser la détection des passages.

Pour la petite faune, à savoir les Micromammifères, les Chiroptères, les Reptiles et les Amphibiens, des protocoles spécifiques ont été adaptés à chacun des groupes et aux objectifs d'évaluation.

Ces suivis peuvent permettre en premier lieu de savoir si l'écopont est utilisé comme corridor (déplacement de part et d'autre de l'autoroute), et également de savoir dans certains cas s'il est utilisé comme habitat pour l'établissement de certaines espèces possédant des domaines vitaux réduits (micro-habitats créés par les mares, andains, etc.). D'autres suivis pour l'avifaune ou l'entomofaune volante (rhopalocères*, etc.) ont été réalisés, mais sans protocole adapté à la problématique de franchissement d'une autoroute. Il s'agit pour ces espèces d'une problématique à part entière (Jones & Pickvance 2013) non abordée ici.

Le tableau 4 liste les types de protocoles de suivis des concessionnaires VINCI Autoroutes pour chaque groupe étudié.

4.3. DESCRIPTION DES SUIVIS

4.3.1. ORGANISMES EN CHARGE DES SUIVIS

42 structures (associations de protection de la nature, fédérations départementales de chasse, bureaux d'études) ont eu en charge l'organisation des suivis faunistiques par pièges photographiques de l'ensemble des ouvrages selon des protocoles et cahiers des charges définis par chaque concessionnaire (cf. Tableau 3).

	ASF	ESCOTA	COFIROUTE
Mammifères (Grande et moyenne faune)	4 pièges photographiques infrarouges Reconyx HC600 disposés au milieu du tablier, orientés vers le centre de l'ouvrage, et fixés à une hauteur de 100-130 cm.	Pièges photographiques infrarouges et pièges à traces	2 pièges photographiques et 3 pièges à traces par écopont
Micromammifères	CMR* (pièges INRA)	Pièges à encre, pièges INRA	-
Reptiles	Techniques de détection décrites dans POPReptile (SHF)	Prospections ciblées	-
Amphibiens	Techniques de détection décrites dans POPAmphibien (SHF)	Prospections ciblées	-
Chiroptères	Études spécifiques (cf. étude Naturalia Environnement)	Écoute active, enregistrement passif	-
Durée des suivis	3 ans	5 ans	-

Tableau 4 : Principaux protocoles utilisés par les concessionnaires pour les suivis d'écoponts.



Figure 54 : Différents dispositifs de suivi le long d'un andain : plaque à Reptiles et pièges INRA pour Micromammifères. ©ASF/LPO Auvergne/GMHL.

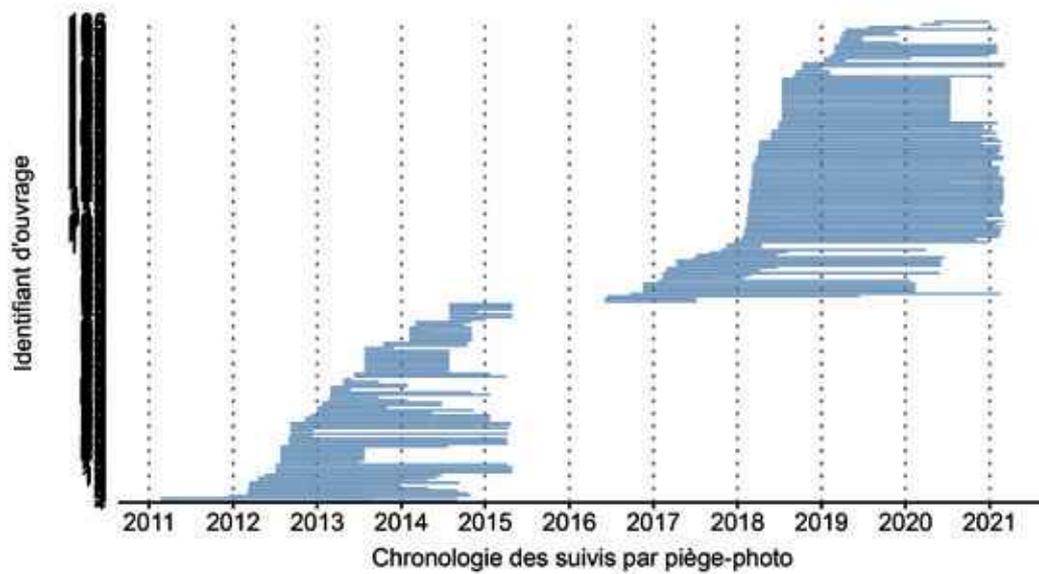


Figure 55 : Pression d'observation (période de fonctionnement) des pièges photographiques sur les 178 ouvrages suivis retenus pour l'analyse (178 ouvrages retenus sur les 180 suivis).

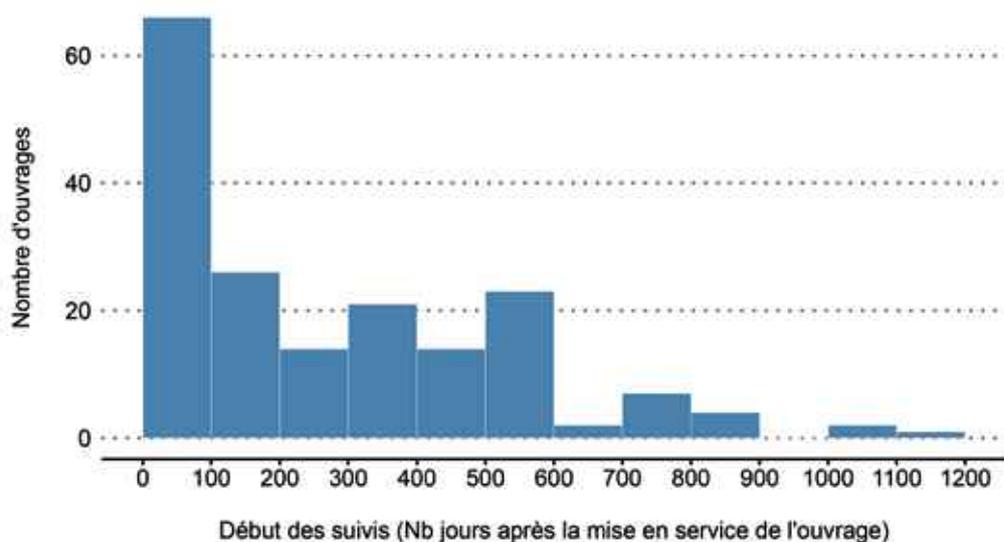


Figure 56 : Délai (en jours) de début des suivis par rapport à la mise en service des ouvrages (180 ouvrages).

Les organismes en charge des suivis et les efforts d'échantillonnage réalisés sont listés en **annexe 2**. Chaque suivi est accompagné de rapports d'étape et d'un rapport final.

4.3.2. DESCRIPTION DES PÉRIODES ET DURÉES DES SUIVIS

La durée des suivis, ainsi que leur période de déploiement par rapport à l'installation des ouvrages, sont également des facteurs connus pour influencer sur les fréquences de passages détectés.

Dans le cas du présent retour d'expérience, la durée moyenne d'un suivi est de **572 jours, soit 1 an et 7 mois** (ET = 362 jours ; min = 32, max = 1 204 jours, soit 3 ans et 4 mois ; Q 25 % = 242, Q 75 % = 970). La majorité des suivis sont ainsi finalement d'assez courte durée (67 % < 2 ans et 33 % < 1 an) et seuls 17 ouvrages atteignent 3 ans de suivi. La Figure 56 permet de visualiser la répartition et la durée des suivis entre 2011 et 2021. Sur les 180 ouvrages constituant la base de données, 178 ouvrages ont été retenus pour l'analyse.

Avec une date médiane de début des suivis de 194 jours (6,4 mois) après la mise en service des ouvrages, les suivis prennent place en majorité très rapidement après l'installation des ouvrages (Figure 55).

4.3.3. DESCRIPTION DU MATÉRIEL : PIÈGES PHOTOGRAPHIQUES DÉPLOYÉS

Si le premier retour d'expérience proposait des éléments allant vers une harmonisation du positionnement et des dispositifs de pièges photographiques, dans la pratique, les suivis diffèrent par les modèles de pièges photographiques utilisés, le système de déclenchement et leurs positionnements. Ces facteurs sont connus pour influencer sur les taux de détection des différentes espèces cibles.

Modèle du piège photographique :

Près de **15 modèles** de pièges photographiques, dans la gamme des modèles les plus récents développés par les différents distributeurs, ont été déployés pour le suivi des ouvrages étudiés. La performance des pièges photographiques est connue pour varier selon les marques et les différentes générations de modèles (Swan *et al.* 2014; Driessen *et al.* 2017; Apps & McNutt 2018). Pour des suivis s'intéressant à des comparaisons multisites et/ou des séries temporelles, il est alors conseillé de privilégier l'utilisation d'un modèle unique de piège photographique et des positionnements similaires. Les suivis s'étalant ici sur plus de 10 ans, les modèles privilégiés entre 2011 et 2015 (*Rex 1*) sont déjà dépassés

par rapport aux dernières générations de matériel choisi pour les suivis les plus récents.

Système de détection et réglages du piège photographique :

Actuellement, la majorité des modèles de pièges photographiques sont équipés de capteurs infrarouges passifs (PIR) qui sont déclenchés par des objets en mouvement dont la température de surface est différente de celle de l'environnement de fond (Welbourne *et al.* 2016; Wearn & Glover-Kapfer 2017). Cette méthode de détection est spécifique en cela qu'elle manquera une partie des espèces endothermes qui produisent une chaleur trop faible (Micromammifères ou petits vertébrés) et la plupart des espèces ectothermes qui ne produisent pas de chaleur (Reptiles, Amphibiens et invertébrés).

Ici, l'ensemble des pièges photographiques sont configurés avec au minimum un **déclenchement infrarouge**. Ces dispositifs peuvent être couplés à d'autres systèmes de détection actifs externes. Ainsi, pour environ 10 % des suivis (23 ouvrages), les pièges photographiques sont couplés à des systèmes de détection par vibration (toile disposée au sol captant les vibrations, *Rex 1*, p. 122) permettant une détection accrue de la petite faune. À noter que les réglages et le positionnement de la toile à vibration sont délicats, elle peut se révéler peu efficace si elle est mal positionnée. Celle-ci peut également matériellement perturber le passage de la faune (une période d'accoutumance est parfois nécessaire).

Pour un suivi particulier visant à détecter les déplacements d'Amphibiens, le piège photographique a été configuré en mode « Time-Lapse », c'est-à-dire la prise d'une photo à un pas de temps fixe et régulier. Cette technique impose des tests afin de définir le pas de temps idéal permettant de ne pas rater de passages d'Amphibiens entre deux photographies (cela dépend notamment du champ de vision de l'appareil). Cette fréquence de photographies permet de calculer l'autonomie de la carte mémoire de l'appareil et impose un pas de temps plus régulier des relèves.

De manière générale, le mode photo est privilégié par rapport au mode vidéo, plus lourd à traiter/stocker et ralentissant la vitesse de déclenchements des appareils. Ce mode peut toutefois être utilisé pour d'autres objectifs de suivi (comportement de la faune vis-à-vis de l'aménagement, etc.).

Le réglage de la sensibilité de détection est normalement toujours calé au maximum de la sensibilité des appareils. Cette sensibilité peut cependant varier entre les différents modèles sans connaître précisément dans quelle mesure.

Positionnement et orientation du piège photographique :

Afin d'observer les animaux traversant les ouvrages, les pièges photographiques sont positionnés **à l'intérieur des ouvrages**. Quelques exceptions concernent notamment les écoponts où des pièges photographiques peuvent être disposés de façon à observer également la faune aux abords des ouvrages (cf. §8.1).

La hauteur et la direction des pièges photographiques sont deux paramètres essentiels qui peuvent impacter fortement le nombre de détections obtenues. Si des consignes ont été données pour un positionnement optimal des pièges photographiques (Tableau 3), les contraintes inhérentes à certains sites et ouvrages ont mené des opérateurs à fixer les appareils à une hauteur plus haute que préconisée, avec en contrepartie une dégradation de la détection des passages compromettant la qualité du suivi (Meek *et al.* 2016). Le risque de vol des pièges photographiques est ainsi la première contrainte à leur positionnement optimal. Le souci de ne pas entraver le passage de la faune, ou l'évitement de zones susceptibles de déclencher les appareils de façon intempestive (eau, végétation, reflets du soleil, etc.), ou encore l'accessibilité de l'ouvrage suivi sont également pris en compte.

Dans le cas de petits ouvrages d'une largeur de l'ordre du mètre ou moins (banquette, écoduc, encorbellement), la majorité (70-80 %)



Figure 57 : Orientations possibles des pièges photographiques (en rouge) par rapport aux cheminements visés (en vert). a) positionnement « au-dessus », dans l'axe; b) positionnement « en biais », sur un côté; c) positionnement « à la perpendiculaire » du cheminement.

des pièges photographiques ont été disposés « au-dessus » du cheminement et orientés légèrement vers le bas (Figure 57) dans l'axe du cheminement (pour couvrir également la partie du sol devant le piège photographique). Ce positionnement permet de ne pas restreindre la largeur des cheminements au niveau du sol et permet d'apprécier les traversées des animaux sur de plus longues distances. Il peut cependant perturber momentanément certains individus (cf. question p. 74 : « La présence d'un piège photographique impacte-t-elle le comportement des animaux empruntant l'ouvrage? ») qui se retrouvent face aux appareils émettant des flashes « noirs » et des bruits électroniques (Wearn & Glover-Kapfer 2017). Ce positionnement n'est parfois pas privilégié par les opérateurs de suivi, car les animaux présentent alors peu de mouvements latéraux pour les capteurs. Jumeau *et al.* (2017) ont cependant montré que pour un système de détection infrarouge Reconyx HC600, ce paramètre (mouvement vertical ou horizontal) n'avait pas d'effet sur l'efficacité de la détection. Pour éviter certains de ces biais, dans les ouvrages de dimensions moyennes (supérieures au mètre), des pièges photographiques ont été positionnés sur un côté et orientés « en biais » (20° à 45°) par rapport au cheminement (Figure 57).

Dans les ouvrages inférieurs de plus grande largeur (largeur d'au moins 2-3 mètres), la contrainte de réussir à couvrir toute la largeur de l'ouvrage en fonction de la portée maximale des appareils impose parfois de positionner l'appareil sur un côté, orienté « à la perpendiculaire » du cheminement (Figure 57). Ce positionnement est

considéré comme théoriquement optimal pour le fonctionnement des capteurs de mouvement (Wearn & Glover-Kapfer 2017), car il permet de maximiser la quantité de déplacement des animaux que le capteur détectera. Les déplacements trop près des appareils étant plus furtifs, certains passages peuvent alors être manqués.

Dans le cas des écoponts, le déploiement est multiple (cf. *Rex 1*, p. 119-120) et varie selon les concessionnaires et les configurations des écoponts. Entre deux et quatre pièges photographiques (selon la portée de détection des appareils et la largeur des écoponts) sont disposés au milieu du tablier et orientés vers le centre de l'ouvrage afin de couvrir toute la largeur de l'écopont pour détecter un maximum de taxons (principalement la grande et la moyenne faune). Une hauteur de fixation de 100 à 130 centimètres pour ces appareils permet de limiter le biais lié à la pousse de la végétation venant masquer les objectifs. Le choix de positionner les appareils au milieu du tablier permet d'interpréter au mieux les traversées effectives des écoponts par les animaux. Pour les petits Mammifères (petits Mustélinés, Hérisson d'Europe, etc.), ces pièges photographiques sont la plupart du temps insuffisants, car la distance de détection devient trop importante vis-à-vis de la taille des individus, et la végétation peut être trop haute. Le choix peut alors être fait d'orienter d'autres pièges photographiques sur des cheminements ou coulées identifiés pour ces espèces plus petites et plus furtives (le long des andains, des palissades, etc.).

Les pièges photographiques orientés sur les abords de l'ouvrage :

Les premiers suivis par pièges photographiques réalisés dans le cadre du Paquet Vert Autoroutier (2009-2012) par VINCI Autoroutes visaient à positionner un piège photographique à l'intérieur de l'aménagement afin d'estimer leur utilisation par la faune. Parallèlement, d'autres pièges photographiques étaient positionnés à l'entrée des ouvrages afin d'estimer également la part des espèces/individus qui échouaient à traverser les aménagements. Ces suivis ont finalement été abandonnés suite à de trop grosses contraintes techniques (p. ex. vols de matériel, biais de détection lié à la végétation).

En effet, certains pièges photographiques positionnés sur les entrées des aménagements sont alors orientés sur des abords végétalisés, les déclenchements intempestifs sur la végétation (« faux positifs ») usent alors systématiquement les batteries des appareils dont l'autonomie est parfois réduite à quelques heures/jours (Figure 58). Des vols répétés des pièges à photos, plus visibles aux entrées des ouvrages, empêchent également certains de ces suivis.

4.4. MODÉLISATION DE L'OCCURRENCE HEBDOMADAIRE DES ESPÈCES DANS LES PASSAGES À FAUNE

Modélisation

Pour expliquer les occurrences (absence/présence) hebdomadaires des espèces dans les ouvrages, des modèles linéaires généralisés mixtes (GLMM avec réponse binomiale et lien logit ; R Core Team 2021, Bates *et al.* 2015) ont été construits, respectivement pour les passages de type inférieurs et les écoponts, en testant l'information apportée par :

- les variables descriptives des ouvrages (c.-à-d. typologie, dimensionnements et aménagements des ouvrages ; cf. 3.1.3);
- les variables descriptives de l'environnement des ouvrages (dans un rayon de 500 mètres, 1 kilomètre, 5 kilomètres et 10 kilomètres autour des ouvrages ; cf. 3.2);
- la saison météorologique (automne, hiver, printemps, été);
- la région biogéographique (région atlantique, méditerranéenne et continentale);



Figure 58 : entrée d'un écoduc de 80 centimètres de diamètre envahi par la végétation et rendant le suivi du piège photo de l'entrée impossible. ©ASF/LPO France.

- les cooccurrences de l'Homme et des principales espèces domestiques fréquentant les ouvrages, soit les Chats et les Chiens domestiques.

Pour tenir compte de la pseudo-réplication et de la non-indépendance spatiale des données d'occurrences entre elles, l'identifiant des ouvrages et un identifiant de groupe d'ouvrages (défini selon l'autocorrélation spatiale des données entre les ouvrages) ont été intégrés aux modèles en tant que variables aléatoires.

Pour chacune des espèces, toutes les combinaisons possibles des variables explicatives ont été testées et les modèles les plus informatifs ont été retenus. Un modèle de consensus a ensuite été réalisé sur la base de la moyenne des modèles retenus (Barton 2015).

Pour le détail complet des analyses se référer à Vacher *et al.* (2022), disponible sur demande auprès de VINCI Autoroutes.

Sélection des taxons

12 espèces de Mammifères sauvages (ramenées à 11 taxons, car les données de Martres des pins, Fouines et *Martes sp.* ont été combinées en une seule sous l'appellation « *Martes sp.* ») ont été sélectionnées selon leurs fréquentations détectées dans les ouvrages (minimum de 900 passages) et leurs occurrences respectives dans les ouvrages de type passages inférieurs (8 taxons) et écoponts (8 taxons) :

- Blaireau européen, *Meles meles*
- Renard roux, *Vulpes vulpes*
- Chevreuil, *Capreolus capreolus*
- Martes sp. (Fouine, *Martes foina* ou Martre des pins, *Martes martes*)
- Lapin de garenne, *Oryctolagus cuniculus*
- Lièvre d'Europe, *Lepus europaeus*
- Sanglier, *Sus scrofa*
- Ragondin, *Myocastor coypus*
- Genette commune, *Genetta genetta*
- Cerf élaphe, *Cervus elaphus*
- Hérisson d'Europe, *Erinaceus europaeus*

À ces espèces sauvages s'ajoutent le Chat domestique, le Chien domestique et l'Homme.

V. INFLUENCE DE LA CONCEPTION ET DE L'ENVIRONNEMENT DES OUVRAGES

Afin de répondre à des questions sur l'influence de variables de dimensionnement ou d'environnement sur la fréquentation des passages à faune par les animaux, le modèle statistique construit (cf. §3.1.3., §3.2. et §4.4.) est utilisé. En l'absence de résultats significatifs pour certaines questions, l'apport de la bibliographie permettra d'apporter un éclairage sur les questions les plus importantes.

Certaines variables (notamment les clôtures, les protections acoustiques et les puits de lumière) ne sont pas ressorties comme explicatives de l'occurrence des espèces observées. Elles ne sont donc pas abordées dans les chapitres suivants.

5.1. RÉSULTATS INTRODUCTIFS : QUELLES ESPÈCES UTILISENT LES OUVRAGES ?

Le tableau 5 récapitule l'ensemble des espèces de Mammifères détectées dans les ouvrages.

Un très grand panel d'espèces est présent dans les ouvrages suivis. Plus nombreux, les ouvrages inférieurs touchent logiquement davantage d'espèces que les écoponts. Cependant, les écoponts sont les seuls ouvrages où les

plus grandes espèces de la faune sauvage française sont observées (Cerf élaphe, Loup gris notamment).

Les espèces sauvages les plus observées dans les ouvrages sont, sans surprise : le Blaireau européen (27 375 observations dans 133 ouvrages), le Renard roux (23 369 observations dans 109 ouvrages) et le Chevreuil (13 565 observations dans 27 ouvrages dont 14 écoponts), toutes des espèces communes sur l'ensemble du territoire. Des espèces plus rares, menacées au niveau national, sont également présentes comme le Putois (« Vulnérable » sur la liste rouge nationale UICN France *et al.* 2017 ; observé sur 22 ouvrages), ou le Loup gris (« Vulnérable », observé sur 2 écoponts).

D'autres espèces, localement rares comme la Loutre d'Europe (observée à 55 reprises dans 11 ouvrages), l'Hermine (observée à 19 reprises dans 10 ouvrages) sont également présentes. À noter également la présence exceptionnelle dans un écoduc des Bouches-du-Rhône, du Chacal doré, espèce très mobile venant d'Europe centrale, mais encore très peu observée en France.

