

# Évaluation des impacts de la fragmentation du paysage par des autoroutes sur les chauves-souris et de l'efficacité des chiroptéroducts

Fabien CLAIREAU\*, \*\* \*\*\*, Sébastien J. PUECHMAILLE\*\*, \*\*\*\*,  
Yves BAS\*, \*\*\*\*\*, Benjamin ALLEGRINI\*\*\*,  
Nathalie MACHON\* et Christian KERBIRIOU\*

\* Centre d'Écologie et des Sciences de la Conservation,  
Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, France

\*\* Institute of Zoology and Museum, Ernst Moritz Arndt University,  
Greifswald, Germany

\*\*\* Naturalia-Environnement,  
Avignon, France

\*\*\*\* Institut des Sciences de l'Évolution de Montpellier,  
Université de Montpellier, Montpellier, France

\*\*\*\*\* Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive, Centre National de la Recherche Scientifique,  
Montpellier, France

**Résumé.** - Les infrastructures linéaires de transports (ILT), dont les routes, sont une des principales causes du déclin de la biodiversité. Bien que les évaluations environnementales permettent de limiter ce déclin, la séquence « Éviter, Réduire et Compenser les impacts » peine à s'appliquer pleinement. En effet, la séquence ERC fait bien souvent appel à des données qualitatives en oubliant les processus biologiques et/ou écologiques et leur échelle spatio-temporelle. L'impact des routes est globalement bien documenté pour plusieurs groupes biologiques, hormis pour les chauves-souris, pourtant susceptibles d'être très fortement affectées. Par ailleurs, leur protection stricte nécessite leur prise en compte dans la séquence ERC. Ainsi le premier objectif était de pouvoir étudier l'impact des routes, et notamment des autoroutes, en mesurant et en quantifiant sa magnitude sur les populations de chauves-souris. Le second objectif était d'évaluer l'efficacité des mesures de réductions engagées, notamment les chiroptéroducts, pour réduire ces impacts. Nos principaux résultats montrent que les autoroutes ont un impact négatif significatif sur l'activité de chasse et de transit pour plusieurs espèces de chauves-souris jusqu'à au moins cinq kilomètres de distance à une autoroute. De plus, l'effet des autoroutes semblerait également entraîner des conséquences sur la génétique des populations. Enfin, nous avons étudié les chiroptéroducts, ouvrages dédiés aux chauves-souris visant à réduire ces impacts par l'amélioration des connectivités écologiques. Ce type d'ouvrage dédié semble être approprié lorsqu'il est situé dans des corridors écologiques fins tels que les haies.

**Mots clefs.** - acoustique, caméra thermique, chiroptéroducts, mesures ERC, ouvrage de franchissement, route, trajectographie.

## INTRODUCTION

Les infrastructures de transports (ex. : routes) ont été identifiées comme l'une des dix principales pressions sur la biodiversité [MAXWELL *et al.*, 2016]. La circulation des véhicules induit une mortalité directe par collision, entraîne des nuisances lumineuses et sonores et une pollution chimique [FORMAN, 2000 ; FORMAN AND ALEXANDER, 1998 ; TROMBULAK AND FRISSELL, 2000]. Ces changements dans les configurations du paysage ont des conséquences à plusieurs niveaux : du comportement individuel à la dynamique des populations en passant par le fonctionnement global des écosystèmes [FISCHER AND LINDENMAYER, 2007 ; KRAUSS *et al.*, 2010 ; QUINN AND

HARRISON, 1988 ; SAUNDERS *et al.*, 1991]. Bien que la zone d'effet des routes (c.-à-d., road-effect zone [FORMAN AND DEBLINGER, 2000]) ait été très bien documentée pour les mammifères terrestres, les oiseaux et les amphibiens, les études sur l'effet des routes sur les chauves-souris font défaut. En effet, seulement deux études ont été publiées à ce jour et qui se limitent aux abords des axes majeurs (c.-à-d., inférieur à 1,6 km de distance à la route) [BERTHINUSSEN AND ALTRINGHAM, 2012a ; KITZES AND MERENLENDER, 2014] et non à l'échelle des capacités de déplacement des chauves-souris qui vont au-delà.

