

Transparence écologique des ouvrages d'art de la LGV Paris-Bordeaux pour les chauves-souris : résultats de cinq années d'études.

Par **Ondine FILIPPI-CODACCIONI** (seise.ofc@gmail.com), **Moea LARTIGAU**, **Pascal TARTARY**, **Emilien JOMAT**, **Anthony LE NOZAHIC**, **Yoann PRIOUL**, **Alice CHÉRON**, **Natacha GRIFFAUT**



Résumé

Le suivi pendant 5 ans d'ouvrages d'art pour l'étude de la transparence écologique de ceux-ci vis à vis des chauves-souris dans le cadre de la mise en service de la LGV Tours-Bordeaux a été mis en place par des associations de protection de la nature et coordonnées par Poitou-Charente Nature. L'étude des données récoltées visait à distinguer s'il existait des différences d'activité ou de richesses spécifiques entre les différents ouvrages d'art à partir d'un échantillonnage adapté, d'identifier et quantifier les variations de ces variables d'intérêt selon les différentes dimensions (section, largeur, longueur) des ouvrages au sein d'un même type (buses, dalots, cadres, portiques, voûtes), et enfin, de déterminer s'il existait un « effet ligne » sur l'activité chiroptérologique dans les ouvrages. Les résultats montrent que presque toutes les espèces utilisent les ouvrages inférieurs, que certaines espèces peuvent traverser tous les types

d'ouvrages comme le Petit rhinolophe et les Oreillard et qu'inversement, les petits ouvrages ne sont utilisés par quelques unes, que les ouvrages aux plus grandes dimensions telles que les voûtes favorisent la fréquentation (estimation via l'activité enregistrée) mais aussi la richesse spécifique. On note que de nouveaux comportements sont apparus après la mise en circulation du TGV. L'effet mise en service semble drastique sur la baisse de fréquentation des abords de l'infrastructure, seules quelques espèces semblent s'y adapter (Grand rhinolophe et Oreillards, qui se contraignent à passer dans des ouvrages plus petits).

Introduction

Les changements d'utilisation des sols sont d'importants facteurs agissant sur la perte de biodiversité dans le monde (MEA, 2005). Les infrastructures linéaires comme les routes et les voies de chemin de fer jouent un rôle particulier dans ce processus et se sont multipliées sur de larges territoires associés au développement de la population humaine (WATTS *et al.*, 2007). Elles sont connues pour avoir un impact négatif sur les espèces et les dynamiques des écosystèmes en modifiant la structure du paysage via l'artificialisation, les changements d'habitats, la dégradation et la fragmentation (TROMBULAK & FRISSEL, 2000). Ceci a pour effet d'affecter la richesse des communautés, leur composition et les interactions entre espèces (FAHRIG, 2003). Les infrastructures linéaires peuvent représenter des barrières à la connectivité (JACKSON & FAHRIG, 2011) et avoir d'importants impacts sur les populations (FAHRIG & RYTWINSKI, 2009). Elles sont aussi connues pour faciliter l'expansion des espèces invasives en tant

que corridors (BROWN *et al.* 2006).

Une des principales manières dont les routes et les voies de chemin de fer peuvent impacter la capacité des animaux à survivre et à se reproduire avec succès réside dans l'empêchement des mouvements entre des ressources limitées (CLARK *et al.*, 2010). Les mouvements des individus ont une importance capitale pour la persistance des populations dans des paysages fragmentés parce qu'ils permettent l'utilisation en routine de différents habitats au sein de leurs domaines vitaux et la circulation des gènes au sein des populations.

Les chauves-souris sont des modèles d'étude intéressants par rapport à d'autres mammifères car elles en diffèrent par bien des aspects dont leur faible taux de reproduction, leur longue espérance de vie et leur grande mobilité (RACEY & ENTWISTLE, 2000). Les populations avec de tels traits d'histoire de vie sont généralement vulnérables à la fragmentation de leurs habitats et à la mortalité associée aux routes (FAHRIG & RYTWINSKI, 2009). De plus, le besoin de ressources d'habitats dispersées dans le paysage pour des besoins écologiques différents (se nourrir, se reproduire, établir la colonie) amène inévitablement les chauves-souris en contact avec les réseaux humains de transport (ABBOTT *et al.*, 2012).

Malgré la richesse en littérature grise et en guides sur les aménagements en rapport avec les chauves-souris et les routes en Europe (BICKMORE, 2003 ; HIGHWAYS AGENCY UK, 2011 ; LIMPENS *et al.*, 2005 ; NATIONAL ROADS AUTHORITY, 2006 ; SÉTRA, 2008), il y a peu de recherches empiriques sur l'impact des routes et encore moins des chemins de fer sur ces animaux. La mortalité des chiroptères a été documentée dans quelques études, de même que l'impact sur l'activité de chasse et sur l'effet du bruit

du trafic sur l'efficacité de leur recherche en nourriture. Peu d'études ont recherché l'impact sur les mouvements au sein des paysages (BACH et al., 2004 ; BOONMAN, 2011 ; KERTH & MELBER, 2009 ; RUSSELL et al., 2008). L'autoroute A20 dans le sud de la Corrèze, semble aussi être une barrière pour le Rhinolophe euryale (BARATAUD et al., 2012). KERTH & MERBER (2009) ont trouvé qu'une autoroute en Allemagne formait une nette barrière au mouvement d'une espèce forestière adaptée aux environnements encombrés, le Murin de Bechstein, qui ne passait pas par-dessus l'autoroute et traversait rarement les passages sous voies, entraînant ainsi des restrictions d'habitats pour la chasse et d'habitats pour les gîtes. En contraste, la Barbastelle d'Europe, espèce adaptée aussi bien à des milieux ouverts (KERTH &

MELBER, 2009) qu'à des lisières forestières, volait de façon régulière au-dessus de la même autoroute entre les habitats ressources qu'elle utilisait. Ces différences furent attribuées à leurs différentes capacités de vol reflétant leurs écologies trophiques. Des conclusions similaires lors d'expériences visant à évaluer la traversée de passages de dimensions différentes sous voies, de plusieurs espèces furent émises (ABBOT et al., 2011). Seuls le Petit rhinolophe, le Murin de Natterer et l'Oreillard roux traversaient les ouvrages étroits de types buses. Toutes les autres espèces (Pipistrelle commune, Pipistrelle pygmée) avaient traversé via le passage large.

Contexte de l'étude

Notre étude se passe dans le contexte de la construction de la Ligne à Grande Vitesse Sud Europe Atlantique (LGV SEA) reliant Tours à Bordeaux (Figure 1).

Dans ce cadre, et en application des arrêtés ministériels et inter-préfectoraux des 24 février et 21 décembre 2012, portant dérogation à l'interdiction de destruction d'espèces et d'habitats d'espèces animales protégées et de destruction d'espèces végétales protégées, le maître d'ouvrage est tenu d'assurer le suivi des mesures environnementales mises en œuvre, ainsi que le suivi des populations et des habitats d'espèces protégées impactées.

Plus spécifiquement, les articles 14.3 et 23 des arrêtés cités prévoient un suivi afin de démontrer la fonctionnalité des ouvrages installés :

« Un suivi devra être appliqué par le pétitionnaire pour démontrer la fonctionnalité des ouvrages installés. [...] En particulier, un suivi de la fonctionnalité des ouvrages de transparence écologique devra être réalisé. Celui-ci devra être réalisé

Figure 1 : Localisation de la LGV Sud Europe Atlantique (Photo : <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5874843>)



tous les ans en phase de construction et pendant les 3 premières années suivant la mise en service de la ligne. Il sera ensuite réalisé tous les cinq ans. »

Le suivi de la transparence des ouvrages pour les chiroptères s'inscrit dans ce contexte réglementaire et fait partie intégrante des propositions formulées dans le cadre de la note méthodologique rédigée par l'ensemble des partenaires inter-régionaux et intitulée «Propositions de suivi des mesures environnementales liées à la construction et à l'exploitation de la LGV-SEA Tours-Bordeaux» (LPO, 2015).

Les objectifs généraux du suivi consistent à mesurer l'efficacité des ouvrages en tant qu'ouvrages de transparence pour les chiroptères en évaluant l'activité chiroptérologique et la richesse spécifique au sein des ouvrages.