ORDRE Familie	Nom vernaculaire	Nom scientifique	Nb total de traversées	Nb d'ouvrage utilisés		
				Inférieurs	Écoponts	Sel
CARNIVORA						
Mustelidae	Loutre d'Europe	<i>Lutra lutra</i>	55	11	-	
Mustelidae	Fouine	Martes foina	3 569	90	8	X
Mustelidae	Martre des pins	Martes martes	898	32	5	X
Mustelidae	Fouine/Martre	Martes foina/martes	3 687	93	10	X
Mustelidae	Blaireau européen	Meles meles	27 375	109	14	X
Mustelidae	Hermine	<i>Mustela erminea</i>	19	10	-	
Mustelidae	Belette	<i>Mustela nivalis</i>	54	15	1	
Mustelidae	Putois	<i>Mustela putorius</i>	170	22	3	
Mustelidae	Putois/visons ind.	<i>Mustela putorius/lutreola/vison</i>	4	4	-	
Mustelidae	Mustélidés ind.	<i>Mustelidae sp.</i>	356	18	5	
Viverridae	Genette commune	Genetta genetta	1 826	47	1	X
Canidae	Renard roux	Vulpes vulpes	23 369	133	15	X
Canidae	Loup gris	<i>Canis lupus</i>	36	0	2	
Canidae	Chacal doré	<i>Canis aureus</i>	2	1	-	
Canidae	Chien domestique	Canis familiaris	988	65	14	(*)
Canidae	Canidés ind.	<i>Canidae sp.</i>	4	1	1	
Felidae	Chat sauvage	<i>Felis silvestris</i>	687	15	6	
Felidae	Chat sauvage/domestique	<i>Felis sp.</i>	160	16	1	
Felidae	Chat domestique	Felis catus	10 614	102	14	(*)
Procyonidae	Raton laveur	<i>Procyon lotor</i>	3	3	-	
LAGOMORPHA						
Leporidae	Lièvre d'Europe	Lepus europaeus	5 167	5 167	13	X
Leporidae	Lièvres ind.	<i>Lepus sp.</i>	413	413	1	
Leporidae	Lapin de garenne	Oryctolagus cuniculus	6 223	6 223	6	X
Leporidae	Lapin/Lièvre	<i>Leporidae sp.</i>	69	69	2	
	Lagomorphes ind.	<i>Lagomorpha sp.</i>	3	3	-	
RODENTIA						
Muridae	Mulot sylvestre	<i>Apodemus sylvaticus</i>	184	5	3	
Muridae	Apodemus ind.	<i>Apodemus sp.</i>	202	4	-	
Muridae	Souris grise	<i>Mus musculus</i>	6	2	-	
Muridae	Souris ind.	<i>Mus sp.</i>	4	1	-	
Muridae	Rat surmulot	<i>Rattus norvegicus</i>	353	27	2	
Muridae	Rat noir	<i>Rattus rattus</i>	3	3	-	
Muridae	Rats ind.	<i>Rattus sp.</i>	806	37	1	
Muridae	Muridés ind.	<i>Muridae sp.</i>	224	25	1	

Tableau 5 : Liste des espèces détectées dans les ouvrages : nombre total de traversées des espèces et d'ouvrages dans et sur lesquels les espèces ont été détectées et espèces sélectionnées pour le modèle d'analyse.

ORDRE Famille	Nom vernaculaire	Nom scientifique	Nb total de traversées	Nb d'ouvrage utilisés		
				Inférieurs	Écoponts	Sel
Cricetidae	Rat musqué	<i>Ondatra zibethicus</i>	4	3	-	
Cricetidae	Campagnol roussâtre	<i>Clethrionomys glareolus</i>	14	2	-	
Cricetidae	Campagnols ind.	<i>Arvicola sp.</i>	33	6	-	
Cricetidae	Arvicolinés ind.	<i>Arvicolinae sp.</i>	10	3	-	
Myocastoridae	Ragondin	Myocastor coypus	1 902	71	3	X
Sciuridae	Écureuil roux	<i>Sciurus vulgaris</i>	452	20	2	
Gliridae	Lérot	<i>Eliomys quercinus</i>	48	2	-	
Gliridae	Muscardins/Lérots ind.	<i>Leithiinae sp.</i>	1	1	-	
	Rongeurs ind.	<i>Rodentia sp.</i>	46	4	-	
EULIPOTYPHLA						
Erinaceidae	Hérisson d'Europe	Erinaceus europaeus	1 137	56	5	X
Soricidae	Musaraignes ind.	<i>Soricidae sp.</i>	27	3	-	
Talpidae	Taupe d'Europe	<i>Talpa europaea</i>	1	1	-	
CETARTIODACTYLA						
Cervidae	Chevreuil	Capreolus capreolus	13 565	27	14	X
Cervidae	Cerf élaphe	Cervus elaphus	1 605	0	5	X
Bovidae	Chamois	<i>Rupicapra rupicapra</i>	1	0	1	
Bovidae	Chèvre domestique	<i>Capra hircus</i>	31	2	-	
Bovidae	Mouton domestique	<i>Ovis aries</i>	13	2	2	
Suidae	Sanglier	Sus scrofa	5 489	31	15	X
Equidae	Cheval domestique	<i>Equus caballus</i>	1	0	1	
CHIROPTERA						
	Chiroptères ind.	<i>Chiroptera sp.</i>	165	35	1	
PRIMATES						
Hominidae	Homme	Homo sapiens	2662	48	14	(*)
INDÉTERMINÉS						
	Mammifères ind.	<i>Mammalia</i>	805	65	9	
	Micromammifères ind.	<i>Micromammal sp.</i>	642	39	7	

(*) Sélection comme variables explicatives de cooccurrences des espèces sauvages dans et sur les ouvrages.

Figure 59 : Nombre de traversées par les 16 espèces identifiées les plus détectées au cours des suivis (tous ouvrages confondus) par ordre décroissant



Blaireau européen : 27 375 ©E. Rondeau



Renard roux : 23 689 ©E. Rondeau



Chevreuil : 13 565 ©E. Rondeau



Lapin de garenne : 6 223 ©VINCI Autoroutes



Sanglier : 5 485 ©VINCI Autoroutes



Lièvre d'Europe : 5 167 ©E. Rondeau



Martre des pins et Fouine : 3 687 ©E. Rondeau



Ragondin : 1 902 ©E. Rondeau



Genette commune : 1 826 ©E. Rondeau



Cerf élaphe: 1 605 ©E. Rondeau



Hérisson d'Europe: 1 137 ©VINCI Autoroutes



Chat forestier: 687 ©E. Rondeau



Putois: 170 ©E. Rondeau



Loutre d'Europe: 55 ©VINCI Autoroutes



Belette: 54 ©VINCI Autoroutes



Loup gris: 36 ©VINCI Autoroutes

Figure 60 : Observations particulières



Accouplement de Renards roux sur un écopont



Face à face entre un Renard roux et un Putois dans un écoduc



Canne et ses canetons dans un écoduc



Renard roux tombant nez à nez avec une grenouille



Blaireau européen gîté dans un écoduc



Âne dans un écoduc de 120 cm de diamètre



Chiroptère dans un écoduc de 120 cm de diamètre



Raton laveur dans un écoduc

Figure 60 : L'utilisation de pièges photographiques a permis l'observation d'espèces et de comportements remarquables. Au total, plus de 500 000 photos ont été prises dans les ouvrages.



Papillon dans un écoduc



Combat de Chevreuils sur un écopont



Bouquinage du Lièvre d'Europe sur un écopont



Lérot sur un encorbellement d'un ouvrage hydraulique



Famille de Chats forestiers traversant un écopont



Buse en chasse sur un écopont



Chacal doré – première observation dans un écoduc dans les Bouches-du-Rhône



Fouine tirant le cadavre d'un congénère sur un encorbellement d'un ouvrage hydraulique



© E. Rondeau

“ L'utilisation des pièges photographiques permet parfois de capturer des comportements d'interaction entre deux individus. Ici deux renards se rencontrent à la sortie d'un encorbellement.. ”

5.2 LES DIMENSIONS DES OUVRAGES ONT-ELLES UN IMPACT SUR LA FRÉQUENTATION PAR LA FAUNE ?

Le modèle de la présente étude ne permet pas de montrer d'influence significative des variables de dimensions des ouvrages (hauteur et largeur utiles pour les ouvrages inférieurs ; largeur pour les écoponts) sur la fréquentation des espèces. L'une des limites de cette analyse demeure en effet dans la relative homogénéité du dimensionnement des ouvrages qui sont pour la plupart standardisés dans leur conception. Les cas extrêmes (ouvrages de très grandes dimensions comme les écoponts) sont en nombre par ailleurs trop limités pour permettre une analyse statistique.

Concernant la longueur, la variable n'a pas été retenue dans le cadre de notre étude faute d'un nombre suffisant d'ouvrages de longueurs différentes pour réaliser une analyse statistique. Cependant, le *Rex 1* constatait que les 9 ouvrages inférieurs de plus de 80 mètres de long semblaient moins fréquentés que le reste des ouvrages et qu'ils étaient essentiellement fréquentés par des espèces fouisseuses plus enclines à emprunter des ouvrages dont l'effet tunnel est important (*Rex 1*, p. 122).

5.3 QUEL DIMENSIONNEMENT POUR UN ÉCOPONT ?

D'après l'analyse des ouvrages VINCI Autoroutes

Les analyses menées dans le cadre du *Rex 2* ne donnent pas de résultats significatifs sur cette question. Ici (comme dans la littérature), une des limites d'analyse réside probablement dans le nombre d'écoponts suivis (15) qui présentent finalement des largeurs très standardisées comprises entre 11 et 25,8 mètres (2/3 des ouvrages ont une largeur utile comprise entre 15 et 25 mètres). Le nombre moyen de passages détectés par jour semble augmenter avec la largeur des écoponts, mais ce constat mérite d'être conforté par des analyses complémentaires.

D'après la bibliographie

La question du dimensionnement des écoponts reste une question souvent centrale pour les aménageurs devant trouver, au regard des enjeux, un compromis entre une franchissabilité suffisante et un coût acceptable. Cette question est donc ici développée notamment par l'intermédiaire de la bibliographie existante.

La question de l'efficacité demeure cependant complexe et les études menées sur le sujet ne sont pas nombreuses. De plus, elles traitent le plus souvent le dimensionnement sous l'angle de l'utilisation plutôt que de l'efficacité des ouvrages. Or, un ouvrage peut être efficace tout en étant peu utilisé. C'est le cas concernant le brassage génétique où le passage de quelques individus (voire d'un seul dans le cas des grandes espèces comme le Cerf élaphe) peut suffire à maintenir un flux génétique, mais insuffisant pour maintenir des populations à effectifs viables d'un côté et/ou de l'autre de l'infrastructure. La question devient alors : combien faut-il de passages pour qu'un ouvrage soit efficace ? Tout cela va dépendre de l'espèce en jeu, de la dynamique et de l'état de conservation de ses populations sur le secteur où est implanté l'ouvrage en question.

Pfister *et al.* (1999) dans une étude menée en Europe sur 21 écoponts de largeur variant de 3,4 mètres à 186 mètres ont montré que les écoponts les plus étroits (< 20 mètres) sont significativement moins utilisés que les plus larges. Sur cette base, ils recommandent une largeur d'au moins 50 mètres pour assurer le passage de grands Mammifères pour une utilisation quotidienne des ouvrages sans stress. Le COST341* (luell *et al.* 2003) recommande ainsi pour la grande faune en Europe une largeur optimale de 40 à 50 mètres pour les écoponts. Cette largeur pouvant être abaissée à un minimum de 20 mètres si le but est seulement de fournir un mouvement de corridor pour les espèces peu sensibles, ou lorsque la topographie a un effet de canalisation conduisant les animaux directement sur la traversée.

En Amérique du Nord, les recommandations sont du même ordre de grandeur (minimum de 40-50m de largeur pour 50-70m recommandés ;

Clevenger & Huijser 2011).

Ce type d'étude devrait aujourd'hui être à nouveau envisagée à l'échelle européenne avec un plus grand panel d'ouvrages, compte tenu notamment du nombre d'ouvrages plus important et de l'évolution des techniques de suivi.

Le récent guide du CEREMA publié en 2021 traite du sujet du dimensionnement des ouvrages. Les pages 95, 102 et 103 de ce document préconisent ainsi les largeurs d'ouvrage en fonction du niveau d'enjeu de la continuité écologique.

· Cerema. *Les passages à faune. Préserver et restaurer les continuités écologiques avec les infrastructures linéaires de transport.* Bron : Cerema, 2021. Collection : références. ISBN : 978-2-37180-525-5 (PDF)

En Europe, la majorité des écoponts ont une largeur comprise entre 25 et 80 mètres et la largeur optimale de ceux-ci dépend des espèces

qui pourraient être amenées à utiliser l'ouvrage situé sur un corridor écologique majeur. C'est pourquoi il est finalement difficile de déterminer une largeur optimale générique. La largeur minimale de l'écopont doit ainsi être adaptée à la fois aux exigences des (grandes) espèces cibles mobiles qui traversent régulièrement l'ouvrage, et aux exigences des espèces cibles moins mobiles (petites) qui utilisent le passage à faune comme continuum d'habitat, sur une durée de parfois plusieurs générations (van der Grift *et al.* 2011). L'identification des espèces dites « dimensionnantes », espèces patrimoniales, espèces de la trame verte et bleue, depuis le niveau régional jusqu'au niveau local est alors un élément clé pour définir le dimensionnement de l'ouvrage et ses aménagements de surface.

Le Cerf élaphe, le plus grand Mammifère terrestre sauvage de France, est détecté sur 5 des 6 écoponts suivis sur le réseau VINCI Autoroutes et localisés à proximité immédiate ou au sein de massifs avec présence avérée de l'espèce (données de présence par massif du

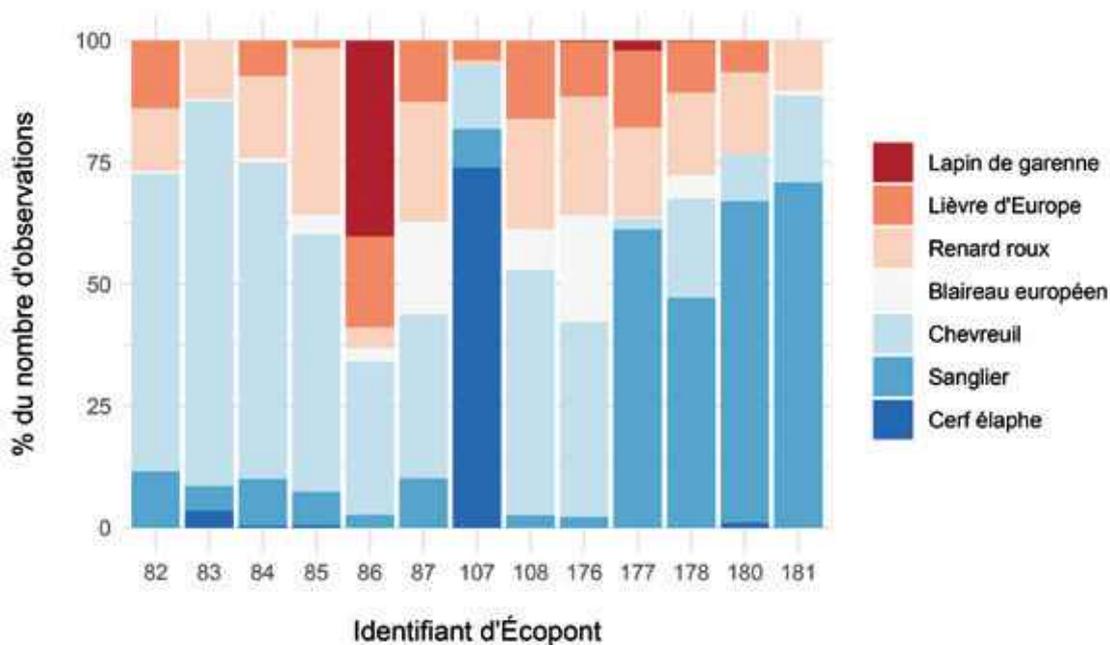


Figure 61 : Proportion du nombre d'observations des sept espèces les plus représentées dans l'ensemble des écoponts suivis.



Figure 62 : Cerf élaphe sur un écopont de Charente-Maritime. ©ASF/FDC17.

réseau Ongulés Sauvages OFB/FNC*/FDC*). L'occurrence du Cerf élaphe y est certes faible (majoritairement < 5 % des jours de suivi), mais un ouvrage se démarque (Figure 61) avec une présence détectée sur 40 % des jours suivis. Cet ouvrage d'une largeur de 18,5 mètres est certes utilisé par l'espèce, mais quelle aurait été son utilisation si l'ouvrage avait été plus large, dans les dimensions préconisées par la littérature ? L'étude de Pfister & Birrer (1991) montre que l'utilisation par le Cerf élaphe augmente substantiellement quand les ouvrages dépassent les 30 mètres de large.

Les résultats de l'étude de Pfister *et al.* (1999) ne démontrent cependant pas qu'il est systématiquement nécessaire de construire un écopont très large. Les mêmes auteurs rapportent dans une étude précédente (1997) que dans certaines circonstances il peut être plus judicieux de construire plusieurs passages à faune de dimensions plus petites (tout en restant suffisamment larges), et ceci

en particulier pour la petite faune, parce que la zone d'attraction d'un point est « limitée par les espaces d'action individuels ». Le dilemme entre un passage à faune d'envergure versus de multiples plus petits demeure toujours d'actualité (Helldin 2022) et les caractéristiques régionales paysagères (p. ex. hétérogénéité des paysages) et faunistiques (p. ex. dimensionnement spécifique aux espèces cibles) rendent difficiles toute généralisation.

5.4 LES DIFFÉRENTS TYPES D'OUVRAGES INFLUENCENT-ILS LA FRÉQUENTATION DE LA FAUNE ?

Au sein des aménagements pour la petite et la moyenne faune, la fréquentation supérieure des écoducs par rapport aux ouvrages hydrauliques aménagés avait déjà été évoquée dans le *Rex 1* (p. 84). Les analyses du modèle vont également en ce sens pour certaines espèces en montrant

par exemple que le Blaireau européen utilise davantage les écoducs que les ouvrages hydrauliques équipés de banquettes ou d'encorbellement (Tableau 6).

Ceci peut s'expliquer par le fait que le pied sec des banquettes et des encorbellements surplombe un cours d'eau, le plus souvent en eau. Cette proximité sur un corridor confiné de plusieurs dizaines de mètres n'est pas attractive pour certaines espèces non aquatiques comme le Blaireau européen. Elle est en revanche tout à fait adaptée et favorable par exemple pour les Mustélidés semi-aquatiques recherchant cette proximité.

Le type d'ouvrage peut donc agir comme un filtre pour certaines espèces. Le choix de l'aménagement doit donc être réalisé en fonction des espèces cibles et de leur écologie. À noter, cependant des comportements parfois étonnants : le suivi d'une buse métallique dans l'Aude a mis en évidence qu'un ouvrage partiellement et temporairement inondé par un épisode pluvieux intense pouvait être tout de même emprunté par le Blaireau européen probablement habitué à emprunter ce

cheminement (Figure 63), quelles que soient les conditions.

Par ailleurs, des traversées occasionnelles de Chevreuils dans des buses de 120 centimètres ou de Sangliers dans une buse de 80 centimètres paraissent également étonnantes (Rex 1, p. 65).

Le tableau 7 suivant permet de comparer la fréquentation des 11 espèces (Fouine et Martre des pins confondues) les plus représentées dans les différents types d'ouvrages. Les tendances évoquées par exemple pour le Blaireau européen se vérifient ici aussi par un nombre de passages par an bien supérieur dans les passages inférieurs spécifiques (type écoducs) que sur les ouvrages hydrauliques aménagés.

Le Ragondin est ici aussi le témoin de l'importance que peuvent avoir les ouvrages hydrauliques non dédiés (207 passages détectés en moyenne par an par ouvrage) pour les espèces semi-aquatiques. Attention cependant puisqu'en période de crue, ces ouvrages deviennent infranchissables pour les espèces terrestres et peuvent être très difficiles à franchir pour les espèces semi-aquatiques (courant parfois important).

Espèce	Variable	Estimation	ES	Valeur-p
Meles meles Blaireau européen	OHA - Banquette	-2,938	1,247	0,019
	OHA - Encorbellement	-2,998	1,240	0,016
	OHA - Enrochement	-0,195	1,600	0,903
	PI mixte	-3,771	2,247	0,093
	PI non dédié	-13,118	349,510	0,970
	PI spécifique faune	1,749	0,803	0,029
	Hauteur utile	-0,127	0,453	0,779

Tableau 6 : Variables retenues de dimensionnement et de conception des ouvrages comme les plus explicatives de l'occurrence de certaines espèces dans les ouvrages inférieurs. Les résultats en gras indiquent les effets significatifs des variables sur l'occurrence des espèces. Selon ces résultats, le Blaireau européen utilise significativement plus les écoducs que les autres ouvrages de type hydraulique, banquette ou encorbellement. Les colonnes Estimation, ES et Valeur-p donnent les estimations des coefficients des variables retenues comme les plus explicatives, leurs erreurs standards et leurs probabilités dans les modèles. Les espèces non mentionnées ne présentent aucune variable retenue de conception/dimensionnement comme explicative lors de la sélection des modèles.

Les chiffres de fréquentation pour les écoponts montrent ici toute l'importance de ce type d'aménagement pour la grande faune (Cerf élaphe, Chevreuil et Sanglier) puisque le Cerf élaphe est logiquement exclusivement détecté sur les écoponts, et les 2 autres espèces sont très peu (voire pas du tout) détectées sur les

autres types d'ouvrages. Dans une moindre mesure, ce constat est également fait pour les Lagomorphes (Lièvre d'Europe et Lapin de garenne) dont les moyennes de fréquentation sont supérieures sur les écoponts par rapport aux autres types d'ouvrages.



Figure 63 : Blaireau européen traversant une buse métallique inondée par une crue. ©Nature en Occitanie - M. BELAUD.



Figure 64 : Donnée ponctuelle d'un Chiroptère indéterminé photographié en transit dans une buse de 120 centimètres de diamètre. ©ASF/LPO France.