Par ailleurs les routes peuvent avoir des effets négatifs sur la structuration et la diversité génétique des populations. Ces conséquences peuvent être l'abaissement du

taux d'hétérozygotie et du polymorphisme génétique [FORMAN AND ALEXANDER, 1998]. Là aussi, plusieurs groupes biologiques ont déjà fait l'objet d'études génétiques en lien avec la fragmentation et donc la rupture des continuités écologiques comme par exemple les grands mammifères [HARTL *et al.*, 2005], les amphibiens [CUSHMAN, 2006], les reptiles [CLARK *et al.*, 2010], les insectes [KELLER AND LARGIADER, 2003], les arachnides [RAMIREZ AND HAAKONSEN, 1999]. Mais aucune littérature n'est disponible en ce qui concerne la fragmentation des paysages par les routes sur la structuration génétique des populations de chauves-souris [BERTHINUSSEN, 2013].

Afin de réduire les impacts des routes sur les chauves-souris, il est possible d'agir localement (au niveau de l'autoroute). En Europe et en France, les chiroptéroducts tendent à se développer depuis quelques années car ils sont moins coûteux, nécessitent une faible emprise foncière d'installation et par le fait (i) qu'ils permettraient un plus grand nombre de franchissements de chauves-souris au-dessus de la route et (ii) éviteraient les risques de collision (c.-à-d., à plus de 5 m de hauteur [BERTHINUSSEN AND ALTRINGHAM, 2012b]). Mais à ce jour, une seule publication scientifique existe et a conclu en son inefficacité [BERTHINUSSEN AND ALTRINGHAM, 2012b]. Toutefois, les auteurs concluent également en la nécessité de mener des études complémentaires et adaptées, notamment à travers un Before-After Control-Impact (BACI). En effet, la nécessité d'avoir des méthodes d'évaluation pré et post construction est plus que nécessaire si l'on souhaite connaître la réelle efficacité d'une mesure « ERC » [MØLLER *et al.*, 2016].

Afin de répondre à l'évaluation de l'efficacité de ces ouvrages (mesure « R »), deux outils de trajectographie ont été développés : l'un en acoustique et l'autre par caméra thermique à travers deux expérimentations scientifiques. Les principaux objectifs afin d'étudier les mesures « R » localement étaient : est-il possible de rétablir la connectivité des habitats par des mesures de réduction ? et comment standardiser une méthode d'évaluation de ces mesures de réduction ?

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à l'effet des autoroutes sur l'activité de chasse et de transit des chauves-souris ainsi que les potentielles conséquences sur la structuration génétique des populations. Dans un second temps, nous nous sommes intéressés à l'évaluation de l'efficacité de plusieurs chiroptéroducts.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### *Impacts des autoroutes sur les populations de chauves-souris*

Afin d'évaluer l'impact des autoroutes sur l'activité des chauves-souris, nous avons disposé des enregistreurs acoustiques à différentes distances de l'autoroute, dans cinq grands types d'habitats et dans trois sites de plaines en France : l'un dans un contexte d'agriculture intensive, le deuxième dans un site bocager et le dernier, étant l'intermédiaire entre les deux autres. Les aires d'études étaient

de 10 km<sup>2</sup> et centrées sur l'autoroute afin de correspondre aux capacités de déplacement des chauves-souris. Ensuite, nous avons utilisé une méthode de traitement des données acoustiques sans avoir à réaliser des confirmations [BARRÉ *et al.*, 2019] afin d'utiliser des modèles mixtes tenant compte de la distance à la route en fonction des habitats autour des points d'échantillonnage.

De plus, dans le but d'évaluer l'effet sur la génétique des populations, nous avons échantillonné, à l'aide des associations locales (Picardie-Nature, Bretagne-Vivante, SHNA, GCDPL & LPO-37) plusieurs colonies de Petits rhinolophes (*Rhinolophus hipposideros*) en France séparées par une autoroute. Nous avons choisi cette espèce car elle est réputée pour être sensible à la fragmentation des habitats et pour laquelle des marqueurs microsatellites ont été développés [PUECHMAILLE *et al.*, 2005 ; ZARZOSO-LACOSTE *et al.*, 2018]. Dans un premier temps, nous avons regardé les mouvements d'individus entre les colonies puis nous nous sommes intéressés à la structuration génétique de la population. Afin de compléter ces résultats, nous avons également étudié l'assignation de population et de parenté de chaque individu échantillonné.