Le suivi et l'analyse qui en découlent visent également les objectifs suivants :

- distinguer s'il existe des différences d'activité ou de richesses spécifiques chiroptérologiques entre les différents ouvrages d'art à partir d'un échantillonnage adapté, de la prise en compte de variables environnementales pertinentes et de la mise en service de la ligne ;
- identifier et quantifier les variations de ces variables d'intérêt selon les différentes dimensions (section, largeur, longueur) des ouvrages au sein d'un même type (buses, dalots, cadres, portiques, voûtes) si l'échantillonnage le permet ;
- déterminer s'il existe un « effet ligne » sur l'activité chiroptérologique dans les ouvrages.

Les hypothèses de travail sont les suivantes :

- les ouvrages de transparence mis en place le long de la ligne constituent un des modes de franchissement de

l'infrastructure par les Chiroptères ;

- les typologies d'ouvrage et leur localisation influent sur les capacités de franchissement de l'infrastructure par les Chiroptères ;
- les capacités de franchissement peuvent varier selon les espèces.

Afin de répondre aux objectifs fixés, un protocole spécifique a été élaboré et mis en place à l'échelle des 6 départements impactés par la ligne SEA. L'année 2017 constitue l'année pendant laquelle la mise en service de la ligne a eu lieu (juillet 2017). **Enfin, après les analyses de 2015, 2016, 2017 et 2018, une cinquième analyse vient s'ajouter en 2019. Grâce à la mise en service de la LGV SEA (courant 2017), une comparaison avant/après de l'activité et de la richesse en chiroptères dans les ouvrages a pu être menée, notamment en prenant toutes les années ensemble.**

Poitou-Charentes Nature a assuré la coordination du suivi. La mise en œuvre du protocole sur le terrain a été réalisée par les 6 associations départementales concernées, à savoir : la LPO Touraine, Vienne Nature, Deux-Sèvres Nature Environnement, Charente Nature, Nature Environnement 17 et le Conservatoire d'espaces naturels d'Aquitaine.

Dans le cadre de cette étude et du protocole prévu, la Société SEISE a analysé statistiquement les données récoltées.

Matériel et méthode

Le protocole pour la description des données

Le protocole vise, grâce à un échantillonnage adapté et à la prise en compte de variables environnementales pertinentes à répondre à une question

Tableau 1 :

Répartition des ouvrages d'art en fonction des départements.

| Type Ouvrage | Indre et Loire | Vienne | Deux Sèvres | Charente | Charente Maritime | Gironde | Total |
|--------------|----------------|--------|-------------|----------|-------------------|---------|-------|
| Buse | | | | | 1 | | 1 |
| Cadre | 2 | 2 | | 1 | 1 | 1 | 7 |
| Dalot | | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 6 |
| Portique | | | | | 1 | | 1 |
| Voûte | 1 | 1 | | 1 | 2 | 1 | 6 |
| Total | 3 | 4 | 1 | 4 | 6 | 3 | 21 |

globale sur la fonctionnalité des ouvrages de transparence écologique sur la LGV SEA.

Un des premiers buts de l'analyse est de distinguer s'il existe des différences d'activité ou de richesse spécifique chiroptérologique entre les différents ouvrages d'art. Un deuxième objectif est d'identifier et de quantifier la différence de ces variables selon les différentes mensurations des ouvrages au sein d'un même type, si l'échantillonnage le permet. Pour se faire, il a été choisi de placer des enregistreurs à ultrason de type D500 (Pettersson) dans les ouvrages afin d'enregistrer l'activité des chauves-souris. Cette variable sert usuellement d'indicateur d'abondance car quantifier le nombre de chauves-souris est impossible. Des ouvrages ont été choisis le long du tracé de la LGV pour être échantillonnés et le travail a été réparti au sein de différentes structures : Vienne Nature, Deux-Sèvres Nature Environnement, Charente Nature et Nature Environnement 17, pour les ouvrages du Poitou-Charentes, la LPO Touraine pour les ouvrages situés en Indre-et-Loire, et le Conservatoire d'Espaces naturels d'Aquitaine pour les ouvrages de Gironde.

L'échantillonnage se compose de :

- 1 buse (petit canal cylindrique servant à l'écoulement des eaux) ;
- 6 dalots (petit canal dallé rectangulaire servant à l'écoulement des eaux) ;
- 7 cadres (armature pour béton armé de forme rectangulaire) ;
- 1 portique (galerie couverte dont les voûtes ou les plafonds sont supportés par des colonnes, des piliers ou des arcades soutenues par deux rangées de colonnes, ou par un mur et une rangée de colonnes) ;
- 6 voûtes avec la répartition indiquée dans le **Tableau 1**.

Les ouvrages étudiés n'ont pas changé entre 2015 et 2019.

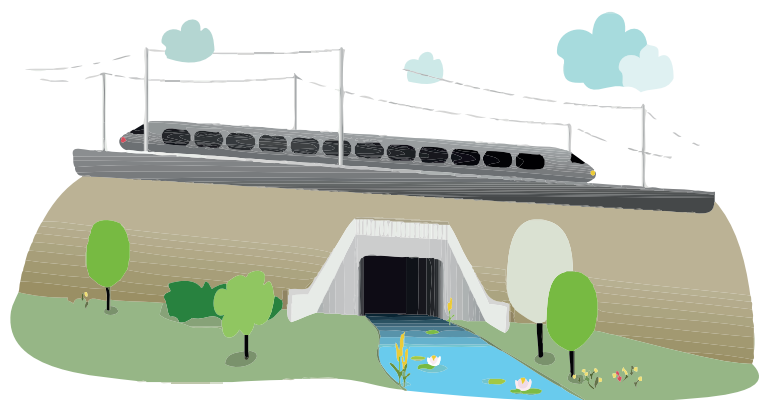


Figure 2.
Schéma d'un dalot (LGV SEA)