Nb passages détectés.an-1.ouvrage-1 (Moyenne \pm Ecart-Type [Min-Max] n=nombre d'ouvrages)						
Taxons	PI spécifique faune (écoduc)		OHA-Banquette		OHA-Encorbellement	
	Fouine/Martre des pins	35	\pm ET50 [1-375] n=85	84	\pm ET136 [0-536] n=20	22
Blaireau européen	156	\pm ET209 [0-1154] n=80	11	\pm ET20 [0-51] n=6	21	\pm ET41 [0-83] n=4
Genette commune	26	\pm ET28 [0-105] n=23	5	\pm ET6 [0-15] n=5	15	\pm ET18 [1-52] n=8
Renard roux	81	\pm ET181 [1-1492] n=87	32	\pm ET49 [1-156] n=17	6	\pm ET6 [0-16] n=6
Hérisson d'Europe	14	\pm ET27 [0-148] n=41	4	\pm ET3 [2-8] n=5	0	\pm ET [0-0] n=1
Lièvre d'Europe	35	\pm ET85 [0-410] n=45	7	\pm ET [7-7] n=1	0	\pm ET [0-0] n=2
Lapin de garenne	28	\pm ET36 [0-98] n=27	-	-	1	\pm ET [1-1] n=1
Ragondin	20	\pm ET65 [0-417] n=43	17	\pm ET24 [1-61] n=9	6	\pm ET6 [1-19] n=10
Chevreuil	12	\pm ET29 [0-117] n=21	1	\pm ET0 [1-1] n=2	0	\pm ET [0-0] n=1
Cerf élaphe	-	-	-	-	-	-
Sanglier	5	\pm ET6 [0-26] n=20	-	-	-	-
Chien domestique	7	\pm ET11 [0-54] n=36	6	\pm ET5 [1-15] n=10	1	\pm ET1 [0-3] n=3
Chat domestique	50	\pm ET84 [0-395] n=63	94	\pm ET107 [0-335] n=12	5	\pm ET8 [0-24] n=7
Homme	8	\pm ET23 [0-110] n=24	25	\pm ET24 [4-87] n=15	2	\pm ET2 [0-4] n=5

Tableau 7 : Nombre moyen (\pm Ecart-Type) de passages détectés par an et par ouvrage, [Minimum et Maximum], et n=nombre d'ouvrages du jeu de données sélectionné pour l'analyse de l'occurrence hebdomadaire des espèces dans les ouvrages.



Nb passages détectés.an-1.ouvrage-1 (Moyenne ±Ecart-Type [Min-Max] n=nombre d'ouvrages)								
Taxons	OHA-Enrochement		OH non dédié		Écopont		PI mixte	
	Fouine/Martre des pins	12	±ET10 [1-21] n=3	37	±ET55 [1-191] n=20	15	±ET21 [0-56] n=12	8
Blaireau européen	12	±ET17 [1-32] n=3	27	±ET50 [1-161] n=15	17	±ET23 [1-85] n=14	0	±ET [0-0] n=1
Genette commune	-	-	8	±ET14 [1-45] n=9	1	±ET [1-1] n=1	1	±ET1 [0-1] n=2
Renard roux	9	±ET0 [9-9] n=1	83	±ET163 [1-585] n=19	75	±ET74 [4-292] n=15	14	±ET20 [2-37] n=3
Hérisson d'Europe	1	±ET [1-1] n=1	8	±ET6 [1-18] n=6	1	±ET1 [0-3] n=5	95	±ET132 [1-188] n=2
Lièvre d'Europe	2	±ET [2-2] n=1	1	±ET2 [1-5] n=6	62	±ET78 [4-232] n=13	21	±ET42 [0-84] n=4
Lapin de garenne	-	-	2	±ET2 [0-7] n=8	98	±ET233 [1-575] n=6	14	±ET [14-14] n=1
Ragondin	5	±ET [5-5] n=1	207	±ET530 [1-1408] n=7	0	±ET0 [0-1] n=3	29	±ET [29-29] n=1
Chevreuil	0	±ET [0-0] n=1	-	-	174	±ET165 [7-498] n=14	12	±ET15 [1-23] n=2
Cerf élaphe	-	-	-	-	92	±ET192 [1-435] n=5	-	-
Sanglier	-	-	15	±ET16 [0-42] n=8	292	±ET467 [1-1466] n=15	1	±ET1 [0-2] n=2
Chien domestique	1	±ET [1-1] n=1	7	±ET6 [1-18] n=12	15	±ET20 [1-74] n=14	3	±ET1 [2-3] n=2
Chat domestique	1	±ET [1-1] n=1	86	±ET90 [1-254] n=16	34	±ET48 [0-155] n=14	41	±ET26 [23-60] n=2
Homme	39	±ET [39-39] n=1	23	±ET22 [4-47] n=3	107	±ET113 [5-351] n=14	-	-

5.5 LES PASSAGES INFÉRIEURS PEUVENT-ILS CONTRIBUER AU PASSAGE DES CHIROPTÈRES ?

La diversité des protocoles mis en œuvre et les données ponctuelles obtenues au cours de notre étude n'ont pas pu faire l'objet d'une analyse statistique pour répondre à cette question.

Pour autant, les suivis acoustiques et par pièges photographiques mis en place dans certains ouvrages ont permis de mettre en évidence l'utilisation de passages inférieurs, ouvrages hydrauliques ou buses sèches dédiées à la faune terrestre, par de nombreuses espèces de Chiroptères. 8 ouvrages inférieurs (portiques, buses, viaducs) ont été suivis à l'aide de détecteurs ultrasons par les Écologistes de l'Euzière sur le projet de déplacement de l'autoroute A9, au niveau de Montpellier. Les micros positionnés dans les ouvrages et à l'extérieur ont permis d'identifier jusqu'à 16 espèces de Chauve-souris et d'avérer le passage de plusieurs espèces sous l'autoroute.

Des retours d'expérience existent sur le sujet :

Les espèces de Chauves-souris présentent des comportements de vols différents selon leur écologie. Par exemple, le Minioptère de Schreibers est une espèce plutôt aérienne, alors que les rhinolophes se déplacent davantage à basse altitude (≤ 2 mètres) en suivant les éléments structurants du paysage (Arthur & Lemaire 2009). Ils ont donc à basse altitude plus de chances de rencontrer les entrées des ouvrages inférieurs.

Le diamètre à recommander pour faciliter le passage des Chiroptères dans les ouvrages inférieurs dépend donc largement des enjeux relatifs aux espèces présentes sur site. Pour les Chiroptères, l'importance de la localisation des ouvrages par rapport au paysage et aux corridors de déplacements des espèces apparaît primordiale (Laforge *et al.* 2019).

Pour les espèces se déplaçant davantage en altitude et peu contactées dans les ouvrages inférieurs, les ouvrages supérieurs spécifiques

(portiques, chiroducts) peuvent devenir complémentaires aux ouvrages inférieurs, notamment sur des itinéraires de vols connus avant implantation de l'autoroute. De tels ouvrages ont fait l'objet d'études détaillées dans le cadre de suivis VINCI Autoroutes. (cf. Chapitre 8.2).

5.6 LE PAYSAGE À PROXIMITÉ DES AMÉNAGEMENTS A-T-IL UNE INFLUENCE SUR LA FRÉQUENTATION DES OUVRAGES PAR LA FAUNE ?

Deux variables susceptibles de traduire l'effet de la fragmentation des paysages autour des ouvrages ont été utilisées lors des analyses : la densité de routes et la densité de haies.

Seules deux espèces sur les 12 étudiées sont ressorties comme ayant une occurrence dépendante de cette fragmentation. Ainsi, ces deux variables influent sur l'occurrence hebdomadaire des Sangliers dans les passages inférieurs. Plus la densité de route est élevée, plus la probabilité d'occurrence de l'espèce diminue et inversement, plus la densité de haies augmente, plus la probabilité d'occurrence de l'espèce augmente (Figure 67).

Chez les autres espèces, seul le Lapin de garenne montre également une probabilité d'occurrence croissante avec la densité de haies. Cet effet, bien que significatif, est cependant faible (Figure 66). Le Lapin de garenne creuse ses terriers dans les



Figure 65 : Exemple de l'A83 (Deux-Sèvres) intersectant un corridor écologique évident (ancienne voie ferrée boisée) au milieu d'un paysage d'agriculture intensive. ©IGN, 2002.

Étude du CEN PACA sur le suivi des Chiroptères au niveau des ouvrages souterrains de l'autoroute A8 (PICHARD et coll., 2012).

Le suivi de 15 ouvrages inférieurs de l'autoroute A8 de diamètres variant de 0,93 à 4 mètres a permis de mettre en évidence une corrélation positive entre le diamètre de l'ouvrage et le nombre de contacts de Chauves-souris (Figure 64) (Pichard *et al.* 2012).

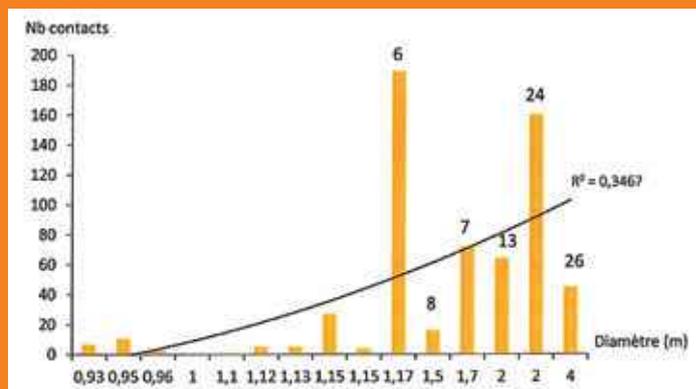


Figure 64 : Graphique du nombre de contacts total en fonction du diamètre des ouvrages

Dans cette étude, parmi les espèces présentes dans le secteur, le Petit Rhinolophe par exemple a emprunté 14 ouvrages sur 15, alors qu'une espèce comme le Minioptère de Schreibers pourtant bien présente aux abords n'a été détectée dans aucun des ouvrages. Seuls les ouvrages de plus de 1,5 mètre de diamètre ont été utilisés par d'autres espèces que les rhinolophes.

Étude de Biotop/Setra* synthétisant les données de Chiroptères collectées sur plus de 85 passages souterrains.

Dans le guide CEREMA « Chiroptères et infrastructures de transports », Nowicki & Rousselle (2016) font référence au travail de Biotop (Biotop/SETRA, 2011) synthétisant les données collectées sur plus de 85 passages souterrains. Ce travail montre que :

- Les rhinolophes peuvent fréquenter des ouvrages de petite taille (1 mètre). L'activité atteint son maximum pour des hauteurs supérieures à 3 mètres.
- Les pipistrelles ne passent pas dans les ouvrages inférieurs à 3 mètres de haut et le maximum de fréquentation est atteint pour 6 mètres de haut et 40 mètres de large.
- Les murins empruntent peu les ouvrages de hauteur inférieure à 2 mètres et la fréquentation atteint un maximum pour des hauteurs supérieures à 5 mètres.

talus de haies. Il est favorisé dans des paysages bocagers contenant des réseaux de haies denses lui fournissant les deux compartiments d'habitats nécessaires à son cycle de vie, les milieux ouverts pour la recherche de nourriture, et les haies pour y creuser les terriers (Lombardi *et al.* 2003, 2007). D'autres paramètres paysagers ont une influence significative sur certaines espèces. Les effets semblent globalement plus marqués aux petites échelles, c'est-à-dire dans un rayon compris entre 500 mètres et 1 kilomètre. La probabilité d'occurrence du Lièvre d'Europe augmente ainsi avec le pourcentage de prairies et diminue avec

le pourcentage de fourrage (cultures fourragères; Figure 69). Le Lièvre d'Europe est, en effet, un spécialiste des milieux ouverts à végétation basse. Or, si les milieux agricoles peuvent lui être favorables, l'action du fauchage mécanique pour le fourrage lui est préjudiciable (Milanov 1996). La probabilité d'occurrence du Hérisson d'Europe augmente significativement avec le pourcentage de surface agricole dans un rayon de 1 kilomètre (Figure 67). Cela peut sembler contre-intuitif puisque c'est l'un des habitats où les populations de hérissons sont les moins denses. Cependant, c'est probablement dans ces milieux agricoles

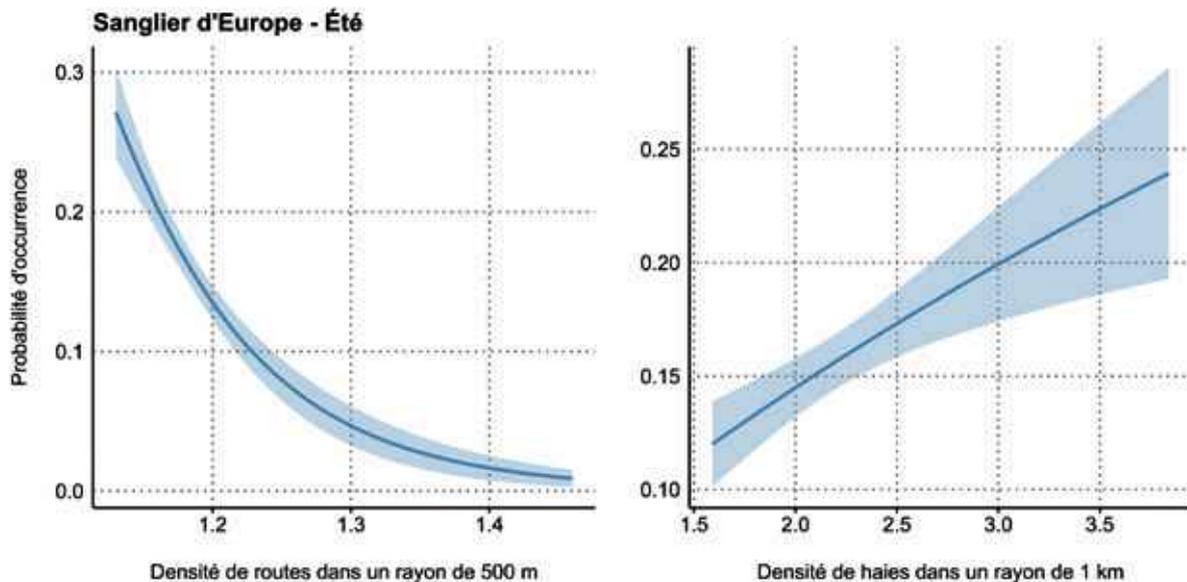


Figure 66 : Relations entre l'occurrence du Sanglier en été sur les ouvrages autoroutiers supérieurs (écoponts), et les variables « Densité de routes sur 500 m » et « Densité de haies sur 1 km ».

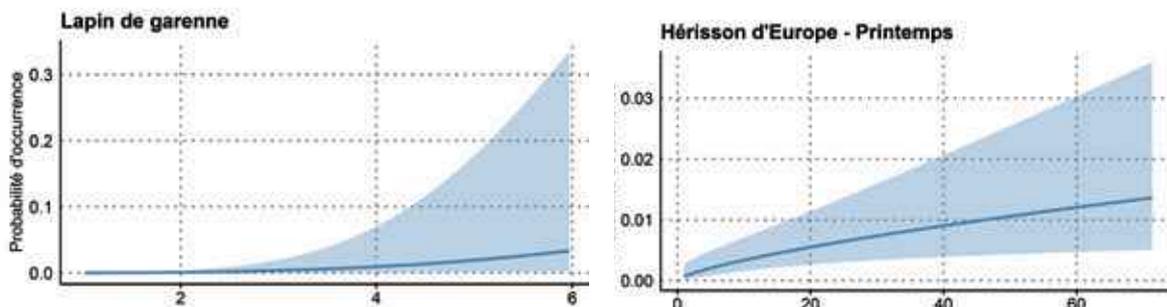


Figure 67 : Relation entre l'occurrence du Lapin de garenne dans les passages autoroutiers inférieurs, et la variable « Densité de haies dans un rayon de 10 km ».

Figure 68 : Relation entre l'occurrence du Hérisson au printemps dans les passages autoroutiers inférieurs, et la variable « Pourcentage de surface agricole » dans un rayon de 1 km ».

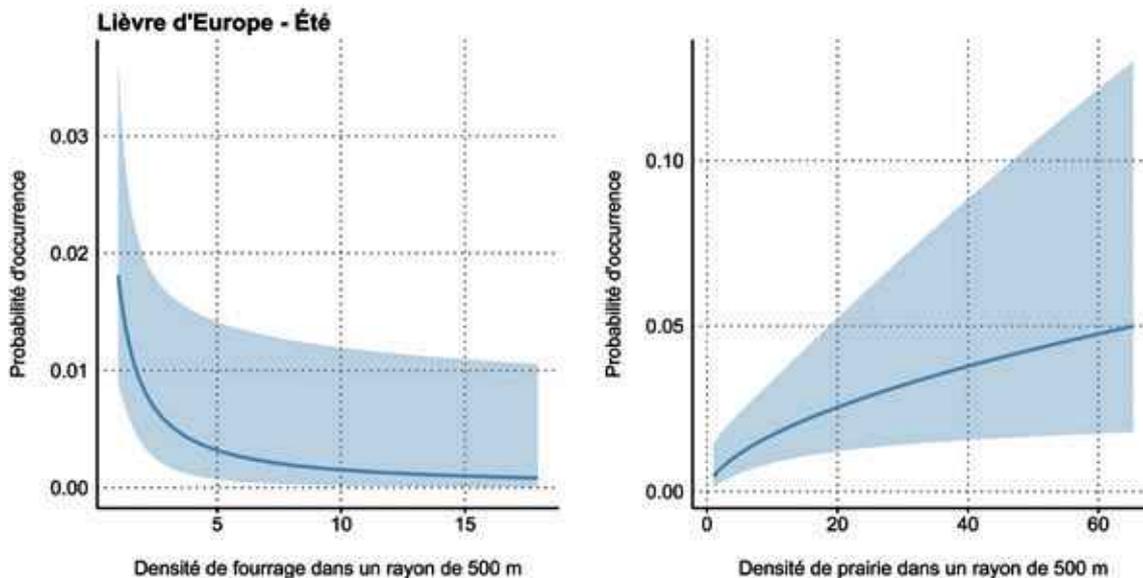


Figure 69 : Relations entre l'occurrence du Lièvre européen en été dans les passages autoroutiers inférieurs, et les variables « Pourcentage de fourrage » et « Pourcentage de prairie » dans un rayon de 500 m.

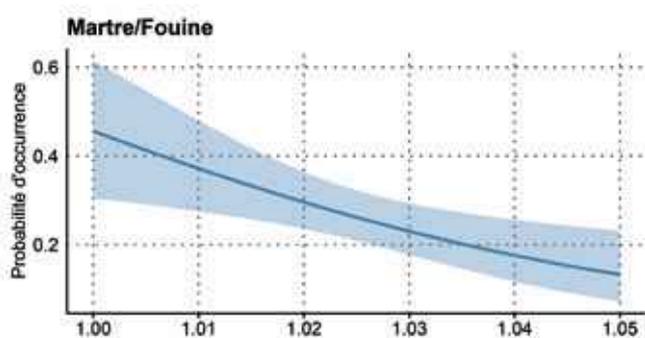


Figure 70 : Relation entre l'occurrence des *Martes sp.* dans les passages autoroutiers inférieurs, et la variable «Densité de rivières dans un rayon de 10 km».

de transit que l'espèce réalise ses plus grandes distances de déplacements, augmentant alors ses chances d'utiliser des passages à faune.

Ce constat renforce la nécessité d'aménager également les territoires dégradés comme les milieux d'agriculture intensive où les ressources alimentaires et zones refuges sont moindres, mais où par conséquent les distances de déplacements augmentent pour la faune.

5.7 LA PRÉSENCE DE COURS D'EAU A-T-ELLE UN EFFET SUR LA FRÉQUENTATION ?

De nombreuses études ont mis en évidence l'importance des rivières comme corridors écologiques pour la faune terrestre (Naiman *et al.* 2010), en plus de la faune aquatique et semi-aquatique. Les cours d'eau associés aux végétations et forêts riveraines augmentent la perméabilité des paysages fragmentés. Ils sont également des éléments clés de fonctionnalité écologique à prendre en compte lors de l'analyse multicritère permettant d'orienter le choix du meilleur emplacement d'un passage à faune avant sa construction.

Dès lors, la fréquentation d'un ouvrage situé dans le corridor d'une rivière est directement influencée par la fréquentation de ce corridor. Dans notre étude, l'influence du corridor de la rivière au droit d'ouvrages autoroutiers aménagés pour la faune n'a pas été testée. Deux obstacles majeurs viennent perturber la lecture de ces

données, indépendamment de l'influence du corridor :

- La distance entre le corridor de la rivière et les entrées des aménagements, ainsi que tous les paramètres pouvant influencer sur la connexion entre les deux (dénivelé, accessibilité, raccordements artificiels, végétation, etc.).
- L'ouvrage aménagé lui-même qui peut, selon sa nature et/ou ses dimensions, agir comme un filtre pour certaines espèces. Le *Rex 1* mettait par exemple en évidence que la fréquentation des ouvrages hydrauliques aménagés (pied sec situé à l'intérieur même de l'ouvrage hydraulique) était deux fois moins élevée que pour les écoducs (*Rex 1*, p.69).

Dans notre modèle d'analyse, la densité de rivière a en revanche été prise en compte. Il en résulte par exemple que la probabilité d'occurrence du genre *Martes* (Fouine et Martre des pins) dans les ouvrages baisse de façon significative avec l'augmentation de la densité de rivières (Figure 70). On peut émettre l'hypothèse que plus la densité de rivière est importante autour d'un ouvrage, plus les possibilités d'emprunter d'autres corridors et d'autres cheminements que cet ouvrage sont nombreuses.

5.8 QUELLE EST L'AIRE D'INFLUENCE D'UN PASSAGE À FAUNE ?

Cette question importante pour les aménageurs puisqu'elle peut conditionner le nombre et le positionnement des passages à faune n'a pas pu être traitée dans les analyses de cette étude, mais c'est un sujet bien documenté dans la bibliographie.

Les ouvrages sont potentiellement utilisés par les individus s'ils sont rencontrés lors de leurs déplacements. On comprend alors que le nombre et l'espacement des passages à faune le long de l'autoroute sont d'importance capitale dans la réduction de l'effet barrière des infrastructures linéaires de transport (Karlson *et al.* 2017).