### *Évaluation des ouvrages dédiés*

Dans un premier temps, nous avons étudié trois chiroptéroducts parmi les cinq existant en France métropolitaine sur l'autoroute A89 (n=2) et sur la route D301 (n=1). Pour cette étude, nous n'avons pas d'état initial suffisamment robuste pour connaître l'efficacité des chiroptéroducts à faire passer plus de chauves-souris et à hauteur correcte (c.-à-d., pouvoir réaliser un BACI). En revanche, nous nous sommes attachés à développer une méthode de quantification des franchissements de chauves-souris [CLAIREAU *et al.*, 2019b] pour voir : (i) si les chauves-souris sont capables d'utiliser les chiroptéroducts, (ii) si les franchissements au niveau de cette structure sont de même importance que des franchissements réalisés dans le même type de milieu mais sans structure, (iii) si les franchissements au niveau de cette structure sont plus importants que des franchissements réalisés dans un couloir de déplacement préalablement identifié lors de l'évaluation environnementale du projet routier et (iv) si l'utilisation de ces structures est dépendante de leur positionnement dans le paysage et/ou de leurs caractéristiques.

Ensuite, nous avons appliqué notre méthode de quantification de traversées sur un site expérimental sur l'autoroute A83 (n=1). Expérimental, car cette étude est indépendante de toutes contraintes réglementaires. Nous avons suivi le site un an avant l'installation de l'ouvrage et un an après son installation. Les franchissements de route par les chauves-souris ont été évalués grâce à un contrôle/témoin échantillonné en même temps que le traitement (i.e, position de l'ouvrage dédié). Ainsi, nous avons mis en place un plan d'échantillonnage de type BACI. De plus, pour évaluer la hauteur de vol des chauves-souris, nous avons développé un outil permettant de retrouver et retracer les trajectoires de chauves-souris à partir d'images thermiques : le *Bat Tracking Toolbox* (BTT) [CLAIREAU *et al.*,

2021]. Les hauteurs de vol des chauves-souris ont été évaluées grâce à un avant/après au niveau du chiroptéroduct.

### RÉSULTATS

#### Impacts des autoroutes sur les populations de chauves-souris

Concernant l'évaluation de l'impact des autoroutes sur l'activité de chasse et/ou de transit sur les chauves-souris ; parmi les 13 taxons de chauves-souris étudiés, l'activité de cinq taxons semble significativement affectée par les grands axes routiers. Ces taxons sont : les « clutters » (c.-à-d., les espèces volant au plus proche du feuillage), *Eptesicus serotinus*, *Myotis spp.*, *Pipistrellus pipistrellus* and *R. hipposideros*. En effet, l'activité des chauves-souris diminue fortement dès lors que l'on se rapproche des autoroutes. Cet effet semble très important car il ne disparaît pas, même à 5 km (Fig. 1, exemple pour *R. hipposideros*) (Figure 1).

Concernant l'évaluation de l'impact des autoroutes sur l'échange de gène pour le Petit rhinolophe, nous avons trouvé une structuration génétique significative entre les colonies de Petit rhinolophe étudiées dont la barrière aux flux géniques correspond au tracé de la nationale N2 (2X2 contiguës) (Figure 2). Cette barrière a été confirmée par une analyse par bootstrap (résultats non publiés [CLAIREAU, 2018]).