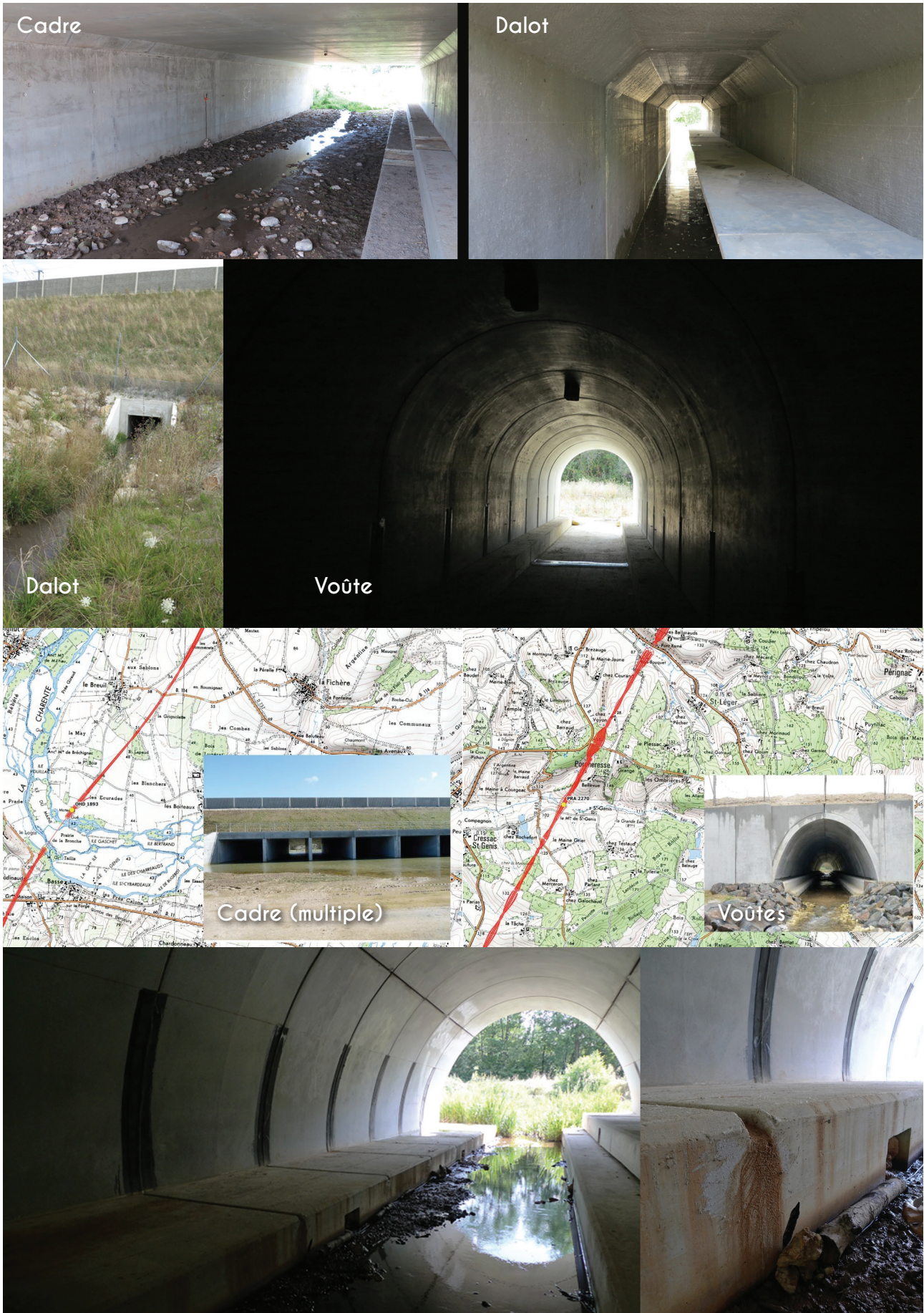


Figure 3.
Ouvrages d'art échantillonnés pour les Chiroptères sur la LGV SEA

Les données

Les variables environnementales sont recueillies par Poitou-Charentes Nature et ses associations-membres (Vienne Nature, Deux-Sèvres Nature Environnement, Charente Nature et Nature Environnement 17), ainsi que par le CEN Aquitaine et la LPO Touraine avec la même répartition que ci-dessus.

Elles sont:

- le lieu de l'enregistrement (PK, département, coordonnées XY) ;
- la date de début et de fin de l'enregistrement ;
- la durée de l'enregistrement ;
- la température de la nuit de l'enregistrement (°C) ;
- la vitesse du vent de la nuit de l'enregistrement (km/h) ;
- la pluviométrie de la nuit de l'enregistrement (mm) ;
- la phase de la lune la nuit de l'enregistrement (Dernier quartier, Gibbeuse croissante, Gibbeuse décroissante, Pleine lune, Premier quartier) ;
- la visibilité de la lune la nuit de l'enregistrement (%) ;
- l'heure de lever de la lune de la nuit de l'enregistrement ;
- l'heure de coucher de la lune de la nuit de l'enregistrement ;
- la durée de présence de l'éclairage lunaire de la nuit de l'enregistrement ;
- les habitats dans un rayon de 200m autour des ouvrages, selon la nomenclature VigieChiro ;
- les habitats dans un rayon de 1 km autour des ouvrages sur la base du CorineLandCover (%) ;
- le % de recouvrement en végétation en aval et en amont de l'ouvrage ;
- l'absence ou la présence d'un écoulement d'eau au niveau de l'ouvrage ;

- une description des rives gauches et droites (berges naturelles réaménagées, banquettes faune, banquettes piéton, rien).

Analyse statistique

Des modèles statistiques de type GLM (Generalized Linear Models) prenant en compte le maximum de variables confondantes peuvent être utilisés malgré la faiblesse de l'échantillonnage (faible nombre de réplicats par types d'ouvrage). Un test d'anova sera fait à la suite de ces modèles afin d'attribuer les différences d'activité à la variabilité de types d'ouvrages plutôt qu'à des variables environnementales qui jouent sur l'activité des chauves-souris ou leur diversité.

Les ouvrages d'art de type buse et portique qui ne possèdent qu'un seul réplicat (n=1) ont été regroupés avec d'autres types d'ouvrages proches :

- le portique a été pris en compte avec les cadres ;
- la buse a été prise en compte avec les dalots.

De sorte que trois sortes d'ouvrages sont testés : la voûte (n=6), le dalot (n=7), le cadre (8).

La base de chaque modèle est un comptage (activité en nombre de contacts ou richesse en nombre d'espèces) par nuit, afin de pouvoir y relier les variables météorologiques relevées chaque nuit d'enregistrement et qui sont connues pour faire varier l'activité chiroptérologique (température, vent, pluie, visibilité lune, durée lune, etc.). La variable numéro de session a été préférée à la variable «date de la nuit» car cette dernière variable covarie avec les variables météorologiques et que cette première a un intérêt écologique supérieur puisqu'elle englobe l'information «saison». En effet la première session a eu normalement lieu en juin, pendant la mise

Tableau 2 :

Mensurations des ouvrages d'art (Moyenne, Minimum-Maximum)

| Type Ouvrage | Moy de Section_L | Min -Max l | Moy de Hauteur_H | Min -Max H | Moy de Longueur_L | Min -Max L |
|--------------|------------------|------------|------------------|------------|-------------------|------------|
| Buse | 2,00 | 2-2 | 2,00 | 2-2 | 52,00 | 52-52 |
| Cadre | 5,57 | 3-12 | 3,87 | 2-7 | 43,71 | 15-104 |
| Dalot | 1,90 | 1-2,5 | 2,01 | 1,5-2,5 | 48,00 | 12-90 |
| Portique | 12,00 | 12-12 | 4,00 | 4-4 | 31,00 | 31-31 |
| Voute | 6,15 | 3-10,6 | 5,08 | 3,1-7,9 | 52,83 | 29-89 |

bas, la deuxième session en juillet/août pendant l'élevage/envol des jeunes et la dernière en septembre pendant le transit automnal/migration/swarming.

Le modèle de type GLM pour tester l'effet du type d'ouvrage :

Activité (nb de contacts/nuit) ~ Session + Durée_enregistrement + Température + Vent + Pluie + Visibilité lune + Durée lune + Ecoulement + végétation amont + habitat_principal + X + Y+ **Type_ouvrage**)

Le modèle de type GLM pour tester l'effet mise en service :

Activité (nb de contacts/nuit) ~ Session + Durée_enregistrement + Température + Vent + Pluie + Visibilité lune + Durée lune + Ecoulement + végétation amont + habitat_principal + X + Y+ Type_ouvrage + **année**)

Les variables recouvrement de végétation en amont et en aval étaient hautement corrélées aussi a-t-on seulement gardé recouvrement en amont, arbitrairement.

Sur ces 2 types de modèle, la variable d'intérêt testée ne sera pas que l'activité globale des chauves-souris mais aussi la richesse spécifique des communautés identifiées ainsi que l'activité spécifique des Rhinolophidés au sonar de portée faible, censés être plus sensibles aux discontinuités paysagères telles qu'une ligne à grande vitesse.

En résumé, nous chercherons à répondre aux questions suivantes :

- l'activité chiroptérologique est-elle différente selon les types d'ouvrage ?
- l'activité chiroptérologique varie-t-elle selon les dimensions des ouvrages ?
- le nombre d'espèces traversant les ouvrages varie-t-il en fonction du type d'ouvrage ?
- le nombre d'espèces traversant les ouvrages varie-t-il en fonction des dimensions des ouvrages ?
- les Rhinolophidés, qui sont les espèces les plus à risque quant aux ruptures de continuités écologique compte tenu de la faible portée de leurs émissions ultrasonores, traversent-ils plus certains types d'ouvrages que d'autres ?
- la mise en service de la ligne a-t-elle eu un effet sur l'activité chiroptérologique globale ?
- la mise en service de la ligne a-t-elle eu un effet différencié sur l'activité chiroptérologique selon les ouvrages ? Autrement dit, certains ouvrages sont-ils plus transparents que d'autres lors de la mise en service ?

En 2019, nous disposons désormais de 5 ans de suivi avec 2,5 ans avant et 2,5 ans après mise en service en juillet 2017.

Résultats

Résultats descriptifs

Chaque année entre 2015 et 2019, une vingtaine d'espèces ont été déterminées de façon certaine. Des indéterminations portaient sur : le groupe des Murins, le groupe des Pipistrelles, celui des Sérotines/Noctules et le groupe des Oreillards ; la détermination se limitait alors au niveau du genre (sp.) ou de paires d'espèces, en lien avec les connaissances actuelles (en général, et des auteurs en particulier) en identification acoustique.