L'étude des localisations de mortalité routière peut aider à déterminer les densités de passage à faune dans un projet. Sur cette base, Clevenger

et al. (2002) recommandent pour de nouveaux projets routiers, la mise en place de passages inférieurs toute faune tous les 150 à 300 mètres. En Espagne, la recommandation dans le cas de milieux forestiers et autres habitats d'importance pour la conservation des connectivités écologiques fait état d'un passage tous les 500 mètres pour la petite faune (1 kilomètre dans le cas d'habitats anthropisés, dont les cultures et les zones périurbaines), et d'un passage tous les kilomètres pour la grande faune (3 km dans le cas d'habitats anthropisés ; Ministry of Agriculture Food and the Environment 2016). Ces recommandations devant être contextualisées selon les espèces présentes et les caractéristiques paysagères de chaque projet.

L'étude des schémas de déplacement des animaux est également utile pour définir l'aire d'influence des passages à faune sur zone, et aider à la définition de leurs nombres et espacements optimaux. Certains auteurs considèrent que les individus ne seront pas à même de rencontrer un passage à faune si celui-ci est localisé en dehors

de leur domaine vital. Un animal est alors supposé pouvoir utiliser régulièrement un passage à faune si celui-ci se trouve dans sa distance quotidienne de déplacement. Pour Seiler *et al.* (2015), la racine carrée du domaine vital d'une espèce sur zone donne une bonne approximation de la mobilité quotidienne des individus. Un passage à faune en Suède est ainsi considéré comme atténuant l'effet barrière de route/voie ferrée pour l'élan le long de 2 + 2 kilomètres (c.-à-d. la racine carrée de $20 \text{ km}^2 \approx 4$) dans chaque direction de l'ouvrage. Cette approximation est alors utilisée pour déterminer le nombre et l'espacement de passages à faune requis dans les sections à enjeux. Pour les déplacements de dispersion de longue distance, un seul ouvrage efficacement localisé peut en théorie produire une connectivité suffisante.

D'après la bibliographie, l'aire d'influence d'un passage à faune paraît donc en lien direct avec la capacité de déplacement journalière des espèces cibles.

VI. INFLUENCE DE L'ÉCOLOGIE DES ESPÈCES (SAISONNALITÉ, INTERACTION, COMPORTEMENT)

6.1 LA FRÉQUENTATION DES OUVRAGES PAR LES HUMAINS OU LA FAUNE DOMESTIQUE A-T-ELLE UN IMPACT SUR LA FRÉQUENTATION DES OUVRAGES PAR LA FAUNE SAUVAGE ?

Les graphiques de phénologie des 11 espèces les plus détectées dans les ouvrages confirment que la majorité des espèces utilisent les passages de façon bien plus importante la nuit (Figure 72). Les analyses menées sur les passages inférieurs montrent l'existence d'interactions entre

les occurrences hebdomadaires de la faune sauvage et les occurrences de Chats, de Chiens domestiques ainsi que de l'Homme.

La probabilité d'occurrence de la faune diminue avec l'occurrence du Chat domestique (sans distinction entre Chats de maison et Chats haret*) pour au moins trois espèces : le Lapin de garenne, le Lièvre d'Europe et *Martes sp.* (Figure 71). Cette interaction avait été montrée par Mata *et al.* (2020), l'évitement des Chats par les Lagomorphes étant expliqué par le caractère repoussant des odeurs ou de leurs excréments sur les Lagomorphes.

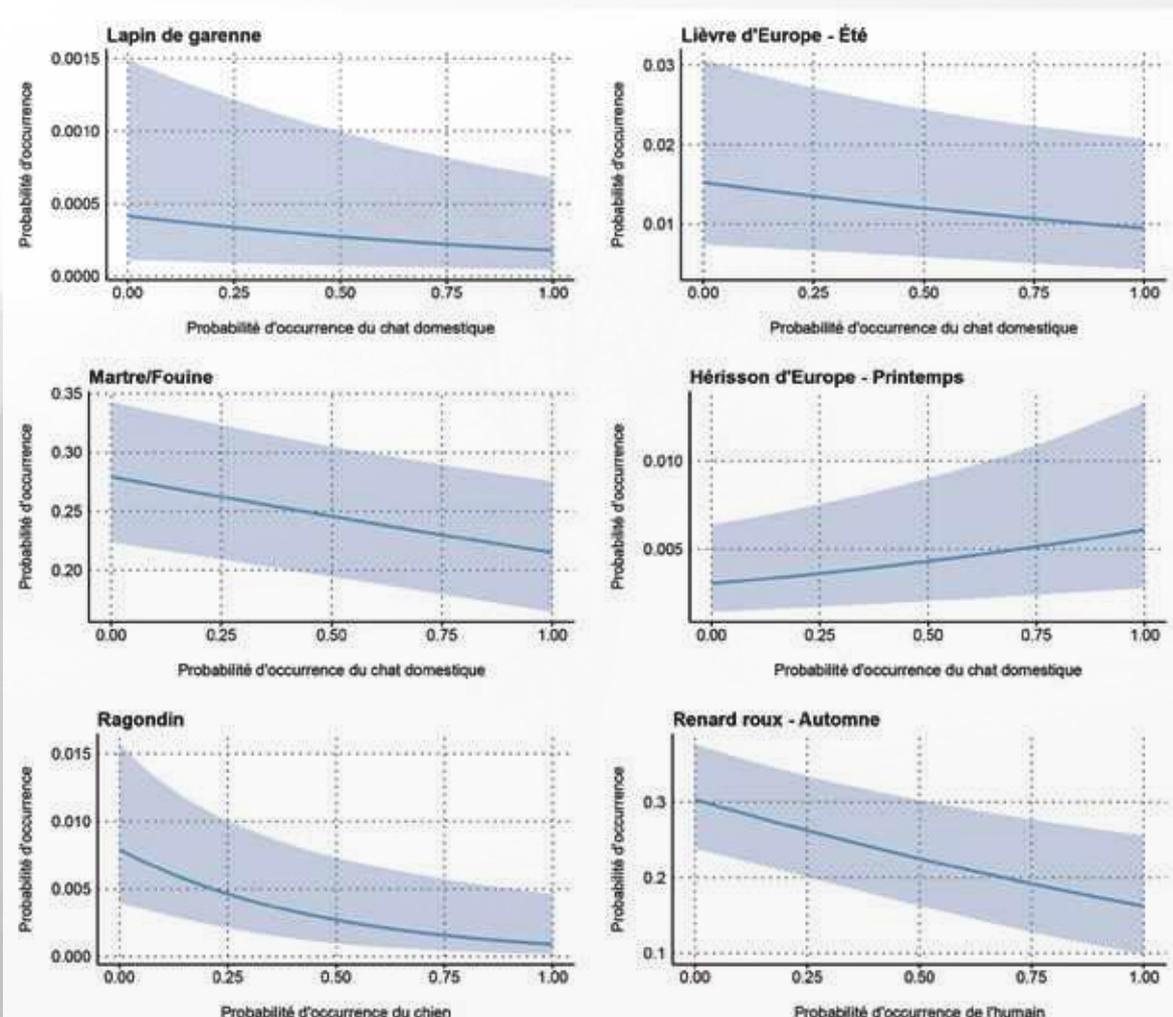


Figure 71: Relations entre l'occurrence des espèces dans les passages autoroutiers inférieurs, et les probabilités d'occurrence du Chat domestique, du Chien ou de l'Humain.

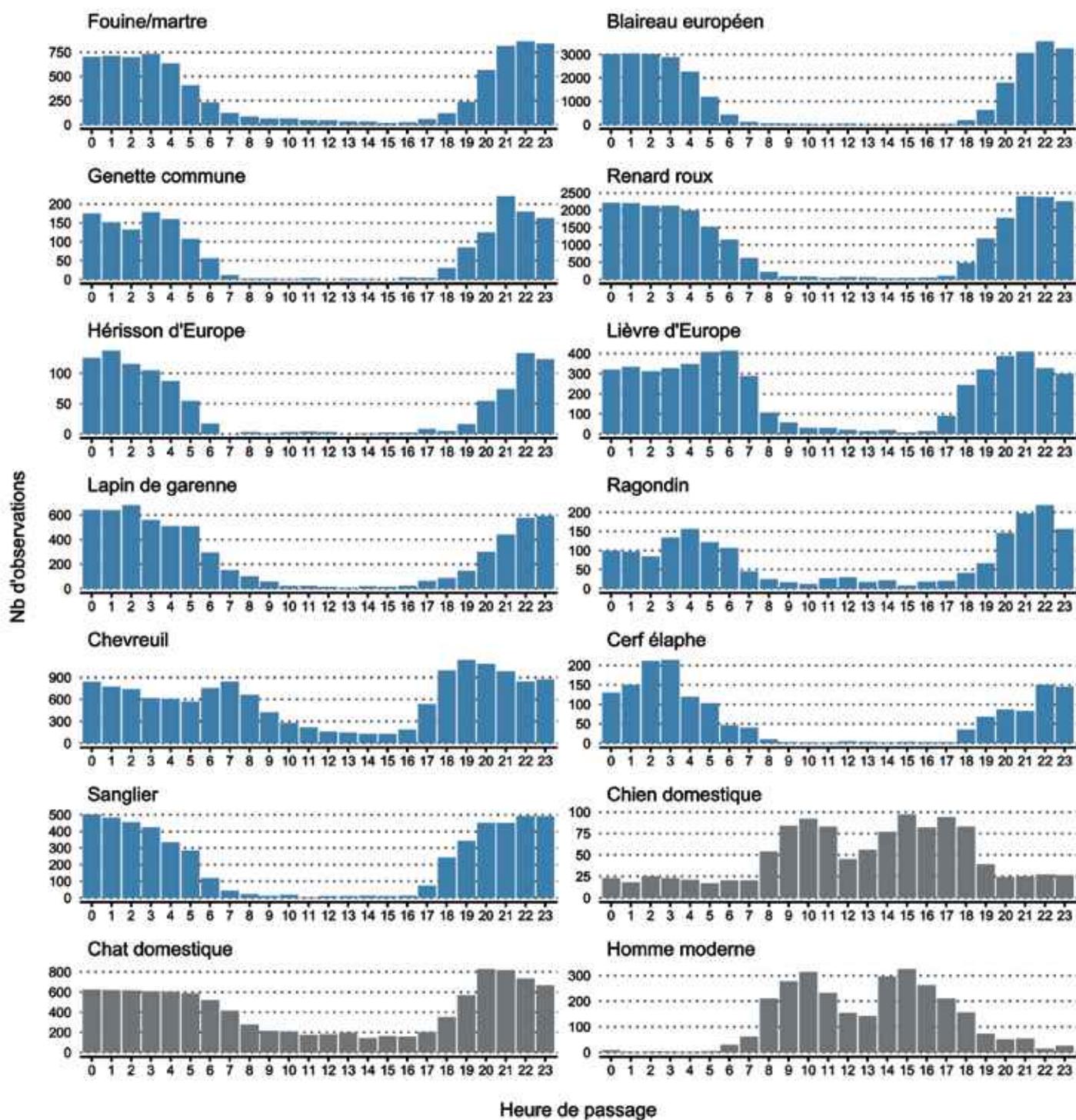


Figure 72: Graphiques de la phénologie horaire des 11 espèces les plus détectées dans les ouvrages, ainsi que les Chat et Chien domestiques, et l'Homme.

À noter également, la probabilité d'occurrence du Hérisson d'Europe augmente significativement avec l'occurrence du Chat domestique (Figure 71). Cet effet qui demeure faible pourrait s'expliquer par un effet répulsif des Chats sur des potentiels prédateurs du Hérisson d'Europe comme la Martre des pins ou la Fouine, dont l'occurrence décroît avec la présence de Chat domestique. Plus probablement, ces 2 espèces co-occraient simplement dans les ouvrages situés à proximité d'habitations.

L'occurrence du Chien domestique n'a été notée comme négative que sur l'occurrence du Ragondin (Figure 71), et l'occurrence de l'Homme uniquement sur celle du Renard roux (Figure 71). L'existence d'une asynchronie de l'utilisation des passages pourrait expliquer l'absence ou le peu d'interactions de l'Homme et du Chien domestique sur le reste de la faune. L'Homme et les Chiens domestiques empruntent en effet les passages à faune quasi exclusivement en journée (Figure 72), ce qui impacterait probablement moins la faune qui en a une utilisation majoritairement nocturne et crépusculaire.

6.2 Y A-T-IL UNE SAISONNALITÉ OBSERVÉE DANS LES PASSAGES ?

L'occurrence hebdomadaire de la faune dans les passages varie en effet en fonction des saisons et des espèces. À titre d'exemple, ci-dessous, quelques résultats du tableau 12 de l'**annexe 3** sont interprétés en fonction de l'écologie connue des espèces.

Chez le Blaireau européen, l'occurrence hebdomadaire est plus forte au printemps, puis en été et à l'automne, et elle est significativement plus faible en hiver par rapport aux autres saisons. Cela s'explique, car cette espèce se déplace en effet davantage du printemps à l'été par rapport à l'hiver (domaine vital 5 fois moins important en hiver).

Chez le Renard roux, l'occurrence hebdomadaire est plus importante en hiver, puis au printemps, périodes correspondant respectivement à la période d'accouplement (recherche active de partenaires) et à l'élevage des jeunes (recherche intensive de proies) conduisant les individus à se déplacer en conséquence.

Chez le Hérisson d'Europe, l'occurrence hebdomadaire est significativement plus faible en hiver qu'aux autres saisons. Ceci s'explique simplement par l'hibernation du Hérisson d'Europe en période de froid en hiver.

Concernant le Cerf élaphe, l'occurrence hebdomadaire (Annexe 3) est significativement plus importante notamment à l'automne, période du brame où les animaux de différents groupes se dispersent pour retrouver des individus d'autres groupes.

Pour le Sanglier, l'occurrence hebdomadaire (Annexe 3) est significativement plus forte en hiver par rapport aux autres saisons. Le rut qui intervient surtout en novembre/décembre, la dispersion des jeunes qui quittent les groupes familiaux expliquent des déplacements plus importants. La pression de chasse plus importante à cette période pourrait également inciter les animaux à se déplacer davantage.

Globalement, les phénomènes de saisonnalité observés s'expliquent par de nombreux facteurs liés à l'écologie des espèces et par les différents types de déplacements décrits au chapitre 4, page 58. D'autres spécificités locales comme la variabilité spatio-temporelle des ressources alimentaires peuvent inférer localement sur les schémas de déplacement de la faune.

6.3 LA PRÉSENCE D'UN PIÈGE PHOTOGRAPHIQUE IMPACTE-T-ELLE LE COMPORTEMENT DES ANIMAUX EMPRUNTANT L'OUVRAGE ?

La grande majorité des données/observations d'individus semblant faire demi-tour face à un piège photographique concerne le Renard roux (Figure 73). Dans l'étude de Fagart *et al.* (2016) où les refus ont été systématiquement notés,

77 % des refus observés concernent le Renard roux. D'autres espèces comme le Blaireau européen (15 % des refus observés), ou *Martes sp.* (2 % des refus observés) peuvent montrer un tel comportement, mais dans des proportions nettement moindres. Ces demi-tours dus à un comportement de méfiance semblent cependant temporaires avec une diminution dans le temps du taux de refus observés dans les ouvrages (Fagart *et al.* 2016).



Figure 73 : Renard roux surpris par le déclenchement du piège photo et opérant immédiatement un demi-tour dans l'éco-duc. ©ASF/LPO France.

VII. AMÉLIORATIONS DES PROTOCOLES

7.1. OPTIMISATION DES SUIVIS PAR PIÈGES PHOTOGRAPHIQUES

7.1.1. POSE DES PIÈGES

PHOTOGRAPHIQUES :

RECOMMANDATIONS DÉTAILLÉES

Le *Rex 1* publié en 2016 avait permis de donner des consignes de poses pour les pièges photographiques. Cette nouvelle étude incite à donner des recommandations complémentaires plus précises afin de guider davantage les opérateurs vers une pose optimale et standardisée des pièges photographiques pour le suivi de l'utilisation des ouvrages par la faune (Tableau 8). D'après Wearn & Glover-Kapfer (2017),

les fabricants de pièges photographiques recommandent souvent des hauteurs de caméras pour la grande faune (1,5 mètre par exemple dans le manuel *Reconyx Hyperfire*). Cependant, afin de détecter un plus grand panel, notamment de petites et moyennes faunes, il convient de placer les appareils plus bas. Différents auteurs (par exemple O'Brien *et al.* 2003; Tobler *et al.* 2008; Kays *et al.* 2010; Wearn & Glover-Kapfer 2017) préconisent ainsi des hauteurs entre 20 et 50 centimètres. Pour cibler uniquement les petits animaux (par exemple les petits Mammifères et les Oiseaux), il peut être conseillé de positionner le capteur encore plus bas, à 10-20 centimètres du sol (Thornton *et al.* 2012).

	Interdépendance des paramètres	Micromammifères (expérimental, C.cf. §7.1.2.)	Petite et moyenne faune ou MULTI-ESPÈCES ¹	Grande faune
Espèces cibles	-	Campagnols, Musaraignes, Gliridés*, etc.	Petits carnivores, Lagomorphes, Hérisson d'Europe, Belette, etc.	Ongulés, Grands carnivores, etc.
Distance de détection [min-max] (au-delà, prévoir des appareils supplémentaires)	Paramètre dimensionnant le suivi	~ 0,7 m [0,4-1 m]	~ 2 m [1-3 m]	~ 3 m [2-7 m]
Hauteur de fixation [min-max] (par rapport au cheminement)	Plus la distance de détection est faible, plus la hauteur de fixation doit s'approcher du min.	[5-20 cm] Attention à la distance minimale de mise au point	[30-70 cm]	[100-130 cm]
Orientation [min-max] (angle par rapport à l'axe du cheminement)	Plus la largeur du passage (aménagement) est importante, plus l'orientation choisie peut s'approcher du max.	+ [20-45°]	+ [20-45°]	+ [20-90°] > 45° pour D > 4m

¹ SUIVIS MULTI-ESPÈCES: pour un suivi multiespèces, il est indispensable de se placer dans le cas des espèces les plus contraignantes, donc les plus petites espèces visées (hors Micromammifères). Dans une configuration de pose visant la petite et moyenne faune, si la grande faune est détectée à proximité immédiate de la caméra, seule la partie inférieure où les pattes des animaux seront visibles, mais cela ne pose en général pas de difficultés particulières d'identification pour ces espèces.

Tableau 8 : Recommandations de pose des pièges photographiques en mode infrarouge pour des modèles offrant des performances de détection comparables aux modèles récents (p. ex. Reconyx HP2X), selon le groupe d'espèces ciblé dans les ouvrages.

7.1.2. QUELQUES EXPÉRIMENTATIONS À DÉVELOPPER

Les Micromammifères, un cas expérimental :

En 2016, dans le *Rex 1*, les suivis des Micromammifères par piège photographique n'étaient pas abordés. Aujourd'hui, les progrès réalisés en termes de sensibilité de détection et de définition des images, permettent dans certaines conditions et pour certaines espèces d'envisager le développement de tels suivis. Une des conditions pour l'envisager est que le cheminement soit suffisamment étroit pour que le champ de détection d'un piège photographique rapproché (< 1 mètre) puisse couvrir toute la largeur du cheminement (Figure 74). Il faut également des appareils avec des focales très faibles (proches de 50 centimètres) pour limiter les clichés flous et permettre l'identification des espèces cibles. À noter que les lentilles accessoires ou focales courtes fixes permettant des distances de mise au point plus rapprochées (Figure 75) sont des développements technologiques très récents et attendus dans les prochaines évolutions des pièges photographiques (Glover-Kapfer *et al.* 2019; Ortmann & Johnson 2020).

L'identification des Micromammifères par piège photographique n'est pas souvent possible. En fonction des objectifs poursuivis, des groupes par taille ou groupes d'espèces peuvent cependant être suffisants pour répondre à l'évaluation demandée.

Attention cependant à noter que dans une approche de dénombrement, une calibration des taux d'échecs du matériel utilisé est indispensable à réaliser. Cela impose d'avoir un autre moyen de détection certain (vidéo, cellule) permettant d'évaluer le taux d'échec du piège photographique.

Si l'approche à l'espèce est requise, des méthodes de suivi complémentaires de détermination comme des pièges à poils ou la collecte de fèces associées à une identification génétique peuvent alors être déployées (cf. §9.3).

Dans tous les cas, et particulièrement pour des espèces cibles de petite taille, rappelons qu'avant le déploiement de suivis par pièges photographiques sur le terrain, il est recommandé d'estimer les taux de détection en fonction de la distance (Hofmeester *et al.* 2017). Ces taux de détection des pièges photographiques sont connus pour varier selon l'emplacement et l'orientation de l'appareil, les modes de déclenchement et détection, le paramétrage de l'appareil, les différentiels de température, les espèces cibles, leurs tailles et comportements (Meek *et al.* 2015; Apps & McNutt 2018).

Les échecs de détection des appareils à capteurs infrarouges passifs peuvent être réduits par l'ajout de systèmes actifs comme une cellule photoélectrique (Figure 76 ; Meek & Pittet 2012), ou d'une toile à vibration (*Rex 1*, p. 122). À noter que ces deux procédés apportent des contraintes supplémentaires : autonomie moindre (à calculer en fonction de la consommation en ampères/heure de la cellule, classiquement 12 à 25 jours d'autonomie avec une batterie de 9 Ah), batterie additionnelle, système à étanchéifier si besoin. Le coût de ces systèmes demeure raisonnable (de l'ordre de 1 000 à 1 200 € HT), d'autant plus que certains nouveaux modèles de pièges photographiques proposent aujourd'hui une entrée externe permettant de connecter directement ces systèmes de détection.

Reptiles et Amphibiens

Pour les Reptiles et Amphibiens, la détection de mouvement en infrarouge reste totalement dépendante des conditions de température de l'environnement qui ne sont donc pas maîtrisées. Il reste indispensable de mettre en place un suivi



Figure 74 : Piège photographique dédié au suivi d'une encoche Micromammifère. ©ASF/GREGE.