#### Évaluation des ouvrages dédiés

En appliquant notre méthode de quantification de traversées sur trois sites existants (A89 et D301) et un

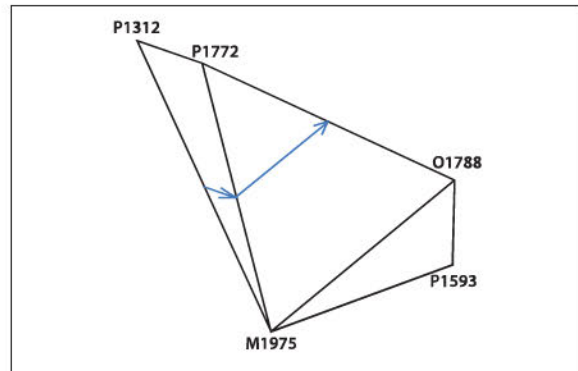


Figure 2. - Barrière génétique (trait bleu) qui correspond au tracé de la nationale 2

site expérimental (A83) [CLAIREAU *et al.*, 2019b, 2019a], nous trouvons que les chauves-souris peuvent franchir l'autoroute au niveau des ouvrages dédiés et les utilisent lorsque ceux-ci sont correctement placés dans un couloir de déplacement préalablement identifié. Par ailleurs, les ouvrages dédiés, comme mesure de réduction visant à rétablir la connectivité entre habitats, sont insuffisants lorsqu'ils sont placés dans un large couloir de déplacement (ex. : boisement) et meilleurs lorsque le couloir de déplacement est étroit (ex. : haie) sans pour autant présumer d'un rétablissement total puisqu'il n'existe pas d'état initial avant construction de l'autoroute.

En appliquant notre méthode d'évaluation des hauteurs de vol sur un site expérimental (A83) [CLAIREAU *et al.*, 2021], nous trouvons que dans ce contexte, l'ou-

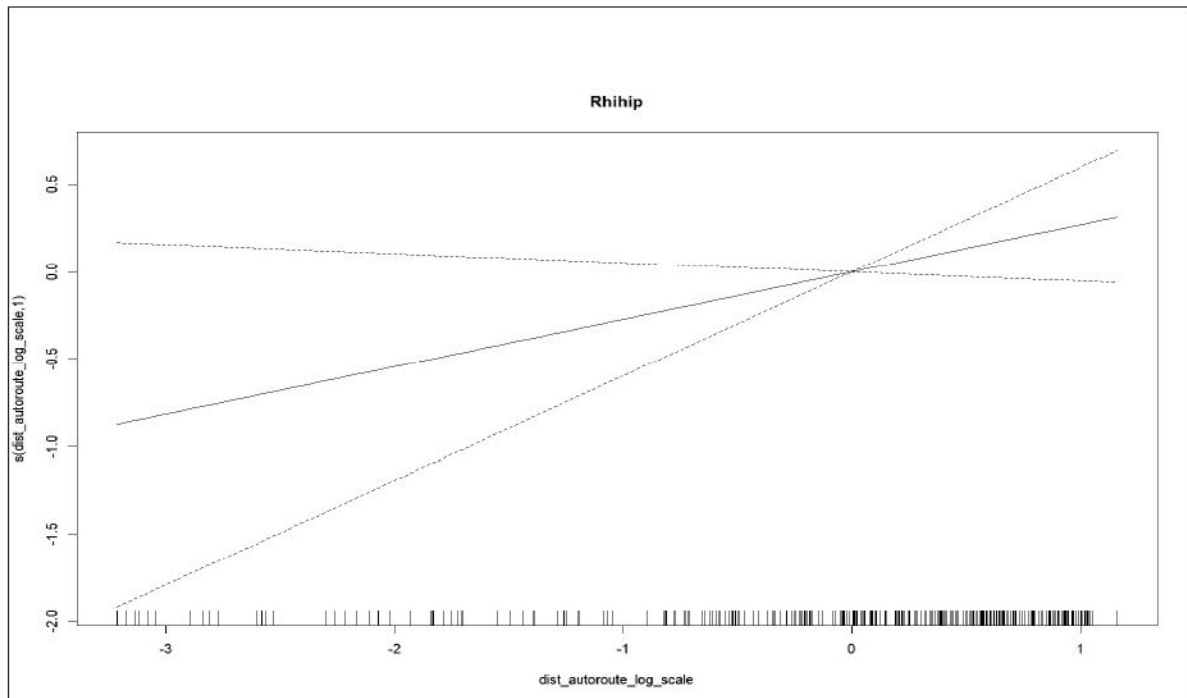


Figure 1. - Modèle mixte additif généralisé (GAMM) pour le Petit rhinolophe négativement impacté