Sur les cinq années, l'espèce la plus fréquemment contactée est la Pipistrelle commune puis la Pipistrelle de Kuhl et le Murin de Daubenton, espèce spécialiste

de la chasse de proie aquatique (macro-invertébrés de surface et petits poissons) qui gîte souvent sous les ponts. Ce trio se retrouve en tête sur les trois premières années de suivi ; puis suivent les murins indéterminés et le Petit rhinolophe en 2018 et 2019 dénotant potentiellement des changements de comportement après la mise en service de la ligne.

Les Oreillards gris et roux, font partie des espèces ayant rarement été enregistrées dans les ouvrages, globalement sur les 5 années de suivi (**Tableau 3**). On compte cependant de 22 à 88 contacts chaque année.

Le Grand murin, grande espèce inscrite à l'Annexe II de la DHFF a été enregistré en Vienne, Charente et Touraine en 2019 ;



Figure 4 :
En haut à gauche Grand murin (*Myotis myotis*), à droite Noctule de Leisler (*Nyctalus leisleri*)
En bas à gauche Murin de Daubenton (*Myotis daubentonii*), à droite Petit rhinolophe (*Rhinolophus hipposideros*).

en Vienne, Aquitaine, Charente, Charente-Maritime et Touraine en 2018 ; en Vienne, Touraine, Charente et Charente-Maritime en 2017 ; en Vienne et Touraine en 2016 ; traversant des ouvrages de type cadre et voûte et ce, sur plusieurs sessions pour un même ouvrage (juin-août-septembre, juillet-août-septembre, etc.), ce qui était similaire en 2015. La voûte à Longue plaine en Touraine, semble particulièrement utilisée, il est probable qu'une colonie en soit proche car cette utilisation prononcée est inchangée sur les 5 années. Une activité particulièrement importante est à noter en 2019 sur un ouvrage de type cadre en Touraine, celui du réveillon, notamment sur septembre.

Le Minioptère de Schreibers, inscrit à l'Annexe II de la DHFF, a été assez peu contacté sur ce suivi.

Le Petit rhinolophe a été enregistré dans tous les types d'ouvrage (buse, dalot, cadre, voûte). Il est le seul à fréquenter les plus petits ouvrages (buses et dalots), sauf à partir de 2018) où Oreillard et Grand rhinolophe sont notés dans les buses (**Tableau 4**).

Les petits ouvrages de type dalots servent de passage à au moins 14 espèces (**Tableau 4**) dont deux d'assez grande taille, le Grand rhinolophe et la Sérotine commune.

Les espèces de haut vol (Noctule commune et Noctule de Leisler) ont été enregistrées chaque année. Ces espèces de plein ciel ou de lisières ouvertes ont une morphologie alaire mal adaptée aux conduits et espaces étroits. Les sonars de ces espèces sont suffisamment puissants pour être détectés depuis l'intérieur des ouvrages sans toutefois que les individus soient passés dedans, comme en témoigne la structure QFC ou FM aplanie des signaux récoltés. C'est pourquoi, dans

le doute, nous n'avons pas retenu ces espèces et leurs contacts dans les analyses suivantes.

Cette étude confirme également le fait que des espèces forestières telles que le Murin de Bechstein et le Murin d'Alcathoé empruntent les passages inférieurs dont 4 différents de types voûte, cadre, portique et dalot d'une section minimale de 3 x 3,1 m, et ce au cours des 3 périodes et dans des contextes paysagers divers (milieu agricole de prairie non cultivée, jeune forêt de conifères, forêt de feuillus, milieu urbain ; **Tableau 4**).

Dans notre étude, un Murin de Natterer est passé dans un dalot de 2,4 x 2,4 X 90 m ainsi que dans un cadre de 3 x 2,5 x 37 m, pour les plus petites dimensions.

Résultats analytiques

Effet du type d'ouvrage sur l'activité chiroptérologique

L'activité chiroptérologique est significativement différente entre les trois types d'ouvrages étudiés (dalots, voûtes, cadres), et ce quel que soit la période, la température extérieure, la vitesse du vent, la pluviométrie, la période de l'année, la visibilité de la lune (%), la durée de présence de la lune, l'habitat principal environnant, la présence d'eau ou non sous l'ouvrage (écoulement) et le lieu où a été fait l'enregistrement (coordonnées de l'ouvrage) (**Tableau 5**).

Un test post-hoc de TukeyHSD a permis de mettre en valeur les différences d'activité deux à deux entre ces trois types d'ouvrages (**Tableau 6, Figures 2 et 3**). Rappelons que cadres et portiques ont été regroupés ainsi que la buse et les dalots en raison de leur faible nombre de représentants dans l'échantillonnage. Il y a plus d'activité dans les voûtes que dans

Tableau 3 :

Nombre de contacts bruts enregistrés par espèce et par période sur l'ensemble des enregistrements de 2015 à 2019 (les espèces indéterminées ont été retirées sauf les Oreillards, les Murins et les Pipistrelles de Kuhl/Nathusius).