Figure 75 : Campagnol roussâtre photographié avec un piège photographique muni d'une lentille pour mise au point rapprochée. ©Jean Chevallier.



Figure 76 : Système de détection d'une barrière infrarouge déclenchant un piège photo sur l'encorbellement d'un ouvrage hydraulique routier. ©LIFE VISON/LPO France.





Figure 77 : Salamandre tachetée, photographiée en mode Time-Lapse. ©ASF/LPO Drôme.

dédié : toile à vibration, Time-Lapse (Figure 77), barrière infrarouge, etc.

La modification du fond thermique de la zone active de détection du piège photographique avec un matériau qui « reste froid » (Welbourne 2013) peut permettre de maximiser les différences de température et donc d'améliorer la détection. À noter toutefois que dans les ouvrages inférieurs, souvent à l'abri du soleil, cette optimisation est déjà plus ou moins naturellement présente sous nos latitudes.

7.1.3. VERS UNE STANDARDISATION DE SAISIE SEMI-AUTOMATIQUE ET UNE GESTION OPTIMALE DES DONNÉES RÉCOLTÉES

Une bonne gestion des données de suivi par piège photographique est importante pour éviter la perte de résolution et obtenir une bancarisation optimale des données. Scotson *et al.* (2017) énumèrent neuf recommandations sur les bonnes pratiques de gestion de l'ensemble

des données de suivis par piège photographique (métadonnées de site d'étude, métadonnées de déploiement de pièges photographiques, données de classification d'images et produits dérivés):

1. Adopter un format de stockage de données normalisé, non exclusif et transférable pour stocker toutes les données de pièges photographiques;
2. Accompagner toutes les feuilles de saisies de métadonnées formatées;
3. Enregistrer les données à la résolution la plus élevée possible;
4. Utiliser un système de coordonnées géographiques clairement documenté et cohérent;
5. Maintenir un format date-heure cohérent;
6. Enregistrer les données de covariables qui pourraient être utilisées pour évaluer la probabilité de détection;
7. Planifier l'identification éventuelle de toutes les données d'espèces non ciblées et d'humains;

8. Gérer les données comme un ensemble faisant autorité, sur lequel plusieurs utilisateurs peuvent agir de manière cohérente et simultanée;
9. Archiver les données et les mettre à la disposition d'autres chercheurs selon des conditions définies de réutilisation.

Lors de l'étape de consolidation de la base de données des suivis par piège photographique du *Rex 2*, plusieurs problèmes dans le mode de saisie des données de passage ont été identifiés : pertes de données (oublis de saisie de certains passages), erreur de saisie (doublon, erreur dans la date/heure), format de date et heure ambiguë, pression d'observation mal renseignée, métadonnées incomplètes et saisie/formatage ambigu voire inintelligible, traitement non uniforme selon les opérateurs de l'indépendance de passages successifs d'individus de la même espèce, etc. Ces erreurs compliquent fortement l'étape de création et de consolidation de la base

de données. De plus, les photos, si elles sont bien bancarisées par VINCI Autoroutes, ne sont pas directement reliées aux données de passage, compliquant la vérification des données ou des identifications.

L'analyse des images demeure une tâche chronophage des suivis par piège photographique. En lien avec le caractère répétitif de cette étape, les erreurs de saisie sont courantes.

Afin d'optimiser cette saisie, il existe des logiciels d'aide au traitement des données de pièges photographiques permettant d'exploiter entre autres, directement les données EXIF des photos. Ils permettent ainsi une récupération automatique de la saisie de nombreux paramètres (p. ex. date, horaire, température, phase de la lune, données du paramétrage du piège photographique), et d'aider par des interfaces dédiées au traitement et à la bancarisation des images et des données d'identification et de passage.



Figure 78 : Interface du logiciel d'aide au traitement des données de pièges photographiques, Time-Lapse.

Des études comparatives des logiciels récents de gestion des données et métadonnées de suivis faunistiques par pièges photographiques ont été réalisées par Young *et al.* (2018), Scotson *et al.* (2017), Wearn & Glover-Kapfer (2017) et également le groupe WildCam Canada en 2020. Après avoir testé et comparé huit logiciels ne nécessitant pas de connaissances en programmation, pour une utilisation par le plus grand nombre, trois logiciels (s'installant en local) apparaissent d'intérêt pour les suivis faunistiques menés sur les passages à faune : **Wild Id**¹, **Camelot**² et **Timelapse**³. Aucun d'entre eux n'a été mis en œuvre durant les suivis de ce Rex.

Le logiciel Timelapse (Greenberg *et al.* 2019) présente l'avantage entre autres d'être dans un état de développement constant, de permettre l'ajout libre de champs formatés (liste d'espèces, coche, liste de choix, etc.), de proposer une paramétrisation de l'indépendance des passages successifs et de présenter une prise en main assez simple par l'utilisateur. En revanche, ce logiciel ne gère pas les métadonnées de suivis et de déploiement des pièges photographiques. C'est un logiciel purement d'aide à la saisie et à la standardisation des données, les métadonnées standardisées sur les déploiements des pièges photographiques et les suivis devant être saisis en parallèle.

Les données ainsi traitées permettent ensuite de relier directement dans la base de données les images aux données de passages, permettant une vérification plus rapide des déterminations et données de passages. Ceci devrait également faciliter le développement d'un futur logiciel de détection et de classification automatique des images.

1 <https://www.wildid.app/>

2 <https://camelotproject.org/about-us>

3 <https://saul.cpsc.ucalgary.ca/timelapse/>

7.2. DIMENSIONNEMENT DES PROTOCOLES DE CAPTURE-MARQUAGE-RECAPTURE (CMR) POUR LE SUIVI DES AMÉNAGEMENTS POUR LA PETITE FAUNE

7.2.1. PROBLÉMATIQUE

Il a été vu précédemment que différents protocoles peuvent être envisagés pour la petite faune dans certaines configurations : piège photographique en Time-Lapse dans des ouvrages inférieurs par exemple. D'autres configurations comme les passages supérieurs ou les écoponts ne permettent pas toujours la mise en œuvre de ces protocoles. D'autres méthodes sont envisageables pour mesurer le flux de la petite faune à travers les dispositifs de franchissement. L'une de ces méthodes, la capture-marquage-recapture (CMR), consiste à marquer les individus capturés afin de mettre en évidence d'éventuels déplacements par la recapture (ou la détection) des individus marqués. Les résultats obtenus permettent d'estimer des taux démographiques (comme les taux de survie) et de transition (comme l'émigration ou le recrutement). Habituellement, les protocoles de CMR sur la petite faune sont réalisés en programmant des visites sur le terrain pour capturer et marquer les individus. Ce type de protocole est cependant très dépendant de l'effectif, de la probabilité de détection et du nombre de visites. Afin d'évaluer les paramètres nécessaires à un tel protocole de CMR, une simulation statistique a été réalisée. L'objectif de mobiliser des données simulées est de choisir une stratégie d'échantillonnage

qui permet d'obtenir une évaluation statistique estimée suffisamment robuste. Dans le cas de l'évaluation de la traversée des dispositifs de franchissement par la petite faune avec un protocole de CMR, cette démarche permettra d'évaluer combien de sessions de capture sont nécessaires pour évaluer correctement le taux de transition, c'est-à-dire les « événements de traversée » de l'ouvrage étudié.

Les éléments décrivant l'élaboration du modèle de calcul sont présentés dans l'**annexe 4**.

7.2.2. RECOMMANDATIONS POUR L'ÉLABORATION DES SUIVIS DE DISPOSITIFS DE FRANCHISSEMENT PAR IDENTIFICATION DES INDIVIDUS (CMR, RFID, PIÈGES PHOTOGRAPHIQUES)

La Figure 79 illustre la variation du nombre de fois où le modèle CMR ne détecte pas de transition alors qu'il le devrait, selon les différents scénarios envisagés. Les résultats des simulations montrent que pour détecter un taux de transition de l'ordre de 1 %, la méthode CMR ne semble appropriée que pour des populations supérieures à 90

individus et avec au moins 6 visites par année.

Les résultats des suivis d'Amphibiens, de Reptiles et de Micromammifères menés sur six écoponts durant trois années montrent que les taux de transition (taux de traversée) sont faibles, avec aucune transition observée pour les Amphibiens et les Reptiles, et seulement deux transitions pour les Micromammifères (une transition étant considérée comme telle lorsqu'un individu traverse complètement l'aménagement de l'écopont). Ces observations indiquent que le scénario à 1 % de transition par an apparaît réaliste. Les résultats montrent que la technique de CMR pour détecter un tel taux de transition ne semble pas adaptée pour la plupart des espèces. En effet, **pour les Amphibiens et les Reptiles**, les probabilités de capture et de recapture sont en général faibles, et l'effort nécessaire pour détecter un tel taux de transition nécessiterait plus de 10 passages par année, parfois même plus de 20 passages dans le cas de populations de petite taille (Figure 79). Les résultats montrent que pour détecter un taux de transition de 2 %, l'effort à déployer avec la CMR serait similaire.

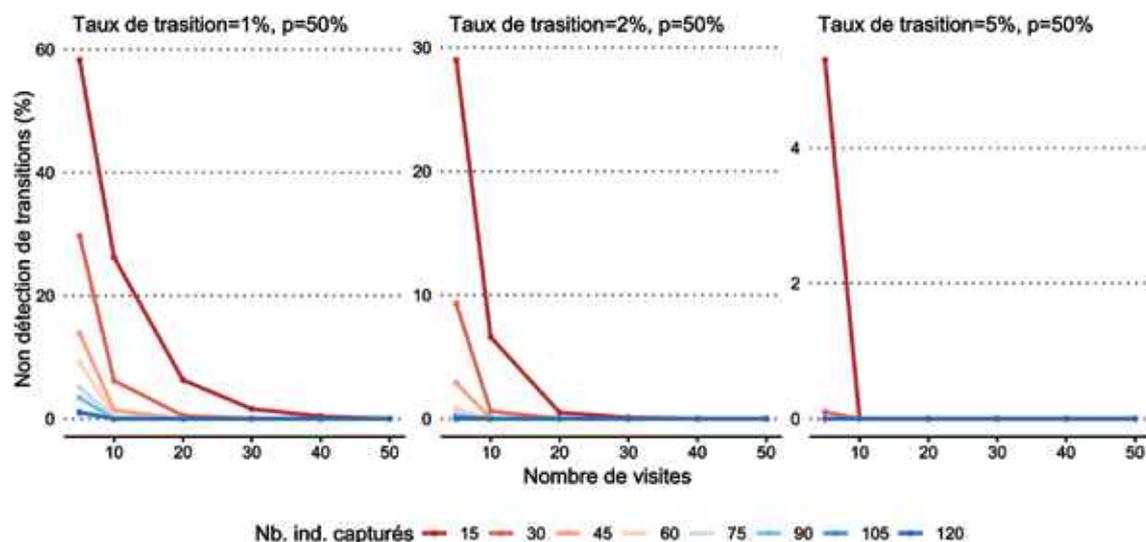


Figure 79 : Variation du nombre de non-détections de transitions en fonction des scénarios de nombre de visites et des tailles de populations. Les résultats présentés sur cette Figure correspondent à une probabilité de détection (p) de 50%. Les résultats pour les autres valeurs de p ne sont pas présentés, car ils sont similaires.

Pour les Micromammifères, dont les effectifs semblent plus importants d'après le retour d'expérience, la CMR pourrait être adaptée si l'effort de capture était d'au moins 5 sessions par an. Cependant, cette possibilité semble difficile à mettre en œuvre au vu de l'effort nécessaire à déployer pour les sessions de capture avec pièges.

Dans le cas de taux de transition plus élevés, à partir de 5 % de transitions, la CMR serait appropriée pour des populations à effectif égal ou supérieur à 60 et avec 4 visites par année (Figure 79).

Ainsi, avant d'adopter un protocole en CMR pour évaluer les événements de traversée pour la petite faune au niveau d'un dispositif de franchissement, il est recommandé d'avoir des indications minimales sur la densité de population et le nombre d'individus potentiellement accessibles pour le marquage, en fonction des espèces cibles. Cela permet alors d'évaluer quel protocole sera nécessaire (nombre de pièges, nombre de passages, etc.) pour obtenir des résultats fiables sur les traversées de l'ouvrage.

D'autres protocoles sont envisageables pour évaluer les traversées d'un dispositif de franchissement par la petite faune. Par exemple, le marquage par transpondeurs passifs (PIT-tags), avec l'installation d'une antenne au sol qui permet d'enregistrer chaque individu qui la franchit. Cette technique nécessite la capture et l'implantation de transpondeurs, manipulation réalisée une seule fois en début d'inventaire⁴, puis la mise en place du matériel de suivi sur le terrain (antenne alimentée électriquement). Cela impose cependant un taux de marquage

significatif de la population souvent difficile à obtenir en fonction des cortèges.

Dans certains cas, la mise en place de pièges photographiques est envisagée pour le suivi d'Amphibiens dans des passages inférieurs étroits, mais présente l'inconvénient d'avoir des limitations techniques (largeur des passages, seules les espèces individualisables comme la Salamandre tachetée peuvent être étudiées).

Interprétation des franchissements pour la petite faune sur les écoponts : les coléoptères *Carabidae*, un potentiel bon indicateur.

Dans le but de s'assurer que la petite faune traverse l'écopont, il est nécessaire de recueillir des observations géoréférencées de part et d'autre de l'écopont et de mettre en place un suivi qui permet de reconnaître les individus. L'interprétation des franchissements des Micromammifères, de par leur écologie (espèce forestière, lisière) et leur faible taille de domaines vitaux, est parfois compliquée.

Les coléoptères *Carabidae* sont des Insectes terrestres qui ne volent pas, très mobiles, qui se déplacent le plus souvent la nuit et peuvent parcourir d'assez longues distances dans leur aire vitale, à la recherche de proies ou de partenaires. Ils semblent donc de bons modèles pour mesurer la fonctionnalité d'écoponts en termes de corridors pour la petite faune.

Le CEFÉ propose donc un protocole de suivi des coléoptères *Carabidae* sur les écoponts (Annexe 5).

⁴ Cette intervention nécessite des autorisations : capture et marquage d'animaux à des fins scientifiques, agrément du comité d'éthique et du ministère en charge de la recherche.

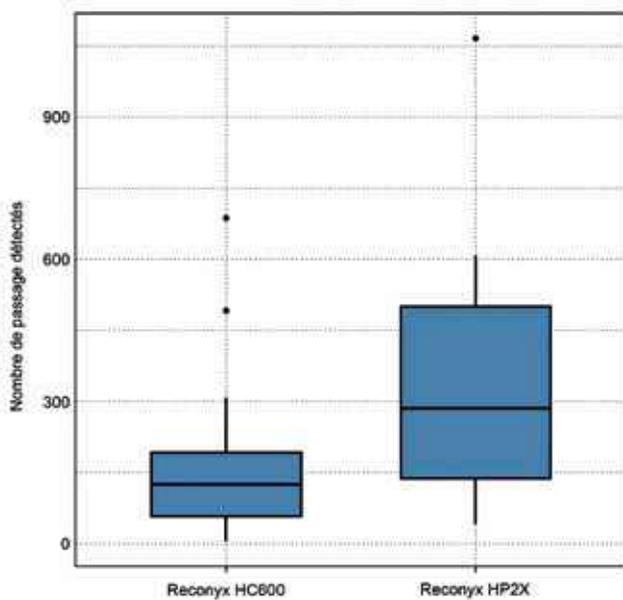


Figure 80 : Comparaison de l'évolution du nombre de données récoltées au cours de suivis identiques (n = 14 ouvrages), suite au changement des appareils Reconyx HC600 par des Reconyx HP2X.

7.3. QUESTIONS/RÉPONSES EN LIEN AVEC LES PROTOCOLES :

7.3.1 LE PIÈGE PHOTOGRAPHIQUE SOUS-ESTIME-T-IL LE NOMBRE DE PASSAGES DANS L'OUVRAGE ?

L'étude de Jumeau *et al.* (2017) met en évidence qu'un piège photographique HC600, en comparaison à un enregistrement vidéo continu dans des passages inférieurs, manque 17 % des passages de Mammifères de taille moyenne et 43,6 % des passages de Micromammifères (Souris, Campagnols, Musaraignes).

Comme évoqué dans le paragraphe 7.1.1, le développement continu des pièges photographiques permet d'améliorer leurs capacités de détection.

Dans le présent retour d'expérience, un opérateur a changé de modèle de piège photographique durant le suivi de 14 ouvrages (13 dans le Sud-Ouest et un en Auvergne), environ à la moitié du suivi, en passant du modèle Reconyx HC600 au Reconyx HP2X, réputé plus sensible par les utilisateurs. Le nombre de données



Figure 81 : Relief de marquage (pierre) très utilisé par la faune, positionné sur le ponton flottant d'un ouvrage hydraulique routier. ©LPO France.

récoltées avec le modèle plus récent (HP2X) est significativement plus important (Wilcoxon $V = 14$, $p = 0.01$; Figure 80).

Bien que des effets confondants (météorologie, phénologie et/ou accoutumance des espèces) pourraient expliquer cette différence, il semblerait tout de même que l'utilisation d'un modèle HP2X soit plus performante pour détecter certaines traversées de la faune.

Par ailleurs, des tests comparatifs (LIFE Vison, 2022) visant à évaluer les taux de détection de la petite et moyenne faune ont récemment été réalisés entre un piège photographique infrarouge de dernière génération (Reconyx HP2X), et le même modèle déclenché par une barrière infrarouge, dispositif de référence avec une détection théorique de 100 %. Les résultats mettent en évidence un taux de détection de 99,2 % du piège photographique infrarouge HP2X seul pour 4 espèces de la moyenne et petite faune (Genette commune, Fouine, Écureuil roux et Belette) avec 1 faux négatif (cliché sans animal) sur 127 passages. Le nombre de faux négatifs augmentant ensuite logiquement avec la réduction de la taille des animaux, notamment les Micromammifères non ciblés durant ce test (taux de détection de 85 % pour le Rat surmulot par exemple).

7.3.2 IMPACT DE L'UTILISATION D'UN RELIEF DE MARQUAGE DEVANT LES PIÈGES PHOTOGRAPHIQUES

Le dépôt d'une pierre/branche devant le piège photographique est une technique indirectement utilisée par les naturalistes/photographes qui recherchent les points de marquage des animaux pour poser leur matériel de prise de vue/affût. L'objectif ici est de créer un relief (le plus naturel possible) devant le piège photographique (Figure 81), afin d'inciter les animaux à marquer leur passage. Les animaux reniflant ou marquant le relief restent un peu plus longtemps devant

le piège photographique et ont ainsi plus de chances d'être détectés et identifiés.

Cette hypothèse n'a jamais été vérifiée par la comparaison d'un suivi avec et sans « relief de marquage », mais n'apparaît en tout cas pas comme une source possible de détérioration de la détection ou bien d'évitement du passage par la faune.

7.3.3 COMMENT TRAITER L'INDÉPENDANCE DE PASSAGES SUCCESSIFS ?

Il est impossible de répondre de façon indiscutable à cette question puisqu'il n'y a pas d'individualisation possible sur les pièges photographiques (sauf rares cas d'individus reconnaissables). En revanche, il y a un besoin réel et nécessaire d'uniformiser l'indépendance des passages pour les différents opérateurs de saisie. La dernière recommandation de VINCI Autoroutes sur cette question était de saisir toutes les données de façon indépendante dès lors qu'un comportement de demi-tour n'était pas clairement observé. Ainsi, un traitement réalisé en post-saisie pour gérer de façon globale ces passages successifs et/ou répétés pourrait aider à l'uniformisation du jeu de données.

Exemple : un Renard roux observé dans un sens puis un Renard roux observé dans l'autre sens 40 secondes plus tard, sans demi-tour observé sur les photos, doit être considéré et saisi comme deux lignes de données différentes.

7.3.4 QUELLE PÉRIODE, DURÉE ET FRÉQUENCE POUR LES SUIVIS FAUNISTIQUES D'AMÉNAGEMENTS ?

La **période de suivi** dépend avant tout de l'objectif du suivi et de l'objectif de rétablissement auquel répond l'ouvrage (van der Grift & van der Ree 2015). Si l'objectif est par exemple de permettre la migration printanière de batraciens vers leurs

sites de ponte, alors le suivi se concentrera sur cette période. De la même façon, si l'espèce cible est absente à une période donnée (espèce migratrice ou hibernante), le suivi devra se focaliser sur la période de présence de l'espèce ou la période maximale d'activité connue de l'espèce. Si l'objectif est en revanche d'estimer la fréquentation annuelle d'un ouvrage par un panel d'espèces, comme la moyenne et la grande faune, alors des suivis continus couvrant au minima une année entière sont recommandés pour suivre au mieux les différentes phénologies de mouvements (dans le domaine vital, dispersion ou migration) des espèces.

La **fréquence du suivi** est également à adapter en lien étroit avec la période de suivi (van der Grift & van der Ree 2015). Si le suivi est mensuel et se focalise par exemple sur la période de migration d'une espèce, alors un suivi journalier peut être nécessaire. À l'inverse, si l'objectif est de suivre les mouvements sur un cycle annuel, des suivis hebdomadaires peuvent être suffisants. La technique de suivi influence également fortement la fréquence de suivi. Ainsi, les pièges photographiques permettent des suivis 24h/24, 7j/7 avec un effort réduit de relèves, par exemple d'une fois tous les 2 mois, alors que les relevés de pièges à empreintes demandent des visites beaucoup plus fréquentes, d'une fois par semaine voire tous les 2 à 3 jours pour un suivi continu.

La **durée des suivis** est connue pour influencer fortement l'estimation de la fréquentation des passages à faune. Les suivis sur plusieurs années sont ainsi recommandés en lien avec les possibles variations interannuelles de l'utilisation des passages, en particulier quand la taille de la population de l'espèce cible est

connue pour varier fortement d'une année sur l'autre (p. ex. cyclicité de l'abondance des populations de Micromammifères) ou quand des tendances temporelles d'utilisation sont recherchées. La fréquentation des passages est également connue pour progresser au cours du temps après leur installation, les individus ayant besoin de temps pour découvrir les passages et s'y accoutumer. La fréquentation des passages à faune après leur installation progresse alors au cours du suivi. Le suivi de plusieurs écoducs initié juste après leurs installations dans le sud-ouest de la France sur le réseau VINCI Autoroutes montrait ainsi que l'utilisation des ouvrages avait été multipliée par 8 au cours des 3 premières années de suivi (Fagart *et al.* 2016). Au Canada où des suivis sur le long terme (> 15 ans) sont réalisés, le temps d'accoutumance de la grande faune à l'utilisation des ouvrages a été montré comme compris entre 3 et 9 ans selon les espèces (Clevenger & Barrueto 2014).