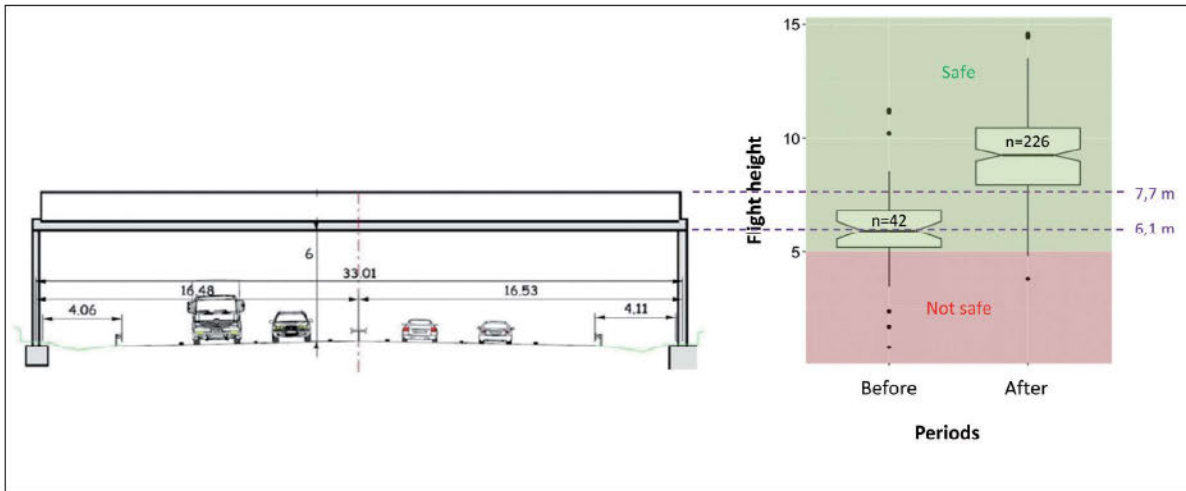


Figure 3. - Hauteur de vol des chauves-souris avant et après installation de l'ouvrage dédié

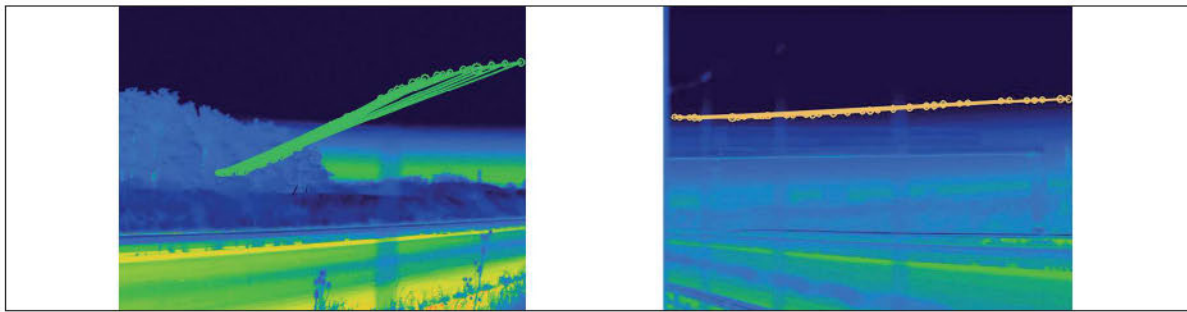


Figure 4 et 5. - Trajectoires de chauves-souris (lignes verte et orange) avant et après la pose du chiroptéroduct

vrage dédié augmente significativement la hauteur de vol des chauves-souris (Figure 3).

Deux exemples de trajectoires de chauves-souris sont présentés ci-dessus (Figs. 4 et 5).

#### DISCUSSION

##### *Impacts des autoroutes sur les populations de chauves-souris*

Nous avons ainsi montré que les autoroutes agiraient négativement sur l'activité des chauves-souris ayant ainsi des conséquences sur la structuration génétique des populations et sur la taille des colonies causée par la perte d'habitat de chasse [FROIDEVAUX *et al.*, 2017]. Ainsi, on peut dire que malgré une emprise foncière faible des autoroutes, elles constituent une véritable pression sur la biodiversité au même titre que l'agriculture intensive.