| Années | Espèces 2015-2019 | Période 1 | Période 2 | Période 3 | Total | Espèces 2015-2019 | Période 1 | Période 2 | Période 3 | Total |
|--------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-------|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-------|
| 2015 | Pipistrelle commune | 4082 | 4816 | 4658 | 13556 | Murin d'Alcathoé | 18 | 1 | 17 | 36 |
| 2016 | | 9471 | 15471 | 4906 | 29847 | | 22 | 45 | 11 | 78 |
| 2017 | | 15525 | 11624 | 5019 | 32269 | | | | - | - |
| 2018 | | 14100 | 6702 | 8391 | 20193 | | 15 | 11 | 14 | 40 |
| 2019 | | 13124 | 13703 | 8978 | 35805 | | 3J | 29 | 25 | 84 |
| 2015 | Pipistrelle de Kuhl | 120 | 11 | 54 | 185 | Murin à oreilles échancrées | 59 | 74 | 37 | 170 |
| 2016 | | 65 | 258 | 989 | 1312 | | 18 | 40 | 107 | 165 |
| 2017 | | 432 | 715 | 454 | 1601 | | 18 | 21 | 18 | 57 |
| 2018 | | 752 | 420 | 5012 | 6194 | | 14 | 12 | 20 | 46 |
| 2019 | | 2081 | 1300 | 2602 | 5983 | | 31 | 54 | 129 | 224 |
| 2015 | Murin de Daubenton | 836 | 287 | 1114 | 2237 | Minoptère de Schreibers | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 2016 | | 690 | 243 | 274 | 1207 | | 12 | 7 | 4 | 23 |
| 2017 | | 285 | 242 | 410 | 938 | | 16 | 23 | 10 | 49 |
| 2018 | | 258 | 117 | 192 | 567 | | 39 | 16 | 8 | 63 |
| 2019 | | 323 | 199 | 277 | 799 | | 10 | 21 | 1 | 32 |
| 2015 | Murin à moustaches | 155 | 257 | 93 | 516 | Grand rhinolophe | 8 | 11 | 5 | 25 |
| 2016 | | 156 | 26J | 454 | 909 | | 19 | 12 | 21 | 52 |
| 2017 | | 55 | 78 | 242 | 374 | | 14 | 14 | 13 | 41 |
| 2018 | | 32 | 40 | 106 | 178 | | 19 | 15 | 87 | 121 |
| 2019 | | 127 | 96 | 299 | 522 | | 24 | 30 | 90 | 144 |
| 2015 | Barbastelle d'Europe | 54 | 45 | 31 | 190 | Grand murin | 28 | 25 | 15 | 68 |
| 2016 | | 91 | 92 | 00 | 243 | | 23 | 22 | 37 | 82 |
| 2017 | | 205 | 63 | 66 | 335 | | 9 | 14 | 17 | 40 |
| 2018 | | 102 | 35 | 227 | 364 | | 9 | 18 | 18 | 45 |
| 2019 | | 54 | 115 | 127 | 296 | | 4 | 20 | 40 | 64 |
| 2015 | Petit rhinolophe | 53 | 39 | 33 | 115 | Pipistrelle de Nathusius | 4 | 0 | 0 | 4 |
| 2016 | | 48 | 66 | 90 | 204 | | 48 | 9 | 8 | 65 |
| 2017 | | 108 | 106 | 94 | 908 | | 15 | 14 | 0 | 29 |
| 2018 | | 198 | 108 | 222 | 528 | | 6 | 0 | 0 | 6 |
| 2019 | | 351 | 117 | 411 | 879 | | 147 | 86 | 25 | 258 |
| 2015 | Murin de Natterer | 53 | 13 | 18 | 84 | Murin de Bechstein | 7 | 0 | 3 | 10 |
| 2016 | | 44 | 79 | 28 | 151 | | 14 | 4 | 52 | 80 |
| 2017 | | 45 | 63 | 54 | 163 | | 4 | 6 | 17 | 27 |
| 2018 | | 55 | 31 | 43 | 139 | | 7 | 6 | 10 | 23 |
| 2019 | | 55 | 31 | 43 | 139 | | 10 | 36 | 59 | 105 |
| 2015 | Noctule commune | 13 | 84 | 9 | 106 | Sérotine commune | 42 | 4 | 2 | 48 |
| 2016 | | 15 | 1 | 5 | 22 | | 7 | 71 | 8 | 86 |
| 2017 | | 9 | 3 | 6 | 18 | | 7 | 4 | 3 | 14 |
| 2018 | | 31 | 8 | 106 | 145 | | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 2019 | | 56 | 3 | 23 | 121 | | 6 | 53 | 20I | 79 |
| 2015 | Pipistrelle pygmée | 1 | 0 | 0 | 1 | Oreillard gris | 2 | 4 | 0 | 6 |
| 2016 | | 3 | 15 | 2 | 20 | | 5 | 0 | 5 | 10 |
| 2017 | | 2 | 3 | 13 | 18 | | 0 | 1 | 8 | 9 |
| 2018 | | 2 | 9 | 20 | 31 | | 3 | 3 | 11 | 17 |
| 2019 | | 28 | 48 | 146 | 222 | | 1 | 0 | 12 | 13 |
| 2015 | Oreillard roux | 0 | 12 | 3 | 15 | Noctule de Leisler | 9 | 22 | 2 | 33 |
| 2016 | | 1 | 1 | 2 | 4 | | 6 | 3 | 1 | 10 |
| 2017 | | 0 | 6 | 1 | 7 | | 1 | 1 | 1 | 3 |
| 2018 | | 0 | 1 | 9 | 10 | | 1 | 0 | 2 | 3 |
| 2019 | | 3 | 1 | 7 | 11 | | 6 | 36 | 55 | 97 |
| 2015 | Oreillard indéterminé | 1 | 0 | 0 | 1 | Rhinolophe euryale | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 2016 | | 3 | 7 | 7 | 17 | | 1 | 0 | 2 | 3 |
| 2017 | | 8 | 0 | 18 | 26 | | 0 | 1 | 1 | 2 |
| 2018 | | 8 | 5 | 48 | 61 | | 0 | 1 | 1 | 2 |
| 2019 | | 0 | 8 | 28 | 26 | | - | - | - | - |
| 2015 | Murin indéterminé | 200 | 280 | 256 | 736 | Pipistrelle de Kuhl/Nathusius | 222 | 170 | 157 | 549 |
| 2016 | | 235 | 594 | 316 | 1146 | | 193 | 337 | 38 | 568 |
| 2017 | | 92 | 273 | 283 | 648 | | 5 | 1 | 1 | 7 |
| 2018 | | 389 | 513 | 1001 | 1903 | | 195 | 84 | 5 | 284 |
| 2019 | | 125 | 535 | 732 | 1393 | | 42 | 51 | 10 | 103 |

Tableau 4 :

Nombre de contacts bruts des espèces enregistrées dans les différents types d'ouvrages (nombre de contacts) de 2015 à 2019 (les espèces indéterminées ont été retirées sauf les oreillards, les murins et les Pipistrelles de Kuhl/Nathusius).

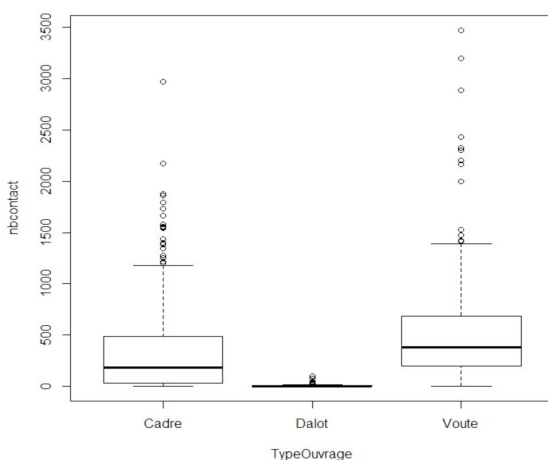
| Années | Espèces 2015-2019 | Buse | Cadre | Dalot | Portique | Voute | Espèces 2015-2019 | Buse | Cadre | Dalot | Portique | Voute |
|--------|-----------------------|------|-------|-------|----------|-------|-------------------------------|------|-------|-------|----------|-------|
| 2015 | Pipistrelle commune | 0 | 8954 | 6 | 179 | 4417 | Murin d'Alcathoé | 0 | 4 | 15 | 0 | 17 |
| 2016 | | 0 | 8568 | 237 | 5038 | 16004 | | 0 | 43 | 12 | 0 | 23 |
| 2017 | | 0 | 9084 | 58 | 2368 | 20759 | | 0 | 20 | 0 | 2 | 51 |
| 2018 | | 0 | 11394 | 6 | 1907 | 15886 | | 0 | 10 | 0 | 0 | 30 |
| 2019 | | 0 | 17504 | 91 | 956 | 17254 | | 0 | 39 | 0 | 0 | 45 |
| 2015 | Pipistrelle de Kuhl | 0 | 81 | 2 | 2 | 100 | Murin à oreilles échancrées | 0 | 137 | 2 | 0 | 31 |
| 2016 | | 0 | 211 | 11 | 6 | 1084 | | 0 | 117 | 1 | 0 | 47 |
| 2017 | | 0 | 48 | 41 | 36 | 1476 | | 0 | 25 | 4 | 2 | 26 |
| 2018 | | 0 | 308 | 6 | 31 | 5849 | | 0 | 29 | 0 | 0 | 17 |
| 2019 | | 0 | 1303 | 2 | 0 | 4678 | | 0 | 90 | 0 | 0 | 134 |
| 2015 | Murin de Daubenton | 0 | 2009 | 0 | 0 | 228 | Minoptère de Schreibers | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2016 | | 0 | 964 | 2 | 0 | 241 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2017 | | 0 | 630 | 0 | 3 | 305 | | 0 | 5 | 0 | 1 | 43 |
| 2018 | | 0 | 311 | 0 | 1 | 255 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 63 |
| 2019 | | 0 | 265 | 0 | 0 | 534 | | 0 | 5 | 0 | 0 | 27 |
| 2015 | Murin à moustaches | 0 | 197 | 0 | 0 | 319 | Grand rhinolophe | 0 | 2 | 0 | 0 | 23 |
| 2016 | | 0 | 288 | 0 | 0 | 621 | | 0 | 7 | 5 | 1 | 39 |
| 2017 | | 0 | 251 | 0 | 0 | 123 | | 0 | 10 | 1 | 3 | 27 |
| 2018 | | 0 | 52 | 0 | 0 | 126 | | 13 | 18 | 10 | 24 | 56 |
| 2019 | | 0 | 271 | 0 | 0 | 251 | | 27 | 47 | 4 | 1 | 65 |
| 2015 | Barbastelle d'Europe | 0 | 18 | 0 | 0 | 112 | Grand murin | 0 | 34 | 0 | 0 | 34 |
| 2016 | | 0 | 67 | 0 | 7 | 169 | | 0 | 12 | 0 | 0 | 70 |
| 2017 | | 0 | 41 | 2 | 3 | 290 | | 0 | 7 | 0 | 0 | 33 |
| 2018 | | 0 | 62 | 0 | 15 | 287 | | 0 | 3 | 0 | 2 | 40 |
| 2019 | | 0 | 141 | 0 | 4 | 151 | | 0 | 43 | 0 | 0 | 21 |
| 2015 | Petit rhinolophe | 9 | 28 | 13 | 0 | 75 | Pipistrelle de Nathusius | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| 2016 | | 1 | 48 | 38 | 20 | 97 | | 0 | 41 | 14 | 0 | 10 |
| 2017 | | 62 | 74 | 17 | 7 | 148 | | 0 | 16 | 0 | 4 | 9 |
| 2018 | | 78 | 84 | 101 | 17 | 248 | | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 |
| 2019 | | 72 | 199 | 53 | 74 | 481 | | 0 | 207 | 5 | 0 | 46 |
| 2015 | Murin de Natterer | 0 | 8 | 0 | 0 | 76 | Murin de Bechstein | 0 | 4 | 0 | 0 | 6 |
| 2016 | | 0 | 31 | 2 | 15 | 103 | | 0 | 70 | 0 | 0 | 10 |
| 2017 | | 0 | 13 | 5 | 28 | 117 | | 0 | 20 | 0 | 0 | 7 |
| 2018 | | 0 | 25 | 5 | 28 | 81 | | 0 | 6 | 0 | 0 | 17 |
| 2019 | | 0 | 65 | 0 | 1 | 183 | | 0 | 68 | 0 | 0 | 37 |
| 2015 | Noctule commune | 0 | 58 | 0 | 0 | 48 | Sérotine commune | 0 | 47 | 1 | 0 | 0 |
| 2016 | | 0 | 19 | 0 | 0 | 3 | | 0 | 49 | 34 | 0 | 3 |
| 2017 | | 0 | 16 | 0 | 0 | 2 | | 0 | 5 | 9 | 0 | 0 |
| 2018 | | 0 | 126 | 0 | 0 | 19 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 2019 | | 0 | 119 | 0 | 0 | 2 | | 0 | 72 | 3 | 0 | 4 |
| 2015 | Pipistrelle pygmée | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | Oreillard gris | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 |
| 2016 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | | 0 | 5 | 0 | 1 | 4 |
| 2017 | | 0 | 2 | 0 | 0 | 16 | | 0 | 1 | 0 | 1 | 7 |
| 2018 | | 0 | 1 | 0 | 0 | 30 | | 0 | 7 | 0 | 5 | 5 |
| 2019 | | 0 | 59 | 0 | 0 | 163 | | 0 | 5 | 0 | 0 | 8 |
| 2015 | Oreillard roux | 0 | 12 | 0 | 0 | 3 | Noctule de Leisler | 0 | 33 | 0 | 0 | 0 |
| 2016 | | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 | | 0 | 4 | 5 | 0 | 1 |
| 2017 | | 0 | 1 | 0 | 0 | 6 | | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 |
| 2018 | | 0 | 2 | 0 | 0 | 8 | | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 |
| 2019 | | 0 | 8 | 0 | 0 | 3 | | 0 | 65 | 18 | 0 | 14 |
| 2015 | Oreillard indéterminé | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | Rhinolophe euryale | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2016 | | 0 | 3 | 0 | 4 | 10 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| 2017 | | 0 | 5 | 2 | 2 | 17 | | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 2018 | | 19 | 12 | 0 | 9 | 21 | | - | - | - | - | - |
| 2019 | | 2 | 4 | 2 | 13 | 15 | | - | - | - | - | - |
| 2015 | Murin indéterminé | 0 | 498 | 3 | 0 | 235 | Pipistrelle de Kuhl/Nathusius | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2016 | | 0 | 737 | 12 | 2 | 395 | | 0 | 528 | 16 | 0 | 24 |
| 2017 | | 0 | 340 | 1 | 6 | 301 | | 0 | 6 | 0 | 0 | 1 |
| 2018 | | 0 | 1095 | 0 | 4 | 804 | | 0 | 280 | 0 | 0 | 4 |
| 2019 | | 0 | 804 | 0 | 0 | 589 | | 0 | 65 | 0 | 1 | 37 |