Dans le COST 341, Luell *et al.* (2003) recommandent ainsi de suivre au minimum pendant 3 ans la fréquentation des passages et de ne pas évaluer l'efficacité des passages juste après leur installation.

Ainsi, le suivi des ouvrages réalisé juste après leur installation nécessite d'être reconduit dans le temps (p. ex. 5 ans, 10 ans) pour apprécier les possibles évolutions de la fréquentation de la faune sur le long terme. Les paramètres influençant l'attractivité des passages peuvent également évoluer au cours du temps (p. ex. développement de la végétation, occupation du sol aux abords du passage).



© SCIMABIO

“ une fois le poisson endormi, on procède au descriptif de son état sanitaire avant l’opération de marquage ”

VIII. FOCUS SUR LES RÉSULTATS DE SUIVIS SPÉCIFIQUES

Des suivis d'ouvrages spécifiques à la faune piscicole, aux Chiroptères et aux Micromammifères ont été réalisés par des bureaux d'études spécialisés. Ils font l'objet de rapports spécifiques publiés en parallèle du présent document. Une synthèse de ces suivis est présentée ci-après.

8.1. SUIVIS PISCICOLES

Ces suivis font l'objet d'un retour d'expérience spécifique publié dans le rapport : *Emploi de la technologie dans le cadre de l'évaluation du franchissement piscicole pour l'apport de connaissances nécessaires à la restauration de la continuité écologique dans les cours d'eau*, SCIMABIO Interface, 2023.

8.1.1. SUIVI PAR RADIOTÉLÉMÉTRIE - ÉVALUATION DU FRANCHISSEMENT DES AMÉNAGEMENTS DU SEUIL A89 SUR LA RIVIÈRE ALLIER PAR LE SAUMON ATLANTIQUE (PUY-DE-DÔME,63)

Le saumon atlantique (SAT) est une espèce emblématique de la biodiversité aquatique

du bassin Loire-Allier. Les problématiques de continuité écologique sont au cœur des menaces qui pèsent sur l'espèce, en particulier en raison de l'importance du linéaire de rivière que les géniteurs doivent parcourir pour rejoindre les premières frayères de qualité. Dans ce contexte et afin de répondre aux obligations réglementaires, VINCI Autoroutes a engagé des travaux de mise en conformité de son seuil « A89 » sur la rivière Allier et qui ont été achevés en octobre 2017. Un suivi piscicole a ensuite été programmé afin de mesurer les gains pour la migration génésique des saumons de l'Allier.

Ce suivi piscicole a été réalisé courant l'année 2019 et a consisté à piéger, puis capturer des saumons de l'Allier au niveau du barrage de Vichy et de leur implanter un émetteur radio par voie intragastrique. Au total, 24 saumons ont été marqués à partir du 26 mars 2019.

Le dispositif de suivi mis en place sur la zone d'étude était tout d'abord constitué de 7 stations fixes gérées par SCIMABIO Interface et la FDPPMA63, auquel il faut ajouter la station fixe aval Vichy mise en place et gérée par LOGRAMI (Figure 82). Chaque station fixe était composée d'un récepteur enregistreur radio et programmée

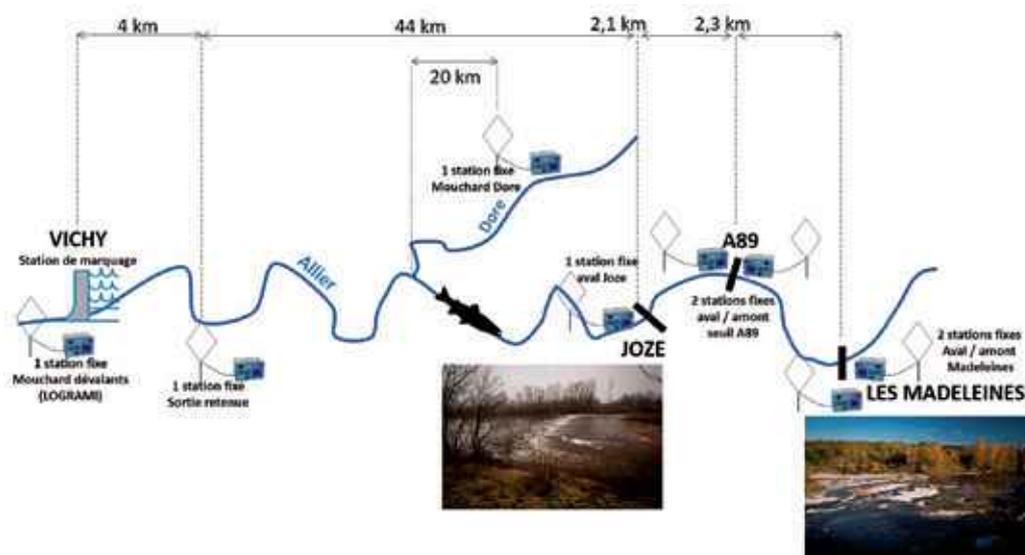


Figure 82 : Schéma d'implantation des 7 stations de suivis fixes mises en place sur la zone d'étude « VINCI Autoroutes » + la station aval Vichy de LOGRAMI.

pour scanner les fréquences des émetteurs implantés dans les saumons. À noter qu'aux dispositifs de suivis fixes se sont rajoutées des prospections mobiles (en véhicule, à pied ou en canoé) qui ont permis de suivre le déplacement des poissons entre les zones couvertes par les antennes fixes.

L'analyse des comportements de migration sur le secteur d'étude et de franchissement du seuil A89 a été réalisée sur la base des 13 individus sur 24 marqués qui ont continué leur migration après le marquage jusqu'au seuil A89.

Parmi les résultats principaux de cette étude, nous pouvons citer que les vitesses moyennes de franchissement estimées pour le seuil A89 ne révèlent pas d'effet retard, apportant ainsi des éléments de réponse clairs vis-à-vis de l'obligation réglementaire. Il n'a pas non plus été détecté de blocages en pied de l'ouvrage.

8.1.2. SUIVIS PAR LA TECHNOLOGIE RFID - ÉVALUATION DU FRANCHISSEMENT PISCICOLE DE LA BUSE OH 448 DE L'A89 SUR LA DUROLLE (PUY-DE-DÔME, 63)

La Durolle est une rivière salmonicole puydômoise située en tête de bassin, qui abrite une population de truites fonctionnelle et abondante. Sur cette rivière, l'ouvrage hydraulique OH 448 permet à l'autoroute A89 de franchir la Durolle au niveau de la commune de St-Rémy sur Durolle. Il s'agit d'un aménagement ancien datant de la construction de l'A72 en 1978 qui représentait un obstacle infranchissable pour les truites en raison des conditions d'écoulement à l'intérieur de la buse. En 2016, cette buse a été aménagée avec un dispositif hydraulique unique afin de restaurer la libre circulation des poissons (Figure 83).

La fonctionnalité réelle de ce dispositif a été évaluée entre 2017 et 2019 en utilisant la technologie RFID* (Radio Frequency Identification) et en suivant les déplacements de truites marquées à l'aide de transpondeurs. Au



Figure 83 : Présentation de la buse avant travaux (à gauche) et après travaux (au centre et à droite). Source ASF.



Figure 84 : Étapes de marquage des truites suivies durant l'étude, de leur capture à leur remise à l'eau.

total, 815 truites ont été marquées (Figure 84) sur un linéaire de 1 680 mètres en aval de la buse. En parallèle, un dispositif RFID fixe à double antenne localisé en amont immédiat de la buse a permis de détecter pendant toute la durée du suivi les individus marqués ayant franchi la buse. En complément, 7 prospections mobiles ont été menées pour caractériser les déplacements des truites marquées en aval de la buse. Les données de franchissement ont été analysées en lien avec les caractéristiques des individus, ainsi que l'hydrologie et la température de l'eau. Les résultats de l'étude ont montré que le dispositif hydraulique aménagé en 2016 permet une bonne franchissabilité de la buse par les truites de la Durole, quelles que soient les conditions hydrauliques ou thermiques enregistrées lors de l'étude.

8.2. SUIVIS CHIROPTÉROLOGIQUES

Ces suivis font l'objet d'un retour d'expérience spécifique publié dans le rapport « *Suivis d'ouvrages expérimentaux dédiés aux Chiroptères* »

(Naturalia-Environnement 2023).

Au cours de ces dernières années, VINCI Autoroutes s'est intéressé à la façon dont les ouvrages de franchissement de route étaient fonctionnels concernant le groupe biologique des Chauves-souris, que ce soient des ouvrages dédiés ou non.

En effet, les routes à 2 x 2 voies ont un effet négatif sur l'activité de chasse et/ou de transit des Chauves-souris et ce jusqu'à plus de 5 kilomètres de distance de la route (Claireau *et al.* 2019). Pour réduire cet effet négatif (appelé « road-effect zone »), des ouvrages de franchissement sont disposés sur le réseau autoroutier et peuvent être de différentes natures : au-dessus de la route (écoponts, chiroducts...), au-dessous de la route (ouvrages hydrauliques, passages à faune...) ou intermédiaire (tremplins verts/hop-over...).

ASF s'est notamment intéressé, depuis 2014, à deux typologies de structures : les ouvrages dédiés aux franchissements des Chauves-souris, ci-après nommés « chiroducts » (Figure 85), et aux écoponts (nouvelle génération de passage à faune). Pour ce faire, ASF a notamment missionné

le bureau d'études Naturalia-Environnement, en lien avec le Cesco-MNHN*, afin de mieux comprendre comment ces mesures de réduction peuvent être efficaces afin de réduire l'impact du réseau autoroutier sur les Chauves-souris.

Au total, 5 ouvrages ont été étudiés entre 2014 et 2019: 3 chiroducs (deux sur l'A89 et l'un sur l'A83) et 2 écoponts (l'un sur l'A64 et l'autre sur l'A89). Chaque site a été suivi à l'aide d'une démarche scientifique se rapprochant le plus possible d'un design expérimental type Before-After-Control-Impact (BACI*). Tous ces ouvrages ont fait l'objet de publications (ou sont en cours) dans des revues à comité de lecture internationale ou de communications dont les références sont dans l'encadré ci-après.

Pour rendre compte de l'efficacité de ces ouvrages, deux paramètres ont été étudiés. Le premier étant la capacité de ces ouvrages à faire franchir les espèces en toute sécurité (c.-à-d., au-dessus de cinq mètres de hauteur ; Berthinussen & Altringham 2015). Le second étant de savoir si ces ouvrages sont en mesure d'améliorer la

connectivité écologique. Deux types de suivi, innovants et publiés, ont été mis en œuvre. Pour le premier paramètre, des suivis visuels à l'aide d'une caméra thermique ont été réalisés et, pour le second, des suivis acoustiques. Ces méthodes ont permis de réaliser des trajectographies de Chauves-souris (Claireau *et al.*, 2021, 2019b).

Ces nouveaux retours d'expériences, par le suivi de ces ouvrages, permettent d'affirmer dès lors que l'ouvrage dédié est correctement placé dans un corridor écologique qu'il est utilisé par les Chauves-souris. Cette utilisation est d'autant plus favorisée que le corridor écologique est étroit (p. ex., une haie); à l'inverse, dans le cas de Figure d'un ouvrage placé dans un corridor plus large (p. ex., un boisement), ce dernier sera bien moins fréquenté.

Par ailleurs, la capacité de ces ouvrages à surélever la hauteur de vol des Chauves-souris semble plus favorable lorsque la route est en déblais et que des plantations d'arbres de hautes tiges sont disposées de part et d'autre de l'ouvrage.



Figure 85 : Chiroduc (structure en berceau) de Moulin-Paris sur l'A89.

8.3. SUIVIS MICROMAMMIFÈRES

Ces suivis font l'objet d'un retour d'expérience spécifique publié dans le rapport « *Évaluation de la fréquentation par les petits Mammifères d'une banquette sous ouvrage hydraulique équipé d'une encoche* » (GREGE 2023).

8.3.1. SUIVI DE L'UTILISATION D'UNE ENCOCHE À MICROMAMMIFÈRES INTÉGRÉE DANS UNE BANQUETTE SUR L'A89.

Dans le cadre des réaménagements réalisés par ASF dans l'ouvrage du Deiro (A89, commune de Soudeilles en Corrèze) pour rétablir les continuités écologiques pour la faune, une banquette spécifique de 120 centimètres de large a été créée dans l'ouvrage. Cet aménagement a conduit par ailleurs à créer des épis en pierres longeant la banquette dans le lit mineur. À cette occasion, ASF a souhaité tester l'implantation d'une encoche « Micromammifères » développée par le GREGE à l'origine pour la Musaraigne aquatique et le Campagnol amphibie. Cette encoche de 13 centimètres de large et de 10 centimètres de hauteur est positionnée dans la paroi de la banquette « petite faune » pour créer un cheminement à couvert pour les micromammifères.

Afin d'évaluer l'efficacité de ce dispositif innovant, le GREGE s'est associé au GMHL pour évaluer la fréquentation de l'encoche par les Micromammifères en déployant des protocoles expérimentaux adaptés au dénombrement et à l'identification des Micromammifères. Quatre techniques ont été combinées pour recenser les passages et identifier les espèces : capteurs d'empreintes, pièges photographiques, tubes capteurs d'indices (poils et fèces), ainsi que la collecte d'ADN environnemental* dans l'encoche

avec identification génétique des espèces détectées.

Sur les 935 nuits opérationnelles du piège photographique, 1 330 passages de cinq espèces ou groupes d'espèces ont été enregistrés dans l'encoche (923 passages du groupe des deux Mulots du genre *Apodemus sp.* ; 361 passages du groupe des deux Musaraignes aquatiques du genre *Neomys sp.* ; 8 passages d'Écureuil roux - *Sciurus vulgaris* ; 5 passages du groupe des petits Campagnols et 1 passage du groupe des gros Campagnols du genre des *Arvicola sp.*). Ainsi, au cours des deux années de suivi, la circulation des Micromammifères dans l'encoche avoisine les 36 passages par mois. Ces résultats sont globalement plus élevés que les références bibliographiques très peu nombreuses, et confirment une forte fréquentation par les Micromammifères de l'aménagement réalisé. **Ce suivi démontre l'utilisation de l'encoche pour le passage des Micromammifères.**

Les nombreux passages attribués au genre *Neomys sp.*, avec un pic notable entre juillet et octobre, sont particulièrement remarquables (aucune autre référence sur le sujet à notre connaissance que ce soit en termes de fréquentation ou même de suivi) et montrent tout l'intérêt de cet aménagement pour ce groupe d'espèces protégées. En outre, le protocole spécifiquement développé de collecte d'ADN dans l'encoche ou d'indices dans les tubes capteurs dédiés, et l'identification des espèces par approche génétique, ont permis de confirmer la circulation de la Crossope aquatique (*Neomys fodiens*) et du Mulot sylvestre (*Apodemus sylvaticus*).



Figure 86 : Vue générale de l'ouvrage du Deiro et son réaménagement pour la petite faune (photos prises en phase de chantier). ©GREGE.



Figure 87 : *Neomys sp.* circulant dans l'encoche Micromammifères. ©GREGE/GMHL/ASF.

IX. PERSPECTIVES : VERS DE NOUVEAUX OBJECTIFS ET SUIVIS ADAPTÉS

9.1. LES DIFFÉRENTES PROBLÉMATIQUES DE SUIVI

Comme vu précédemment, la grande majorité des suivis mis en place dans ce retour d'expérience concernent des suivis par pièges photographiques, permettant d'évaluer la liste des espèces et leurs fréquences de traversée des passages à faune, autrement dit l'utilisation des ouvrages par la faune sauvage et non véritablement leur efficacité par rapport à des objectifs clairement précisés.

Si la réglementation ne porte que sur les modalités de suivi (L 122-1-1 I, R 122-5 II du CE) ou de dispositifs de suivi (R 122-13 II du CE), la doctrine et les lignes directrices nationales sur la séquence « Éviter, réduire et compenser les impacts sur le milieu naturel » portent sur l'efficacité des mesures et des indicateurs de résultats.

À noter que ces modalités de suivis peuvent être imposées dans le cadre des autorisations des projets (arrêtés préfectoraux espèces protégées, par exemple).

Cette obligation de suivi est ainsi traitée dans le dernier guide du CEREMA paru en 2021 : *Les passages à faune. Préserver et restaurer les continuités écologiques avec les infrastructures linéaires de transport*.

La fiche 23 du guide, « Comment assurer le suivi des passages à faune ? » (pages 260 à 265), précise :

« Dans un premier temps, les objectifs de la mesure doivent ainsi être précisés. Par exemple, pour une espèce cible donnée :

- le passage doit permettre des déplacements quotidiens entre des habitats de repos et les sites de nourrissage;
- le passage doit permettre des déplacements saisonniers entre les sites de repos et les sites de reproduction;
- le passage doit permettre des déplacements

occasionnels, afin de permettre le brassage génétique entre des sous-populations vivant en métapopulations;

- *plus globalement à l'échelle d'un projet, la perméabilité globale de l'infrastructure doit permettre le maintien de la population.»*

Le suivi de l'efficacité d'un aménagement exige donc :

- de réaliser un état initial avant aménagement pour proposer un aménagement adapté aux enjeux et une analyse pertinente avant/après aménagement;
- de bien préciser le ou les objectifs de l'aménagement, proportionnés aux enjeux;
- de mettre en œuvre un protocole de suivi adapté à l'aménagement et aux objectifs fixés (techniques, périodes, fréquence, durée des relevés).

Cependant, comme il est précisé dans la fiche 23 de la page 162 du guide du CEREMA, l'évaluation de l'efficacité d'un passage sur le maintien des populations relève davantage du domaine de la recherche, nécessitant en effet un niveau d'investigation bien plus poussé avec notamment la mise en place d'une étude de type BDACI* (Before-During-After-Control-Impact).

À noter cependant que cette méthode présente des limites :

- Dans le cas d'autoroutes existantes, on ne pourra évaluer qu'un état initial en présence de l'infrastructure avant requalification.
- Dans le cas de projets neufs, la question de l'évaluation de la circulation libre de la faune avant la création de l'infrastructure, pour ensuite la comparer à des passages concentrés en un seul point au niveau de l'aménagement créé, apparaît complexe.

Par ailleurs, pour ces deux cas de Figure, l'évaluation des effectifs des populations présentes avant, pendant et sur plusieurs années

après la réalisation d'un ouvrage et sur un site de contrôle (protocole idéal BDACI : Before-During-After-Control-Intervention), qui permettrait d'évaluer de façon robuste la fonctionnalité et l'efficacité de l'ouvrage pour les populations d'une ou plusieurs espèces animales, nécessite des protocoles et des suivis complexes qui se révèlent souvent difficilement réalisables.

Nous voyons là toute la difficulté à répondre à certains objectifs, notamment ceux qui s'intéressent aux dynamiques de populations.

Trois problématiques fréquemment posées sont abordées ci-dessous :

Fonctionnalité d'un aménagement mis en place : « ce qui passe et ce qui ne passe pas » :

Cette thématique vise à comparer localement « ce qui passe » et « ce qui ne passe pas » ou bien encore « ce qui devrait passer » dans l'aménagement.

Dans le cadre de suivis d'aménagements autoroutiers, ce type de suivi peut par exemple être établi sur le modèle des protocoles B(D) ACI (Before-(During)-After-Control-Impact) qui vise à comparer les flux avant (Before), pendant (During) et après (After) aménagement, voire avec une zone témoin identique (Control) à la zone impactée (Impact) (Andis *et al.* 2017) permettant de s'affranchir de l'effet localisation.

De tels protocoles ont été parfaitement mis en œuvre lors de suivis de chiroducs par Naturalia Environnement (cf. Chapitre 8.2)

Cette question peut également être plus simplement traitée par exemple en comparant la faune détectée à l'intérieur des ouvrages à la faune détectée aux entrées des ouvrages par l'intermédiaire de pièges photographiques. Cette méthodologie simple déjà mise en place dans le cadre de suivis VINCI Autoroutes implique toutefois de nombreuses contraintes techniques

détaillées dans le §4.3.3., page 64. Il conviendrait de trouver des solutions à ces contraintes afin de proposer un protocole adapté à une collecte fiable de telles données.

Concernant les suivis de fréquentation réalisés à l'intérieur des ouvrages, il est parfois possible de noter des comportements de refus de traversée (demi-tour) de certains individus au sein des ouvrages. Cela a permis notamment de traiter le sujet de l'accoutumance des animaux à un ouvrage au cours du temps (Fagart *et al.* 2016), mais en éludant la part des animaux qui n'entrent pas du tout dans l'ouvrage. Le suivi des refus de traversée reste encore expérimental et du domaine de la recherche-innovation.

Mouvements/déplacements d'individus par rapport à une infrastructure :

L'étude des déplacements d'individus par rapport à une infrastructure cherche à déterminer dans quelle mesure les routes inhibent ou modifient les déplacements de la faune sauvage et à quel degré les passages à faune peuvent réduire ces effets (Soanes *et al.* 2018).

Les méthodes employées des suivis de déplacements d'individus sont alors principalement de la CMR (soit par piégeage direct, soit à l'aide de pièges à poils ou à crottes avec génotypage des individus), du suivi passif par transpondeurs passifs (PIT-tag), du suivi télémétrique (radio/GPS), ou encore des pièges photographiques couplés à de la reconnaissance individuelle automatique par Intelligence Artificielle pour les espèces avec des phénotypes individuels visibles permettant de s'affranchir de la capture directe pour pose d'un transpondeur (exemple de la méthode Newtrap développée par le Luxembourg Institute of Science and Technology pour le suivi des Tritons). Dans le cas de nouveaux projets de construction, ces individualisations peuvent permettre d'observer les modifications de déplacements par rapport à l'implantation d'une nouvelle

infrastructure et de passages à faune associés. Dans le cas des infrastructures existantes, les suivis d'individus peuvent alors permettre d'étudier les comportements et les déplacements d'individus vis-à-vis d'un passage à faune. Dans les deux cas, un design type Before/After permet de comparer les déplacements et de quantifier les impacts/bénéfices.