Ces résultats inquiétants doivent être pris en compte dans l'aménagement du territoire et dans les dossiers réglementaires. En effet, ces études ont mis en évidence un effet majeur qui est souvent négligé dans la hiérarchie d'atténuation des impacts qu'impose la séquence ERC [BIGARD *et al.*, 2017]. Il est impératif de penser à des alternatives comme la requalification des routes (ex. : éviter de construire de nouvelles routes dans des habitats de bonne qualité pour les chauves-souris et/ou d'élar-

gir les routes existantes), tenir compte de ces effets à grande échelle et préserver autant que possible les corridors écologiques.

Si l'évitement total des impacts des routes sur la biodiversité est impossible, il est nécessaire de réduire, voire d'effacer, l'effet de barrière provoqué sur les chauves-souris. En premier lieu le tracé de la route doit éviter les zones d'intérêt pour les chauves-souris et protégées (ex. : zone Natura 2000) à plus de 5 km (c.-à-d., évitement partiel). Après cet évitement partiel, de nombreuses mesures d'atténuation peuvent être proposées afin de rétablir la connectivité des habitats, notamment la mise en place de passages supérieurs (passages à faune, chiroptéroducts), passages inférieurs (ponts), réduction de la vitesse, dissuasion et dérivation (plantation de haies) et amélioration de l'habitat [MØLLER *et al.*, 2016]. Des études récentes ont suggéré que les passages à faune et les passages inférieurs pourraient constituer la meilleure solution pour restaurer les continuités écologiques, tandis que les chiroptéroducts semblent être moins efficaces [BERTHINUSSEN AND ALTRINGHAM, 2012b].

Lorsque l'évitement des impacts et les mesures de réduction des impacts ne suffisent pas, il est impératif de proposer des mesures compensatoires afin d'atteindre le *no net loss*. Ces mesures peuvent être la restauration des zones d'alimentation et de la connectivité des habitats

dans le paysage autour des colonies comprises dans la *road-effect zone*.

Enfin, pour la construction de routes futures, nous préconisons l'évaluation de la perte de connectivité et d'activité des chauves-souris avant et après construction dans le but d'évaluer les gains obtenus par les mesures d'atténuation et de compensation. Ce type d'étude permettra de comprendre si les mesures employées sont pleinement efficaces ou non pour évaluer la non-perte nette demandée par la réglementation.

### Évaluation des ouvrages dédiés

Au total, quatre chiroptérodes ont été étudiés dont un expérimental. Dans nos études, l'évaluation de l'efficacité de cette mesure de réduction s'est réalisée en deux temps : acoustique (quantification du nombre de franchissements de chauves-souris) et visuel (évaluation des hauteurs de vol).

Concernant la capacité de ces ouvrages à faire franchir plus de chauves-souris, nos résultats suggèrent que les chiroptérodes doivent être implantés dans des corridors écologiques préalablement identifiés et ont une meilleure fonctionnalité lorsqu'ils sont placés dans des corridors écologiques fins tels que des haies. Des études complémentaires sont ainsi à mener dans les corridors larges tels que les boisements afin de réduire les impacts résiduels.

Enfin, concernant la capacité de ces ouvrages à faire surélever la hauteur de vol des chauves-souris, au travers d'un site expérimental, l'ouvrage a réduit le nombre de traversées de chauves-souris à risque de collision de 20 % à 1 %. Néanmoins, comme suggéré par SOŁOWCZUK [2019], l'efficacité des passages supérieurs pour chauves-souris dépendent de facteurs généraux et des principaux déterminants. En effet, notre site d'étude était situé dans une zone agricole, paysage dominé par l'agriculture intensive, avec des accotements au-dessus de la route (1,7 m en moyenne) et clôtures de 2 m. Dans ce contexte, les chauves-souris longent les haies - elles-mêmes sur les talus - et sont enclines à voler haut au-dessus de la route et probablement moins à risque de collision (ici, 80 % des trajectoires de vol des chauves-souris étaient dans la zone de sécurité avant l'installation du viaduc des chauves-souris). Nous préconisons alors de confirmer ces résultats par d'autres études dans différents contextes.

### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARRÉ K., LE VIOL I., JULLIARD R., PAUWELS J., NEWSON S.E., JULIEN J.-F., CLAIREAU F., KERBIRIOU C., BAS Y., 2019. - Accounting for automated identification errors in acoustic surveys. *Methods Ecol. Evol.* 10, 1171-1188. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13198>
- BERTHINUSSEN A., 2013. - *The effect of roads on bats in the UK : a model for evidence based conservation*. University of Leeds, 161p.
- BERTHINUSSEN A., ALTRINGHAM J., 2012A. - The effect of a major road on bat activity and diversity: Effect of a major road on bat activity. *J. Appl. Ecol.* 49, 82-89. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02068.x>
- BERTHINUSSEN A., ALTRINGHAM J., 2012B. - Do Bat Gantries and Underpasses Help Bats Cross Roads Safely? *PLOS ONE* 7, e38775. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038775>
- BIGARD C., PIOCH S., THOMPSON J.D., 2017. - The inclusion of biodiversity in environmental impact assessment: Policy-related progress limited by gaps and semantic confusion. *J. Environ. Manage.* 200, 35-45. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.057>
- CLAIREAU F., 2018. - *Évaluation des impacts de la fragmentation du paysage par une autoroute sur les chauves-souris à différentes échelles spatio-temporelles*. Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, France.
- CLAIREAU F., BAS Y., JULIEN J.-F., MACHON N., ALLEGRIANI B., PUECHMAILLE S.J., KERBIRIOU C., 2019A. - Bat overpasses as an alternative solution to restore habitat connectivity in the context of road requalification. *Ecol. Eng.* 131, 34-38. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.02.011>
- CLAIREAU F., BAS Y., PUECHMAILLE S.J., JULIEN J., ALLEGRIANI B., KERBIRIOU C., 2019B. - Bat overpasses: An insufficient solution to restore habitat connectivity across roads. *J. Appl. Ecol.* 56, 573-584. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13288>
- CLAIREAU F., KERBIRIOU C., CHARTON F., BRAGA C.D.A., FERAILLE T., JULIEN J.-F., MACHON N., ALLEGRIANI B., PUECHMAILLE S.J., BAS Y., 2021. - Bat Overpasses Help Bats to Cross Roads Safely by Increasing Their Flight Height. *Acta Chiropterologica* 23(1) : 189-198. <https://doi.org/10.3161/15081109ACC2021.23.1.015>
- CLARK R.W., BROWN W.S., STECHERT R., ZAMUDIO K.R., 2010. - Roads, Interrupted Dispersal, and Genetic Diversity in Timber Rattlesnakes: Roads and Population Genetics. *Conserv. Biol.* 24 : 1059-1069. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01439.x>
- CUSHMAN S.A., 2006. - Effects of habitat loss and fragmentation on amphibians: A review and prospectus. *Biol. Conserv.* 128 : 231-240. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.09.031>
- FISCHER J., LINDENMAYER D.B., 2007. - Landscape modification and habitat fragmentation: a synthesis. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 16 : 265-280.
- FORMAN R.T.T., 2000. - Estimate of the Area Affected Ecologically by the Road System in the United States. *Conserv. Biol.* 14 : 31-35. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.99299.x>
- FORMAN R.T.T., ALEXANDER L.E., 1998. - Roads and their major ecological effects. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 29 : 207-231. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.29.1.207>
- FORMAN R.T.T., DEBLINGER R.D., 2000. - The Ecological Road-Effect Zone of a Massachusetts (U.S.A.) Suburban Highway. *Conserv. Biol.* 14 : 36-46. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.99088.x>
- FROIDEVAUX J.S.P., BOUGHEY K.L., BARLOW K.E., JONES G., 2017. - Factors driving population recovery of the greater horseshoe bat (*Rhinolophus ferrumequinum*) in the UK: implications for conservation. *Biodivers. Conserv.* 26 :