Tableau 5 :

Significativité des variables testées par Anova sur le modèle glm modélisant l'effet du type d'ouvrage en fonction de l'activité chiroptérologique en tenant compte des variables environnementales. Significativité: 0: '***' (très significatif); 0.001: '**'; 0.01: '*'; 0.05: '.' (marginale significatif); 0.1: '' (non-significatif)

| Variables | LR Chisq | Df | Pr(>Chisq) | Significativité |
|-----------------|----------|----|------------|-----------------|
| factor(session) | 5984 | 2 | < 2.2e-16 | *** |
| temp | 1614 | 1 | < 2.2e-16 | *** |
| vent | 65 | 1 | 6.183e-16 | *** |
| pluie | 149 | 1 | < 2.2e-16 | *** |
| Visilune | 9263 | 1 | < 2.2e-16 | *** |
| dureelune | 8661 | 1 | < 2.2e-16 | *** |
| Ecoulement | 2018 | 1 | < 2.2e-16 | *** |
| Recouveget | 7130 | 1 | < 2.2e-16 | *** |
| X | 1 | 1 | 0.274604 | |
| Y | 10 | 1 | 0.001921 | ** |
| habprinc | 1529 | 4 | < 2.2e-16 | *** |
| TypeOuvrage | 70363 | 3 | < 2.2e-16 | *** |

les cadres et les dalots, de même que dans les cadres par rapport aux dalots. Les différences ont été testées également avec la fonction summary de R (qui tient compte des autres variables) en faisant varier l'ouvrage référence. Les résultats

**Figure 5 :**

Boxplot du nombre de contacts bruts dans les 3 catégories d'ouvrages testées de 2015 à 2019.

étaient similaires au test de Tukey.

Effet des mensurations des ouvrages sur l'activité chiroptérologique

La section, la hauteur et la longueur des ouvrages ont un effet significatif sur l'activité de passage des chauves-souris. Plus ces mesures sont grandes plus l'activité de passage est importante et ce, quelles que soient les variables environnementales étudiées ainsi que le type d'ouvrage ($p < 0.001$).

Effet du type d'ouvrage sur la richesse spécifique

Le nombre d'espèces enregistré dans les ouvrages varie en fonction de leur nature et ce quelles que soient les variables environnementales prises en compte ($F_{2,533} = 141.46$; $P < 0.001$; **Tableau 7**).

Un test post-hoc de TukeyHSD a permis de mettre en valeur les différences de richesse deux à deux entre ces trois types d'ouvrages. Il y a plus d'espèces qui passent dans les voûtes que dans les dalots et les cadres. Il y en a également plus dans les cadres que dans les dalots. Les différences ont été testées également avec la fonction summary de R (qui tient compte des autres variables) en faisant varier l'ouvrage référence. Les résultats étaient similaires au test de Tukey.

Tableau 6 :

Significativité des différences entre types d'ouvrage pour l'activité des chauves-souris les traversant (Test post-hoc TukeyHSD)

| Ouvrages | diff | lwr | upr | p | adj |
|-------------|----------|-----------|----------|-----------|-----|
| Cadre-Dalot | 169,3880 | 59,29617 | 279,4799 | 0,0009536 | |
| Voûte-Dalot | 309,8411 | 194,66239 | 425,0198 | 0,0000000 | |
| Voûte-Cadre | 140,4530 | 33,26862 | 247,6375 | 0,0061599 | |

Tableau 7 :
Significativité des variables testées par Anova sur le modèle glm modélisant l'effet du type d'ouvrage en fonction de la richesse spécifique chiroptérologique en tenant compte des variables environnementales. Significativité: 0: **** (très significatif); 0.001: **; 0.01: *; 0.05: . (marginale significatif) ; 0.1 ' ' (non-significatif)

| Variables | Sum Sq | Df | Fvalue | Pr(>F) | Signifi- cativité |
|-----------------|--------|-----|----------|-----------|----------------------|
| factor(session) | 36,5 | 2 | 2,1306 | 0,1197766 | |
| temp | 93,6 | 1 | 10,9221 | 0,0010141 | ** |
| vent | 1,5 | 1 | 0,1735 | 0,6772268 | |
| pluie | 0,1 | 1 | 0,0069 | 0,9340001 | |
| Visilune | 62,8 | 1 | 7,3325 | 0,0069894 | ** |
| dureelune | 109,6 | 1 | 12,7849 | 0,0003812 | *** |
| Ecoulement | 3,9 | 1 | 0,4545 | 0,5005076 | |
| Recouvveget | 47,7 | 1 | 5,5708 | 0,0186212 | * |
| X | 0,1 | 1 | 0,0067 | 0,9346060 | |
| Y | 14,7 | 1 | 1,7163 | 0,1907290 | |
| habprinc | 53,8 | 4 | 1,5689 | 0,1811841 | |
| TypeOuvrage | 2425,0 | 2 | 141,4658 | < 2,2e-16 | *** |
| Residuals | 4568,4 | 533 | | | |

Effet des mensurations sur la richesse spécifique

La section, la hauteur et la longueur des ouvrages ont un effet significatif sur le nombre d'espèces de chauves-souris passant dans les ouvrages. Plus ces mesures sont grandes plus il y a d'espèces et ce, quelles que soient les variables environnementales étudiées ainsi que le type d'ouvrage ($p < 0.001$).