Les suivis piscicoles par transpondeurs RFID et Radio-téléométrie réalisés par Scimabio sur l'A89 sont des exemples de suivis individuels permettant d'évaluer le franchissement d'ouvrages hydrauliques aménagés (cf. Chapitre 8.1).

La génétique au service des études d'évaluation de l'impact des infrastructures autoroutières :

La génétique peut permettre de répondre à certaines questions importantes comme l'impact des routes sur les populations par l'intermédiaire de différentes techniques de récolte de matériels : collecte d'indices, piège à poils ou à crottes, capture, ADN environnemental, etc. En fonction des développements spécifiques et de la qualité des prélèvements collectés, elle permet en théorie d'identifier entre autres (O'Brien *et al.* 2018):

- l'origine des individus qui arrivent à un passage à faune;
- les caractéristiques (ex. sexe) des individus;
- combien d'individus utilisent un même passage à faune;
- la fréquence d'utilisation des passages par des individus spécifiques;
- les itinéraires de déplacement d'individus à travers le paysage;
- le niveau d'échange d'individus entre populations;
- une mesure pour laquelle la dispersion entraîne un flux de gènes;
- les espèces tuées sur la route, etc.

L'échantillonnage génétique peut prendre beaucoup de temps, et avec des coûts d'analyses élevés selon les études. Ainsi, ces protocoles peuvent nécessiter d'être élaborés dès les états initiaux en réalisant des prélèvements de référence avant-projet au sein de la population étudiée potentiellement impactée par un projet. La répétition de l'étude plusieurs années après la mise en place du projet et de ses passages doit permettre, par comparaison, d'évaluer l'absence de dérive génétique ou de cloisonnement induit. Par exemple, Fournier *et al.* (2013) ont montré un cloisonnement génétique des populations de Cerf élaphe dans les Landes induit par l'Autoroute A63 entre Bayonne et Bordeaux.

Les programmes d'études/recherches liés à la conservation/écologie des espèces et faisant appel à ces techniques d'échantillonnage ADN sont de plus en plus nombreux. Les possibilités d'intégrer dans des programmes existants, des questions sur les notions d'écologie routière sont donc réelles tant les possibilités d'étude par l'échantillonnage ADN sont vastes.

9.2. QUELLE MÉTHODOLOGIE POUR QUELS OBJECTIFS ?

Une multitude de suivis peuvent être mis en place selon le cadre du projet (requalification d'infrastructure existante versus projet de construction nouvelle), l'objectif poursuivi, le type d'ouvrage ou encore les espèces cibles. Afin de mettre en place un suivi permettant d'atteindre les résultats souhaités, plusieurs étapes sont nécessaires pour identifier précisément le plan d'évaluation de performance d'une mesure d'atténuation d'impact (O'Brien *et al.* 2018):

- Identifier les espèces cibles et les objectifs d'atténuation;
- Sélectionner les indicateurs les plus pertinents;
- Sélectionner la méthode de suivi;

Groupe cibles / Méthode	Grands Mammifères (cervidés, grands carnivores)	Moyens Mammifères (carnivores, mustélidés, lagomorphes, gros rongeurs)	Petits Mammifères (Micro-mammifères)	Chauve-Souris	Oiseaux marcheurs	Oiseaux volants
Piège à traces (gros sable)	++	++	0/- ¹	-	++	-
Piège à traces (sable fin)	++	++	-	-	++	-
Capteur d'empreintes	-	++	-	-	-	-
Empreinte dans la neige	+	+	-	-	-	-
Piège photo/vidéo	++	++	+/- ²	-	++	?
Détecteur infrarouge	0	0	0	0	0	-
Abris artificiels (plaques, etc.)	-	-	+	-	-	-
Détecteur Chiroptères	-	-	-	++	-	-
Observations directes (visuelles ou acoustiques)	-	-	-	+	-	++
Observations indirectes (fèces, laissées, poils)	+	+	+	-	+	+
Piège à poils - identification	+	+	+	-	-	-
Piège à poils - Analyse ADN	+	+	+	-	-	-
Capture Marquage Recapture	-	+/- ²	++	-	-	-
Capture Marquage Suivi passif (transpondeur PIT)	+	+	+	-	+	-
Capture Suivi télémétrique (radio/GPS/satellite)	+	+	-	+	+	-
Capture/relâché (piège, filet)	-	-	++	++	+	-
Capture létale (pièges)	-	-	-	-	-	-

Tableau 9 : Les différentes techniques de suivis faunistiques des passages à faune et adéquation selon les groupes faunistiques cibles, selon O'Brien et al. (2018), tableau complété par des précisions sur les tailles de Mammifères et quelques notions d'investissements (3 dernières colonnes). Légende: ++ Fortement adapté; + Adapté; 0 Identification des groupes taxonomiques, mais pas de l'espèce; - Inadapté; ? Inconnu.

Reptiles	Amphibiens	Insectes non volants	Insectes volants	Autres invertébrés	Individualisation	Investissement temps terrain/ Fréquence de relève	Investissement matériel/ coût traitements/ analyses
0/- ¹	-	-	-	-	Non	Élevé	Faible
-	-	-	-	-	Non	Élevé	Faible
-	-	-	-	-	Non	Élevé	Faible
-	-	-	-	-	Non	Élevé	Faible
?	+/- ³	-	-	-	Non ²	Faible	Moyen
-	-	-	-	-	Non	Moyen	Moyen
++	++	+	-	+	Oui/Non	Élevé	Faible
-	-	++	++	-	Non	Moyen	Moyen
++	++	++	++	-	Oui/Non	Élevé	Faible
-	-	+	+	-	Non	Élevé	Faible
-	-	-	-	-	Non	Moyen	Faible
-	-	-	-	-	Oui	Moyen	Élevé
++	++	++	++	+	Oui	Élevé	Moyen
+	+	+/- ²	+/- ²	-	Oui	Élevé	Élevé
+/- ²	+/- ²	-	-	-	Oui	Élevé	Élevé
+	++	++	++	++	Oui	Élevé	Moyen
-	-	++	+	+	Oui/Non	Élevé	Moyen

¹ Enregistrement, mais pas au niveau de l'espèce, pour uniquement certaines espèces dans le groupe.

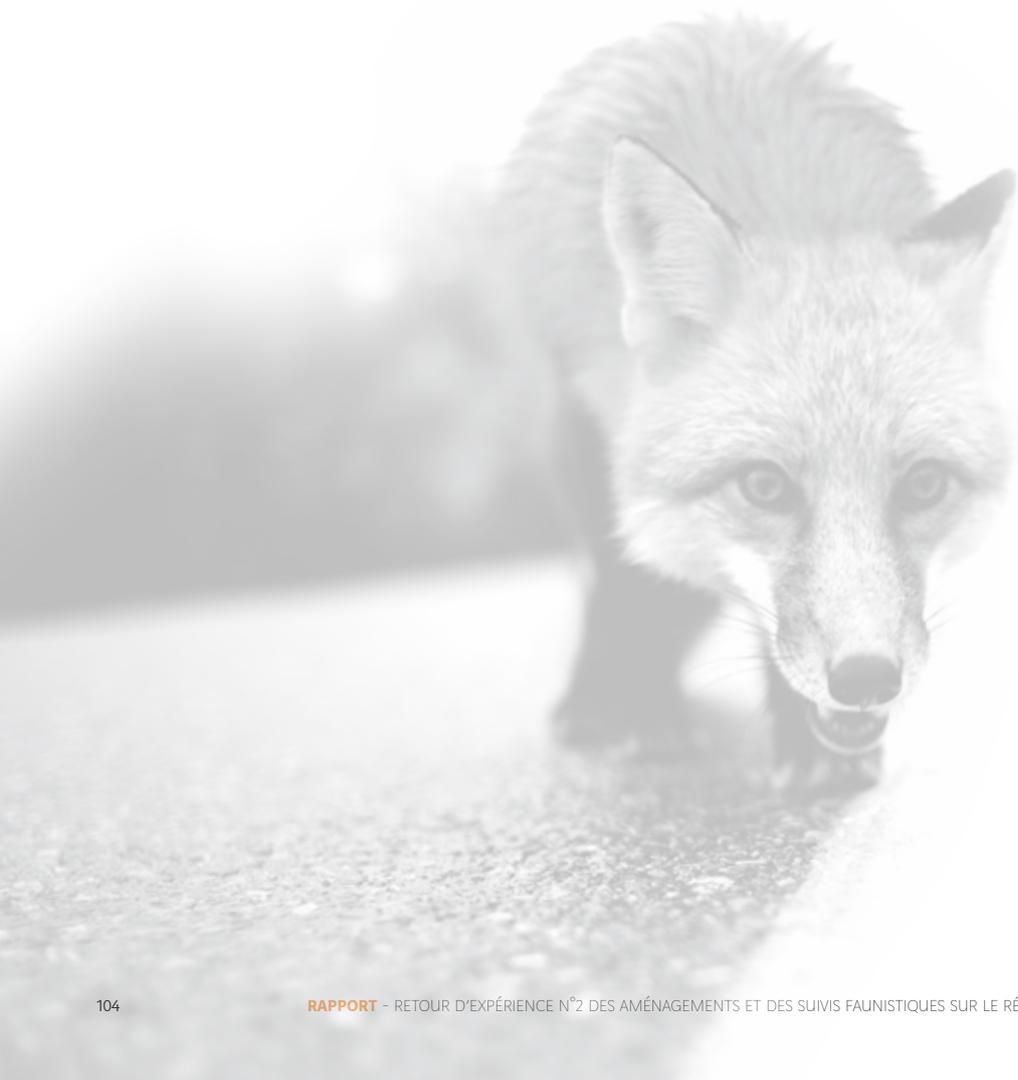
² Adapté seulement pour certaines espèces dans le groupe.

³ Adapté si utilisé dans des ouvrages de petite taille.

- Sélectionner les échelles spatiales et temporelles pour l'échantillonnage des données;
- Évaluer la durée et la fréquence d'échantillonnage nécessaires pour le suivi;
- Sélectionner les variables explicatives.

Une analyse au cas par cas est donc nécessaire. Le Tableau 9 repris du rapport d'O'Brien *et al.* (2018), dresse la liste des différentes méthodes et de leur pertinence d'application pour différents groupes taxonomiques. Trois colonnes ont été ajoutées afin de préciser si les suivis permettent ou non d'individualiser les animaux, et d'évaluer grossièrement si une technique nécessite un investissement en temps et matériel plutôt élevé ou faible.

L'élaboration de nouveaux protocoles expérimentaux doit faire l'objet d'une évaluation des biais et d'une comparaison mesurée des avantages/inconvénients des différentes techniques, afin d'orienter au mieux le choix du protocole. Par exemple, dans une étude visant à comparer l'efficacité d'un piège photographique et d'un enregistrement vidéo continu, Jumeau *et al.* (2017) ont mis en évidence que l'enregistrement vidéo continu était plus efficace que le suivi d'un piège photographique tant en quantification qu'en précision des données. Cependant, au regard du coût matériel et de l'investissement analytique très important pour la vidéo, ils recommandent finalement le suivi par piège photographique pour le suivi de passages inférieurs.



ANNEXE 1

Typologie des ouvrages	Nb	Longueur (m)				Largeur utile (m)				Hauteur utile (m)		
		moy.	±ET	min.	max.	moy.	±ET	min.	max	moy.	±ET	min.
Passage inférieur spécifique faune	96	49,2	14,0	30,0	100,0	1,2	1,9	0,5	12	1,1	0,8	0,7
Ouvrage hydraulique aménagé - Banquette	22	67,1	33,5	24,9	148,7	1,2	0,7	0,5	4	1,6	0,6	0,8
Ouvrage hydraulique aménagé - Encorbellement	13	50,8	16,4	26,0	86,0	0,5	0,1	0,5	0,7	1,3	0,7	0,5
Ouvrage hydraulique aménagé - Enrochement	3	62,9	29,2	30,0	85,8	1,5	1,2	0,8	2,8	2,1	0,6	1,5
Passage inférieur mixte	4	32,8	2,6	30,0	35,0	5,1	3,3	2,5	10	5,3	0,9	4,3
Passage inférieur non dédié	1	71,0				7,5				4,5		
Ouvrage hydraulique non dédié	24	68,7	25,4	35,0	140,0	5,6	9,9	0,7	36	2,3	1,3	0,8
Écopont	15	56,9	12,3	34,5	75,0	18,6	5,0	11,0	25,8			

Tableau 10 : Nombres d'ouvrages suivis par type d'ouvrage et dimensionnements moyens des différents types d'ouvrages.

ANNEXE 2

Structures en charge des suivis	Nb ouvrages
Association d'Etudes, de Protection et d'Aménagement de la Nature en Touraine (SEPANT)	2
Biotope & Ligue pour la Protection des Oiseaux (LPO)	1
CERA Environnement	3
Cistude Nature	8
COFIROUTE	9
Cofiroute & CPIE Loire Anjou	13
Conservatoire d'espaces naturels de Provence-Alpes-Côte d'Azur (CEN PACA)	2
Ecologistes de l'Euzière	22
ECO-MED & LPO	1
Ecosphère & LPO	1
Egis & LPO	1
Eure-et-Loir Nature	3
Fédération Départementale de Chasse (FDC) de Charente-Maritime	1
FDC de Dordogne	1
FDC de la Corrèze	1
FDC de la Drôme	1
FDC de la Loire	1
FDC de Vendée	3
FDC des Landes	1
FDC des Pyrénées-Atlantiques	5
FDC d'Eure et Loir	1
FDC d'Indre-et-Loire	1
FDC du Puy-de-Dôme	3
FDC de l'Aude	1
France Nature Environnement (FNE) - Loire & FDC de la Loire	26
FNE - Rhône	8
FNE - Rhône & FDC du Rhône	8
Groupe Mammalogique et Herpétologique Limousin (GMHL)	8
LPO Anjou	2
LPO AuRA Drôme-Ardèche	2
LPO Auvergne	1
LPO France	10
LPO Loire	3
LPO PACA	3
LPO Rhône	1
LPO Sarthe	3
Nature en Occitanie	13
Nature Midi-Pyrénées	5
Sarthe Nature Environnement	8

Tableau 11 : Liste des 40 organismes en charge des suivis faunistiques par piège photographique.

ANNEXE 3

Espèce	Saison	Passages inférieurs			Écoponts		
		Estimate	Std. Error	p-value	Estimate	Std. Error	p-value
<i>Meles meles</i>							
	Printemps	1,048	0,095	0,000	1,202	0,159	0,000
	Été	0,636	0,093	0,000	0,497	0,161	0,002
	Automne	0,502	0,094	0,000	0,193	0,170	0,258
<i>Vulpes vulpes</i>							
	Printemps	-0,182	0,084	0,029	-	-	-
	Été	-0,829	0,083	0,000	-	-	-
	Automne	-0,848	0,084	0,000	-	-	-
<i>Lepus europaeus</i>							
	Printemps	0,398	0,213	0,062	0,302	0,136	0,026
	Été	0,649	0,208	0,002	0,063	0,126	0,615
	Automne	-0,113	0,235	0,629	-0,368	0,131	0,005
<i>Erinaceus europaeus</i>							
	Printemps	2,255	0,353	0,000	-	-	-
	Été	3,344	0,339	0,000	-	-	-
	Automne	2,396	0,347	0,000	-	-	-
<i>Capreolus capreolus</i>							
	Printemps	-	-	-	-0,725	0,124	0,000
	Été	-	-	-	0,161	0,120	0,182
	Automne	-	-	-	0,032	0,120	0,789
<i>Sus scrofa</i>							
	Printemps	-	-	-	-0,373	0,122	0,002
	Été	-	-	-	-0,713	0,119	0,000
	Automne	-	-	-	-0,304	0,113	0,007
<i>Cervus elaphus</i>							
	Printemps	-	-	-	-1,389	0,359	0,000
	Été	-	-	-	0,518	0,263	0,049
	Automne	-	-	-	-0,042	0,282	0,881

Tableau 12 : Influence de la saison sur l'occurrence des espèces dans les ouvrages inférieurs et écoponts. Les résultats en gras indiquent les effets significatifs.



ANNEXE 4 : CONSTRUCTION DU MODÈLE DE SIMULATION

Deux strates peuvent être définies qui correspondent aux espaces qui se trouvent de part et d'autre du dispositif de franchissement (strates A et B dans la Figure 88)

Ce sont ainsi quatre états de transition qui sont réalisables entre deux sessions de capture :

- Probabilité qu'un individu de la strate A transite vers la strate B φ_{AB}
- Probabilité qu'un individu de la strate B transite vers la strate A φ_{BA}
- Probabilité qu'un individu de la strate A reste dans la strate A φ_{AA}
- Probabilité qu'un individu de la strate B reste dans la strate B φ_{BB}

Le principe de la simulation est de générer un jeu de données fictif réaliste qui est intégré dans un modèle CMR multi-état, qui permettra d'estimer le nombre de fois où le modèle n'arrive pas à détecter de transitions alors qu'elles existent.



Figure 88 : Représentation schématique des possibilités de transitions entre deux strates. φ_{AB} = probabilité qu'un individu transite de la strate A vers la strate B. φ_{BA} = probabilité qu'un individu transite de la strate B vers la strate A. φ_{AA} = probabilité qu'un individu reste dans la strate A. φ_{BB} = probabilité qu'un individu reste dans la strate B.

Il est attendu que le nombre de non-détections de transition baisse quand le nombre de visites, l'effectif et la probabilité de détection augmentent. Ainsi, le test de puissance permettra de choisir une valeur seuil du nombre de sessions de capture à intégrer dans le protocole d'échantillonnage en fonction de la probabilité de détection et de l'effectif estimé.

Matériel et méthodes

- Construction des scénarios : Plusieurs centaines de scénarios sont construits pour un modèle de CMR multi-état en faisant varier les paramètres suivants :
 - ▶ Nombre d'individus : de 15 à 120 par incréments de 15

- ▶ Nombre de visites : de 3 à 10, puis jusqu'à 50 par incréments de 10
- ▶ Probabilité de détection : de 10 à 60 %
- ▶ Taux de transition : 1 %, 2 % et 5 %. Les taux de transition de l'état A à l'état B et de l'état B à l'état A sont gardés 1 toujours égaux (pas de transitions déséquilibrées).

Les valeurs de pourcentage de transition sont choisies en fonction des résultats des suivis CMR compilés dans les rapports de suivi des écoponts. Ces rapports montrent que sur trois années de suivi, le nombre de transitions détectées est très faible, toujours inférieur à 1 % par an, même pour des populations supérieures à 100 individus (Micromammifères).

Au total, les simulations concernent 1152 scénarios.

- Construction d'un jeu de données simulées : Pour chaque scénario, un jeu de données fictif est généré à partir des paramètres des différents scénarios. Un modèle de CMR multi-état est ensuite appliqué, soit prenant en compte les taux de transition. Pour chaque scénario, 1 000 simulations de modèles sont évaluées, ce qui a permis de calculer une variance moyenne des taux de transition et d'évaluer le nombre de fois où le modèle ne détecte pas de transitions alors qu'elles existent. C'est ce dernier paramètre qui est utilisé pour évaluer la robustesse des scénarios. Ainsi, un scénario avec un grand nombre de non-détections de transitions sera jugé comme peu robuste ; à l'inverse, un scénario avec aucune non-détection de transition sera considéré comme robuste.

Ces simulations ont été menées avec le package RMark (Laake 2013) implémenté dans le logiciel R v.4.1.1 (R Core Team 2021).

ANNEXE 5 : PROPOSITION D'UN PROTOCOLE POUR LE SUIVI DES COLÉOPTÈRES *CARABIDAE* SUR LES ÉCOPONTS UTILISÉS COMME CORRIDORS.

CEFE-CNRS - Jean-Pierre VACHER, Claude MIAUD, Aurélien BESNARD.

Contexte

L'objectif de ce suivi est de mettre en lumière la fonctionnalité des écoponts en termes de corridor pour le passage de la petite faune. Dans le but de s'assurer que la petite faune traverse l'écopont, et dans un sens particulier, il est nécessaire de recueillir des observations géoréférencées de part et d'autre de l'écopont et de mettre en place un suivi qui permet de reconnaître les individus. Les coléoptères *Carabidae* sont des Insectes terrestres (ils ne volent pas) très mobiles qui se déplacent le plus souvent la nuit et peuvent parcourir d'assez longues distances dans leur aire vitale à la recherche de proies ou de partenaires. Ils semblent donc de bons modèles pour mesurer la fonctionnalité d'écoponts en termes de corridors pour la petite faune. Ainsi, nous proposons un protocole basé sur de la capture-recapture qui permet une reconnaissance individuelle et ainsi de modéliser les déplacements et leurs directions.

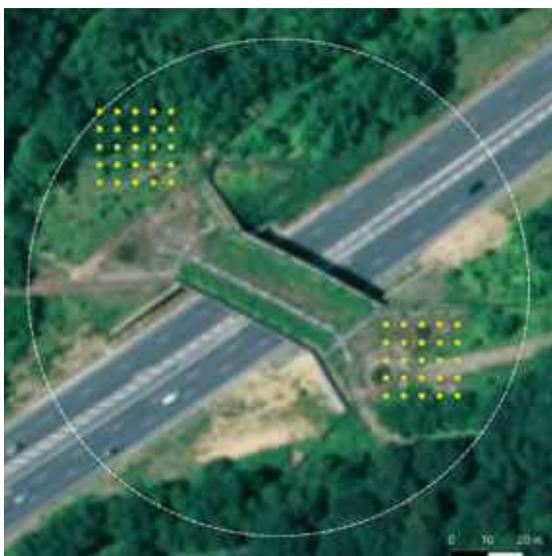


Figure 89 : Représentation schématique de la disposition de deux réseaux de pièges à pots pour l'interception de Carabes.