- 1601-1621. <https://doi.org/10.1007/s10531-017-1320-1>
- HARTL G.B., ZACHOS F.E., NADLINGER K., RATKIEWICZ M., KLEIN F., LANG G., 2005. - Allozyme and mitochondrial DNA analysis of French red deer (*Cervus elaphus*) populations: genetic structure and its implications for management and conservation. *Mamm. Biol. - Z. Für Säugetierkd.* 70 : 24-34.  
<https://doi.org/10.1078/1616-5047-00173>
- KELLER I., LARGIADER C.R., 2003. - Recent habitat fragmentation caused by major roads leads to reduction of gene flow and loss of genetic variability in ground beetles. *Proc. R. Soc. B: Biol. Sci.* 270, 417-423.  
<https://doi.org/10.1098/rspb.2002.2247>
- KITZES J., MERENLENDER A., 2014. - Large Roads Reduce Bat Activity across Multiple Species. *PLOS ONE* 9, e96341.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0096341>
- KRAUSS J., BOMMARCO R., GUARDIOLA M., HEIKKINEN R.K., HELM A., KUUSAAARI M., LINDBORG R., ÖCKINGER E., PÄRTEL M., PINO J., PÖYRY J., RAATIKAINEN K.M., SANG A., STEFANESCU C., TEDER T., ZOBEL M., STEFFAN-DEWENTER I., 2010. - Habitat fragmentation causes immediate and time-delayed biodiversity loss at different trophic levels: Immediate and time-delayed biodiversity loss. *Ecol. Lett.* 13 : 597-605.  
<https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01457.x>
- MAXWELL S.L., FULLER R.A., BROOKS T.M., WATSON J.E.M., 2016. - Biodiversity The ravages of guns, nets and bulldozers. *Nature* 536 : 143-145.  
<https://doi.org/10.1038/536143a>
- MØLLER J.D., DEKKER J., BAAGØE H.J., GARIN I., ALBERDI A., CHRISTENSEN M., ELMEROS M., 2016. - Effectiveness of mitigating measures for bats - a review. CEDR Transnational Road Research Programme.
- PUECHMAILLE S., MATHY G., PETIT E., 2005. - Characterization of 14 polymorphic microsatellite loci for the lesser horseshoe bat, *Rhinolophus hipposideros* (Rhinolophidae, Chiroptera). *Mol. Ecol. Notes* 5 : 941-944.  
<https://doi.org/10.1111/j.1471-8286.2005.01123.x>
- QUINN J.F., HARRISON S.P., 1988. - Effects of habitat fragmentation and isolation on species richness: evidence from biogeographic patterns. *Oecologia* 75 : 132-140.
- RAMIREZ M.G., HAAKONSEN K.E., 1999. - Gene flow among habitat patches on a fragmented landscape in the spider *Argiope trifasciata* (Araneae: Araneidae). *Heredity* 83 : 580.
- SAUNDERS D.A., HOBBS R.J., MARGULES C.R., 1991. - Biological Consequences of Ecosystem Fragmentation: A Review. *Conserv. Biol.* 5 : 18-32.  
<https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.1991.tb00384.x>
- SOŁOWCZUK A., 2019. - Determinants of the Performance of Bat Gantries Installed to Carry Bat Commuting Routes over the S3 Expressway in Poland. *Symmetry* 11 : 1022.  
<https://doi.org/10.3390/sym11081022>
- TROMBULAK S.C., FRISSELL C.A., 2000. - Review of Ecological Effects of Roads on Terrestrial and Aquatic Communities. *Conserv. Biol.* 14 : 18-30.  
<https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.99084.x>
- ZARZOSO-LACOSTE D., JAN P.-L., LEHNEN L., GIRARD T., BESNARD A.-L., PUECHMAILLE S.J., PETIT E.J., 2018. - Combining noninvasive genetics and a new mammalian sex-linked marker provides new tools to investigate population size, structure and individual behaviour: An application to bats. *Mol. Ecol. Resour.* 18 : 217-228.  
<https://doi.org/10.1111/1755-0998.12727>