Effet du type d'ouvrage sur l'activité en Rhinolophidés

L'activité des Rhinolophidés est significativement différente entre les trois types d'ouvrages étudiés (dalots, voûtes, cadres), et ce quel que soit la période, la température extérieure, la vitesse du vent, la pluviométrie, la période de l'année, la visibilité de la lune (%), la durée de présence de la lune, l'habitat principal

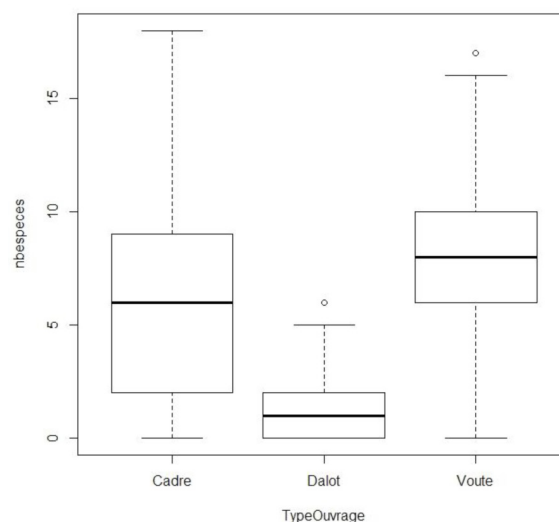


Figure 6 :
Boxplot du nombre d'espèces brutes dans les 3 catégories d'ouvrage testées de 2015 à 2019.

environnant, la présence d'eau ou non sous l'ouvrage (écoulement) et le lieu où a été fait l'enregistrement (coordonnées de l'ouvrage) (**Tableau 8**).

Il y a plus de passages dans les voûtes que dans les cadres et les dalots. La différence entre cadre et dalots n'est pas significative ($p = 0.84$).

Effet des dimensions des ouvrages sur l'activité en Rhinolophidés

Seule la longueur des ouvrages a un effet significatif sur l'activité de passage des espèces de Rhinolophidés. Plus la longueur est importante, plus l'activité de passage est importante et ce, quelles que soient les variables environnementales étudiées ainsi que le type d'ouvrage ($p < 0.001$).

Effet de la mise en service de la LGV sur l'activité et la richesse en chiroptères

a. Sur l'activité totale des chauves-souris

L'activité chiroptérologique est significativement différente entre l'avant

Tableau 8 :

Significativité des variables testées par Anova sur le modèle glm modélisant l'effet du type d'ouvrage en fonction de l'activité des Rhinolophidés en tenant compte des variables environnementales

| Variables | LR Chisq | Df | Pr(>Chisq) | Significativité |
|-----------------|----------|----|------------|-----------------|
| factor(session) | 4,209 | 2 | 0,121877 | |
| temp | 3,758 | 1 | 0,052545 | |
| vent | 0,822 | 1 | 0,364701 | |
| pluie | 0,335 | 1 | 0,562552 | |
| Visilune | 3,609 | 1 | 0,057472 | |
| dureelune | 8,790 | 1 | 0,003028 | ** |
| Ecoulement | 0,177 | 1 | 0,673596 | |
| Recouveget | 0,429 | 1 | 0,512479 | |
| X | 10,368 | 1 | 0,001282 | ** |
| Y | 20,774 | 1 | 5,167e-06 | *** |
| habprinc | 7,067 | 4 | 0,132399 | |
| annee | 87,757 | 1 | < 2,2e-16 | *** |
| TypeOuvrage | 72030 | 2 | 5,478e-08 | *** |

Tableau 9 :

Significativité des variables testées par Anova sur le modèle glm modélisant l'effet du type de la mise en service de la LGV sur l'activité chiroptérologique en tenant compte des variables environnementales

| Variables | LR Chisq | Df | Pr(>Chisq) | Significativité |
|-----------------|----------|----|------------|-----------------|
| factor(session) | 1426 | 2 | < 2,2e-16 | *** |
| temp | 1351 | 1 | < 2,2e-16 | *** |
| vent | 19 | 1 | 1,031e-05 | *** |
| pluie | 128 | 1 | < 2,2e-16 | *** |
| Visilune | 8477 | 1 | < 2,2e-16 | *** |
| dureelune | 1771 | 1 | < 2,2e-16 | *** |
| Ecoulement | 2226 | 1 | < 2,2e-16 | *** |
| Recouveget | 6556 | 1 | < 2,2e-16 | *** |
| X | 4 | 1 | 0,057554 | . |
| Y | 7 | 1 | 0,006685 | ** |
| habprinc | 1306 | 4 | < 2,2e-16 | *** |
| annee | 5226 | 1 | < 2,2e-16 | *** |
| TypeOuvrage | 72030 | 2 | < 2,2e-16 | *** |
| avantapres | 4536 | 1 | < 2,2e-16 | *** |

mise en service et l'après, et ce quel que soit la période, la température extérieure, la vitesse du vent, la pluviométrie, la période de l'année, la visibilité de la lune (%), la durée de présence de la lune, l'habitat principal environnant, la présence d'eau ou non sous l'ouvrage (écoulement), le lieu où a été fait l'enregistrement (coordonnées de l'ouvrage) et l'évolution naturelle des populations (facteur année) (**Tableau 9**). Elle diminue après la mise en service.

L'interaction entre type d'ouvrage et l'effet de mise en service indique que la mise en service a un impact sur l'utilisation de certains types d'ouvrage plutôt que d'autre.

b. Sur l'activité en Rhinolophidés

Il n'y a pas d'effet significatif de la mise en service de la LGV sur l'activité en rhinolophidés, et ce quel que soit la période, la température extérieure, la vitesse du vent, la pluviométrie, la période de l'année, la visibilité de la lune (%), la durée de présence de la lune, l'habitat principal environnant, la présence d'eau ou non sous l'ouvrage (écoulement), le lieu où a été fait l'enregistrement (coordonnées de l'ouvrage) et l'évolution naturelle des populations (facteur année) (**Tableau 10**).

c. Sur le nombre d'espèces de chauves-souris

Il n'y a pas d'effet significatif de la mise en service de la LGV sur le nombre d'espèces de chauves-souris ($F_{1,531} = 2.17$; $P=0.14$; **Tableau 11**), et ce quel que soit la période, la température extérieure, la vitesse du vent, la pluviométrie, la période de l'année, la visibilité de la lune (%), la durée de présence de la lune, l'habitat principal environnant, la présence d'eau ou non sous l'ouvrage (écoulement), le lieu où a été fait l'enregistrement (coordonnées de

Tableau 10 :

Significativité des variables testées par Anova sur le modèle glm modélisant l'effet du type de la mise en service de la LGV sur l'activité des rhinolophidés en tenant compte des variables environnementales

| Variables | LR Chisq | Df | Pr(>Chisq) | Significativité |
|-----------------|----------|----|------------|-----------------|
| factor(session) | 4,217 | 2 | 0,121416 | |
| temp | 3,658 | 1 | 0,055790 | . |
| vent | 0,840 | 1 | 0,359320 | |
| pluie | 0,313 | 1 | 0,575744 | |
| Visilune | 3,682 | 1 | 0,054990 | . |
| dureelune | 8,085 | 1 | 0,004462 | ** |
| Ecoulement | 0,151 | 1 | 0,697926 | |
| Recouvveget | 0,463 | 1 | 0,496406 | |
| X | 10,253 | 1 | 0,001364 | ** |
| Y | 20,621 | 1 | 5,597e-06 | *** |
| habprinc | 6,888 | 4 | 0,141939 | |
| TypeOuvrage | 33,288 | 2 | 5,909e-08 | *** |
| annee | 16,165 | 1 | 5,805e-05 | *** |
| avantapres | 0,092 | 1 | 0,762124 | |