Protocole

- Définition de l'unité paysagère de référence : L'unité paysagère de référence sera l'écopont avec une zone tampon de 50 mètres environ autour, calculée à partir des extrémités (Figure 89).
- Définition de l'échantillon : Deux réseaux de 25 pots pièges seront disposés de part et d'autre de l'écopont (Figure 89). Chaque pot sera espacé de 5 mètres (Figure 89), sera numéroté, et chaque réseau sera géoréférencé à l'aide d'un GPS.

Échantillonnage

L'échantillonnage est de type capture-recapture (CMR) sur des coléoptères *Carabidae* mesurant plus de 15 millimètres, c'est-à-dire principalement les genres *Calosoma*, *Carabus*, *Cychrus*, *Eurynebria*, *Brosicus*, *Pterostichus*, *Abax*, *Sphodrus*. Le marquage sera réalisé à l'aide d'une combinaison de points apposés sur les élytres (haut et bas) et le pronotum (partie supérieure du thorax) à l'aide d'un marqueur de couleur (marqueur peinture uni-PAINT© non toxique), sur les côtés gauche et droit.

Si l'on opte pour une seule couleur, le nombre de combinaisons possibles est 26-1 par espèce. Si l'on décide d'utiliser deux couleurs, le nombre de combinaisons est plus confortable, 212-1 par espèce (Figure 90). La première solution à 63 combinaisons paraît cependant raisonnable vu le temps prévu et le nombre de pots pièges, mais la seconde option est envisageable si le nombre de captures est plus élevé. Les couleurs seront différentes de chaque côté de l'écopont afin de reconnaître facilement la provenance des individus. Le marquage proposé dure environ un mois.

Fréquence et moment des relevés

Le suivi comportera deux sessions d'un mois chacune à deux périodes de l'année, au printemps (avril-mai) et à l'automne (septembre-octobre), car deux cohortes de *Carabidae* sont susceptibles d'utiliser l'écopont. Le choix des dates est à adapter selon les régions. Le relevé des pots sera fait tous les matins durant trois jours en début de suivi, puis les pots seront rebouchés,



Figure 90 : Exemples de marquage unique avec une combinaison de deux couleurs et six positions sur le pronotum (2 positions) et sur les élytres (4 positions), ici sur un *Pterostichus niger*.

et de nouveaux ouverts pour trois jours (relevés tous les matins) le 15e jour, puis rebouchés de nouveau, et enfin ouverts durant trois jours en fin de suivi (jour 28 jusqu'au jour 30) avec un relevé journalier le matin.

Données relevées

Tous les individus des espèces concernées qui seront trouvés dans les pots pièges seront marqués, avec relevé du numéro de pot dans lequel il a été trouvé et une photographie une fois le marquage apposé.

Covariables à mesurer à chaque session

- Température de l'air (à hauteur d'Homme) à prendre sur le terrain
- Date de relevé
- Heure du relevé
- Nébulosité (nuageux/variable/soleil).

Durée et fréquence du suivi

Ce protocole est prévu pour une session de suivi, c'est-à-dire un mois, car le marquage ne tient pas plus longtemps. Dans certains contextes de mise en service ancienne de l'écopont, une année de suivi pourrait suffire pour obtenir des informations sur les déplacements des *Carabidae*. Cependant, le suivi pourra être reconduit annuellement durant trois années, notamment dans le cas d'écoponts nouvellement construits.

GLOSSAIRE

ADN Environnemental :

ADN extrait à partir d'échantillons collectés dans un environnement (eau, sol, fécès,...) sans cibler directement un organisme.

APPB : Arrêté Préfectoral de Protection Biotope.

ASF : Autoroutes du Sud de la France.

Brande (panneau de brande) :

Clôture naturelle élaborée à partir de brindilles de bruyère récoltées dans des habitats de brandes.

B(D)ACI : Before-(During)-After-Control-Impact. Méthode permettant d'évaluer les différences entre situations « avant projet »/(Pendant projet)/« après projet » sur un ou plusieurs site(s) traité(s) et à l'aide d'un ou plusieurs site(s) témoin(s).

CEFE : Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive (Unité Mixte de Recherche sur le site de l'Université de Montpellier).

CEREMA : Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement la Mobilité et l'Aménagement.

Cesco - MNHN : Centre d'Écologie et des Sciences de la Conservation - Muséum National d'Histoire Naturelle.

Chat haret : Chat domestique retourné à l'état sauvage.

CMR : Capture – Marquage – Recapture. Méthode statistique visant à estimer la taille d'une population animale.

DDT : Direction Départementale des Territoires.

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement.

DRJSCS : Direction Régionale de la Jeunesse, des Sports et de la Cohésion Sociale. Depuis 2021, division en Délégations Régionales Académiques à la Jeunesse, à l'Engagement et aux Sports (DRAJES) et Directions Régionales de l'Économie, de l'Emploi, du Travail et des Solidarités (DREETS).

Faux négatif : On parle de faux négatif (test négatif à tort) quand le résultat du test est contraire à la vérité.

FDC : Fédération Départementale des Chasseurs.

FNC : Fédération Nationale des Chasseurs.

Gliridés : Famille de Rongeurs de tailles moyennes (Loir, Lérot, Muscardins, ...).

Hibernaculum : Abri artificiel, refuge utilisé par la petite faune durant l'hivernage ou comme abri régulier le reste de l'année.

ICE : Informations sur la Continuité Écologique.

Mustélidés : Famille de mammifères carnivores (Blaireau européen, Belette, Hermine, Putois, ...).

OFB : Office Français de la Biodiversité.

Rapport COST 341 :

Fragmentation des habitats due aux infrastructures de transport, SETRA, septembre 2007.

Rex 1 : Premier Retour d'Expérience VINCI-Autoroutes publié en 2016.

Rex 2 : Second retour d'Expérience VINCI-Autoroutes publié en 2023 (présent document).

RFID : Radio Frequency Identification. Méthode de mémorisation et de récupération de données à distance par transfert d'énergie électromagnétique.

Rhopalocères : Le taxon des Rhopalocères correspond à l'actuelle définition de la super-famille des *Papilionoidea*. Il fait référence au sens courant, mais de façon inexacte aux « papillons de jour ».

RNCFS : Réserve Nationale de Chasse et de Faune Sauvage.

RNN : Réserve Naturelle Nationale.

RNR : Réserve Naturelle Régionale.

SETRA : Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (désormais CEREMA).

SIC : Site d'Importance Communautaire.

SIPAF : Système d'information sur les Passages à Faune.

SRADDET : Schémas Régionaux d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires.

Time-Lapse: Technique utilisée en photographie, permettant de

prendre des photos de manière automatisée à une fréquence définie régulière et sur une plage de temps déterminée.

ZNIEFF1 : Zone Naturelle d'Intérêt Écologique Faunistique

et Floristique de type 1.

ZNIEFF2 : Zone Naturelle d'Intérêt Écologique Faunistique et Floristique de type 2.

ZPS : Zone de Protection Spéciale.

BIBLIOGRAPHIE

Andis, A.Z., Huijser, M.P. & Broberg, L. (2017) Performance of arch-style road crossing structures from relative movement rates of large mammals. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 5.

Apps, P. & McNutt, J.W. (2018) Are camera traps fit for purpose? A rigorous, reproducible and realistic test of camera trap performance. *African Journal of Ecology*, 56, 710-720.

Arthur, L. & Lemaire, M. (2009) *Les Chauves-souris de France Belgique Luxembourg et Suisse*. Biotope.

Barton, K. (2015) MuMIn: multi-model inference. R package: retrieved from <http://r-forge.r-project.org/projects/mumin/>.

Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. & Walker, S. (2015) Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67, 1 - 48.

Baudouin, J.-M., Burgun, V., Chanseau, M., Larnier, M., Ovidio, M., Sremski, W., Steinbach, P. & Voegtle, B. (2014) Evaluer le franchissement des obstacles par les poissons. Principes et méthodes. *Informations sur la continuité écologique - ICE Comprendre pour agir mai 2014*,

pp. 200. ONEMA.

Berthinussen, A. & Altringham, J. (2015) Development of a cost-effective method for monitoring the effectiveness of mitigation for bats crossing linear transport infrastructures. School of Biology, University of Leeds, Leeds LS2 9JT.

Bivand, R. & Rundel, C. (2021) Rgeos: Interface to Geometry Engine - Open Source ('GEOS'). <https://r-forge.r-project.org/projects/rgeos/>.

Claireau, F., Bas, Y., Julien, J.-F., Machon, N., Allegrini, B., Puechmaille, S.J. & Kerbiriou, C. (2019) Bat overpasses as an alternative solution to restore habitat connectivity in the context of road requalification. *Ecological Engineering*, 131, 34-38.

Clevenger, A.P. & Barrueto, M. (2014) Trans Canada Highway Wildlife and Monitoring Research, Final Report. pp. 304. Prepared for Parks Canada Agency, Radium Hot Springs, British Columbia.

Clevenger, A.P., Chruszcz, B., Gunson, K. & J. Wierzchowski, J. (2002) Roads and wildlife in the Canadian Rocky Mountain Parks - Movements, mortality and mitigation. *Final Report*. Parks Canada, Banff, AB.

Clevenger, A.P. & Huijser, M.P. (2011) Wildlife crossing structure handbook. Design and evaluation in North America. *Publication No. FHWA-CFL/TD-11-003*, pp. 211. Central Federal Lands Highway Division, Lakewood.

Conan, A., Fleitz, J., Garnier, L., Le Brishoual, M., Handrich, Y. & Jumeau, J. (2022) Effectiveness of wire netting fences to prevent animal access to road infrastructures: an experimental study on small mammals and amphibians. *Nature Conservation*, 47.

Driessen, M.M., Jarman, P.J., Troy, S. & Callander, S. (2017) Animal detections vary among commonly used camera trap models. *Wildlife Research*, 44, 291-297, 297.

Fagart, S., Heurtebise, C., Quaintenne, G., Jourde, P. & Thierry, M. (2016) Fréquentation de buses dédiées aux passages de la petite et moyenne faunes sous deux autoroutes de l'ouest de la France. Bilan des deux premières années de suivis par pièges photographiques. *Revue d'Écologie - La Terre et la Vie*, 1, 82-98.

Fournier, P., Quéméré, E., Coulon, A., Bonnot, N.,

- Khimoun, A., Galan, M., Fournier-Chambrillon, C., Laoué, E., Chusseau, J.-P., Berezyiat, T. & Aulagnier, S. (2013)** Perméabilité de l'A65 Pau-Langon vis-à-vis du Cerf (*Cervus elaphus*) : Analyse génétique de la structuration de référence des populations du massif landais. Poster in 36^e Colloque Francophone de Mammalogie «*Climat, paysages, perceptions : les mammifères sauvages face aux changements globaux*», Nature Midi-Pyrénées & SFPEM, Toulouse, France, 18-20 octobre 2013.
- Gigleux, M. & De Billy, V. (2013)** Petits ouvrages hydrauliques et continuités écologiques - Cas de la faune piscicole. *Note d'information du Sétra - Série Economie environnement conception n°96*, pp. 25. Sétra, Provins.
- Glover-Kapfer, P., Soto-Navarro, C.A. & Wearn, O.R. (2019)** Camera-trapping version 3.0: current constraints and future priorities for development. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 5, 209-223.
- Greenberg, S., Godin, T. & Whittington, J. (2019)** Design patterns for wildlife-related camera trap image analysis. *Ecology and Evolution*, 9, 13706-13730.
- Helldin, J.O. (2022)** Are several small wildlife crossing structures better than a single large? Arguments from the perspective of large wildlife conservation. *Nature Conservation*, 47.
- Hofmeester, T.R., Rowcliffe, J.M. & Jansen, P.A. (2017)** A simple method for estimating the effective detection distance of camera traps. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 3, 81-89.
- Iuell, B., Bekker, G.J., Cuperus, R., Dufek, J., Fry, G., Hicks, C., Hlavac, V., Keller, V., Rosell, C., Sangwine, T., Torsolv, N. & Wandall, B.I. (2003)** *Wildlife and traffic : A european handbook for identifying conflicts and designing solutions*. KNNV Publishers, Zeist.
- Jones, D.N. & Pickvance, J. (2013)** Forest birds use vegetated fauna overpass to cross multi-lane road. *Oecologia Australis*, 17, 42-51.
- Jumeau, J., Petrod, L. & Handrich, Y. (2017)** A comparison of camera trap and permanent recording video camera efficiency in wildlife underpasses. *Ecology and Evolution*, 7, 7399-7407.
- Karlson, M., Seiler, A. & Mörtberg, U. (2017)** The effect of fauna passages and landscape characteristics on barrier mitigation success. *Ecological Engineering*, 105, 211-220.
- Kays, R., Tilak, S., Kranstauber, B., Jansen, P.A., Carbone, C., Rowcliffe, M.J., Fountain, T., Eggert, J. & He, Z. (2010)** Monitoring wild animal communities with arrays of motion sensitive camera traps. arXiv:1009.5718.
- Laake, J. (2013)** "RMark: An R Interface for Analysis of Capture-Recapture Data with MARK." AFSC Processed Rep. 2013-01, Alaska Fish. Sci. Cent., NOAA, Natl. Mar. Fish. Serv., Seattle, WA. <https://apps-afsc.fisheries.noaa.gov/Publications/ProcRpt/PR2013-01.pdf>.
- Laforge, A., Archaux, F., Bas, Y., Gouix, N., Calatayud, F., Latge, T. & Barbaro, L. (2019)** Landscape context matters for attractiveness and effective use of road underpasses by bats. *Biological Conservation*, 237, 409-422.
- Lê, S., Josse, J. & Husson, F. (2008)** FactoMineR: an R package for multivariate analysis. *Journal of Statistical Software*, 25, 1 - 18.
- Mata, C., Herranz, J. & Malo, J.E. (2020)** Attraction and Avoidance between Predators and Prey at Wildlife Crossings on Roads. *Diversity*, 12, 166.
- Meek, P.D., Ballard, G.-A. & Fleming, P.J.S. (2015)** The pitfalls of wildlife camera trapping as a survey tool in Australia. *Australian Mammalogy*, 37, 13-22.
- Meek, P.D., Ballard, G.A. & Falzon, G. (2016)** The higher you go the less you will know: placing camera traps high to avoid theft will affect detection. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2, 204-211.
- Meek, P.D. & Pittet, A. (2012)** User-based design specifications for the ultimate camera trap for wildlife research. *Wildlife Research*, 39, 649 - 660.
- Milanov, Z.B. (1996)** Effect of mowing fodder plants on small game populations in central Bulgaria. *Proceedings of International Union of Game Biologists, XXII Congress: the game and the man 4-8 September 1995*, pp. 394-397. Sofia, Bulgaria.

Ministry of Agriculture Food and the Environment (2016)

Technical prescriptions for wildlife crossing and fence design (second edition, revised and expanded). Documents for the mitigation of habitat fragmentation caused by transport infrastructure, number 1. pp. 124. Ministry of Agriculture, Food and the Environment, Madrid.

Naiman, R.J., Decamps, H. & McClain, M.E. (2010)

Riparia: ecology, conservation, and management of streamside communities. pp. 430. Elsevier.

Nowicki, F. & Rousselle

, K. (2016) Chiroptères et infrastructures de transport. *Références*, pp. 167. Cerema.

O'Brien, T.G., Kinnaird, M.F. & Wibisono, H.T. (2003)

Crouching tigers, hidden prey: Sumatran tiger and prey populations in a tropical forest landscape. *Animal Conservation*, 6, 131-139.

Obrien, E., van der Grift, E., Elmeros, M., Wilson-Parr, R. & Carey, C. (2018)

Call 2013: Roads and Wildlife–The ECOROAD Roads and Wildlife Manual. *CEDR Contractor Report 2018-3* (May2018), pp. 123. Conference of European Directors of Roads. ROD-Is, Alterra, Aarhus University, Brussel.

Ortmann, C.R. & Johnson, S.D. (2020)

How reliable are motion-triggered camera traps for detecting small mammals and birds in ecological studies? *Journal of Zoology*, n/a.

Pebesma, E. (2018) Simple Features for R: standardized support for spatial vector data.

The R Journal, 10(1), 439–446.

Pfister, H.P. & Birrer, S. (1991)

Lebensraum für die Zukunft. pp. 40. Schweiz Vogelwarte Sempach, Sonderheft.

Pfister, H.P., Heynen, D., Keller, V., Georgii, B. & von Lerber, F. (1999)

Häufigkeit und Verhalten ausgewählter Wildsäuger auf unterschiedlich breiten Wildtierbrücken (Grünbrücken). pp. 49. Schweizerische Vogelwarte, Sempach.

Pichard, A., Delauge, D. & Rombaut, D. (2012)

Rapport d'expertise – Suivi des Chiroptères au niveau des ouvrages souterrains de l'autoroute A8 – Le Luc-Vidauban (83). pp. 60. Conservatoire d'espaces naturels de Provence-Alpes-Côte d'Azur, Sisteron.

QGIS Development Team (2021)

QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.

R Core Team (2021)

R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

Rytwinski, T., Soanes, K., Jaeger, J.A.G., Fahrig, L., Findlay, C.S., Houlahan, J., van der Ree, R. & van der Grift, E.A. (2016)

How effective is road mitigation at reducing road-kill? *A meta-analysis*. PLoS ONE, 11, e0166941.

Scotson, L., Johnston, L.R., Iannarilli, F., Wearn, O.R., Mohd-Azlan, J., Wong, Wai M., Gray, T.N.E., Dinata, Y., Suzuki, A., Willard, C.E., Frechette, J., Loken, B., Steinmetz, R.,

Moßbrucker, A.M., Clements, G.R. & Fieberg, J. (2017)

Best practices and software for the management and sharing of camera trap data for small and large scales studies. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 3, 158-172.

Seiler, A., Olsson, M. & Lindqvist, M. (2015)

Analys av infrastrukturens permeabilitet för klövdjur. Rapport från forskningsprogrammet TRIEKOL. pp. 124. Trafikverket, Borlänge.

Soanes, K., Taylor, A.C., Sunnucks, P., Vesk, P.A., Cesarini, S. & van der Ree, R. (2018)

Evaluating the success of wildlife crossing structures using genetic approaches and an experimental design: Lessons from a gliding mammal. *Journal of Applied Ecology*, 55, 129-138.

Swan, M., Di Stefano, J. & Christie, F. (2014)

Comparing the effectiveness of two types of camera trap for surveying ground-dwelling mammals. pp. 123-130. CSIRO PUBLISHING.

Thornton, D.H., Branch, L.C. & Sunquist, M.E. (2012)

Response of large galliforms and tinamous (Cracidae, Phasianidae, Tinamidae) to habitat loss and fragmentation in northern Guatemala. *Oryx*, 46, 567-576.

Tobler, M.W., Carrillo-Percastegui, S.E., Leite Pitman, R., Mares, R. & Powell, G. (2008)

An evaluation of camera traps for inventorying large- and medium-sized terrestrial rainforest mammals. *Animal Conservation*, 11, 169-178.

UICN France, MNHN, SFPEM & ONCFS (2017) La Liste rouge des espèces menacées en France – Chapitre Mammifères de France métropolitaine. Paris, France.

Vacher, J.-P., Miaud, C. & Besnard, A. (2022) Bilan contrat LSP (n° 202483, UMR5175) Analyse des données de passages à faune autoroutiers du réseau ASF. pp. 17. CEFE Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, Montpellier.

Van der Grift, E.A. & van der Ree, R. (2015) Guidelines for Evaluating Use of Wildlife Crossing Structures. *Handbook of Road Ecology* (eds R. van der Ree, D.J. Smith & C. Grilo), pp. 119-128. Wiley-Blackwell.

Van der Grift, E.A., van der Sluis, T., Snep, R.P.H., Jaarsma, C.F., de Vries, J.R., Boers, J. & Kruit, J. (2011) Natuurbrug Oss. Advies positionering, ontwerp en landschappelijke inpassing. *Alterra-rapport* 2138, pp. 73. Wageningen, Alterra.

Wearn, O. & Glover-Kapfer, P. (2017) *Camera-trapping for conservation: a guide to best-practices*.

Welbourne, D. (2013) A method for surveying diurnal terrestrial reptiles with passive infrared automatically triggered cameras. *Herpetological Review*, 44, 247-250.

Welbourne, D.J., Claridge, A.W., Paull, D.J. & Lambert, A. (2016) How do passive infrared triggered camera traps

operate and why does it matter? Breaking down common misconceptions. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2, 77-83.

Young, S., Rode-Margono, J. & Amin, R. (2018) Software to facilitate and streamline camera trap data management: A review. *Ecology and Evolution*, 8, 9947-9957.

DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

Les passages à faune. Préserver et restaurer les continuités écologiques avec les infrastructures linéaires de transport. CEREMA, Collection Références, 2021.

Clôtures routières et ferroviaires et faune sauvage : Critères de choix et recommandations d'implantation. CEREMA, Collection Connaissances, 2019.

Petits ouvrages hydrauliques et continuités écologiques. Cas de la faune piscicole. SETRA. Note d'information n°96, décembre 2013.

Informations sur la Continuité Écologique – ICE. Évaluer le franchissement des obstacles

par les poissons. Principes et méthodes. ONEMA, juillet 2014.

Guide technique – Chiroptères et infrastructures de transport. CEREMA, avril 2016.

Rapport du retour d'expérience des aménagements et des suivis faunistiques sur le réseau VINCI Autoroutes, VINCI Autoroutes, LPO France, CEREMA, 2016. (<https://www.trameverteetbleue.fr/documentation/references-bibliographiques/retour-experience-amenagements-suivis-faunistiques-sur>)

Synthèse du retour d'expérience des aménagements et des suivis faunistiques sur le réseau VINCI Autoroutes, VINCI Autoroutes, LPO France, CEREMA, 2016.

(<https://www.trameverteetbleue.fr/documentation/references-bibliographiques/retour-experience-amenagements-suivis-faunistiques-sur-0>)

Fiche technique Aménagement d'un écopont à haute fonctionnalité écologique, VINCI Autoroutes, ATEN, 2014. (<http://www.trameverteetbleue.fr/retours-experiences/amenagement-ecopont-haute-fonctionnalite-ecologique>)

VINCI Autoroutes

Direction Technique de l'Infrastructure
74, allée de Beauport
84278 Vedène cedex
Tél. : +33 4 90 32 73 54
Fax. : +33 4 90 32 91 08

Photo de couverture : © Erondeau - Conception Découverte du Vivant - 2023