Tableau 11 :

Significativité des variables testées par Anova sur le modèle glm modélisant l'effet de la mise en service de la LGV sur le nombre d'espèces en tenant compte des variables environnementales

| Variables | Sum Sq | Df | Fvalue | Pr(>F) | Significativité |
|--------------|--------|----|----------|-----------|-----------------|
| factor(ses,) | 26,3 | 2 | 1,5329 | 0,216872 | |
| temp | 84,7 | 1 | 9,8853 | 0,001759 | ** |
| vent | 1,1 | 1 | 0,1321 | 0,716425 | |
| pluie | 0,1 | 1 | 0,0073 | 0,932046 | |
| Visilune | 58,3 | 1 | 6,8132 | 0,009304 | ** |
| dureelune | 47,1 | 1 | 5,5047 | 0,019332 | * |
| Ecoulement | 2,9 | 1 | 0,3376 | 0,561452 | |
| Recouvveget | 51,1 | 1 | 5,9646 | 0,014921 | * |
| X | 0,2 | 1 | 0,0257 | 0,872661 | |
| Y | 13,1 | 1 | 1,5308 | 0,216534 | |
| habprinc | 56,2 | 4 | 1,6413 | 0,162461 | |
| annee | 20,8 | 1 | 2,4232 | 0,120144 | |
| TypeOuvrage | 2430,1 | 2 | 141,8900 | < 2,2e-16 | *** |
| avantapres | 18,6 | 1 | 2,1763 | 0,140744 | |

l'ouvrage) et les variations naturelles des populations (facteur année) (**Tableau 11**).

Discussion

Fréquentation des ouvrages

De façon assez constante entre 2015 et 2019, une vingtaine d'espèces de chauves-souris a été enregistrée dans les ouvrages, ce qui représente la quasi totalité des espèces de la région Nouvelle Aquitaine. Cette étude tend donc à prouver l'utilisation des passages inférieurs par une grande diversité d'espèces. L'utilisation faite par chacune d'elle est cependant différente avec certaines espèces comme la Pipistrelle commune et le Murin de Daubenton qui les empruntent très fréquemment et enregistrent le plus d'activité. Concernant le Murin de Daubenton, chauve-souris qui affectionne particulièrement les cours d'eau, puisque spécialisée sur les ressources alimentaires aquatiques, la présence de cours d'eau dans les ouvrages semble expliquer cette propension à les emprunter et à chasser dedans. De même, la Pipistrelle commune est l'espèce la plus contactée lors de n'importe quel point d'écoute, quel que soit l'habitat et la zone géographique : cette activité supérieure par rapport aux autres espèces n'est donc pas indicatrice. En somme, à part une comparaison avec/sans ouvrage, on ne peut pas conclure avec notre protocole sur cette utilisation préférentielle des ouvrages d'une espèce par rapport à une autre.

Cette étude confirme également le fait que des espèces forestières telles que le Murin de Bechstein et le Murin d'Alcathoé empruntent les passages inférieurs dont différents types (voûte et cadre) de section minimale 3 x 3,1 m et ce au cours des trois

périodes et dans des contextes paysagers divers (milieu agricole de prairie non cultivée, jeune forêt de conifères, forêt de feuillus, milieu urbain).

Nous avons également confirmation que le Petit rhinolophe peut traverser plusieurs types d'ouvrages (dalot, voûte, cadre, buse, portique) ; il est l'espèce qui traverse le plus les buses aux dimensions restreintes (section 2 m x hauteur 2 m x longueur 52 m). Comme dit précédemment, cela confirme les résultats de certains auteurs dans la littérature (Abbott et al. 2011) qui ont également trouvé que le Petit rhinolophe était capable de traverser ce genre d'ouvrages (section 1,48 m x hauteur 1,24 x longueur 43 m) avec le Murin de Natterer et l'Oreillard roux, ce qui peut s'expliquer par leurs morphologies et leurs sonars adaptés aux environnements étroits et encombrés. Nos données confirment également depuis 2018 la traversée de buses par les Oreillards, mais aussi par le Grand rhinolophe ce qui est étonnant vu sa grande taille. Cependant, cette dernière espèce traverse ce genre d'ouvrages étroits très peu fréquemment.

Effet du type d'ouvrage sur la fréquentation (activité et richesse)

Concernant les différences de richesses spécifiques entre types d'ouvrage, les analyses annuelles amenaient à trouver des différences entre ouvrages avec notamment souvent plus d'espèces passant dans les voûtes. En considérant toutes les années, il s'avère en effet que les voûtes (ou portiques) laissent passer plus d'espèces que les ouvrages plus petits comme les cadres et les dalots (ou buses). Les cadres faisaient de même par rapport aux dalots. Ce résultat semble logique compte tenu du fait que les espèces ont des capacités de manœuvrabilité différentes,

des tailles différentes et des sonars plus ou moins précis. Les ouvrages les plus grands sont les moins contraignants et relient également des zones à paysages plus ouverts que des buses, ceci pouvant avoir un effet direct sur la richesse spécifique de base présente dans le secteur.

Concernant la différence d'activité entre types d'ouvrage, elle est significativement différente entre les trois types d'ouvrages étudiés (dalots, voûtes, cadres), et ce quels que soient la température extérieure, la vitesse du vent, la pluviométrie, la période de l'année, la visibilité de la lune (%), la durée de présence de la lune, l'habitat principal environnant, la présence d'eau ou non sous l'ouvrage et le lieu où a été fait l'enregistrement (même facteurs que pour la richesse). Comme pour la richesse spécifique, l'activité est supérieure dans les cadres et les voûtes (ou portiques) par rapport à celle enregistrée dans les dalots (ou buses).

En termes d'aménagement, si certaines zones sont identifiées par les organismes compétents comme des zones à enjeux pour les chiroptères, il faudrait privilégier les ouvrages d'art à dimensions importantes, même si à la base, les caractéristiques physiques seules n'en nécessitent pas l'implantation, et ce, a fortiori si les enjeux concernent des espèces de grande taille (autres que Petit rhinolophe, Murin de Natterer et Oreillards). D'autre part, la mise en place d'ouvrages inférieurs petits pour ces petites espèces pouvant les traverser devraient être favorisée dans les zones sans ouvrage. Cela minimiserait peut-être les risques de collision.

Effet de la mise en service

Avec la mise en fonctionnement en juillet 2017 de la ligne à grande vitesse, le même protocole a permis de tester un effet avant/après sur les chiroptères (activité et richesse

spécifique), analyse qui est rarement faite en pratique et dans la bibliographie issue des études d'impact ou des recherches en biologie de la conservation.

Cette comparaison donne une activité totale en baisse après la mise en service de la ligne. L'activité en Rhinolophidés quant à elle ne varie pas, de même que le nombre d'espèces.

L'interaction entre le type d'ouvrage et l'effet de mise en service indique que la mise en service a un impact sur l'utilisation de certains types d'ouvrages plutôt que d'autres. Dans ce sens, l'utilisation nouvelle (depuis 2018) des buses par les Grands rhinolophes et les Oreillardes pourrait expliquer l'effet interaction et l'effet de hausse de l'activité pour les Rhinolophidés. Ces résultats semblent montrer que les chauves-souris sont amenées à utiliser des ouvrages dont elles n'ont pas l'habitude (un Grand rhinolophe dans une buse) afin d'éviter le dérangement causé par la LGV. Le rapport 2017 émettait déjà une telle hypothèse au vu de l'interaction déjà significative entre type d'ouvrage et mise en service sur la richesse spécifique : « De façon intéressante, la mise en service semble agir sur l'effet de l'ouvrage sur la richesse en atténuant la tendance faisant que plus d'espèces passent dans les cadres que dans les dalots. L'hypothèse serait que le passage des trains aurait un effet contraignant forçant certaines espèces à passer sur un ouvrage moins favorable pour elles mais moins fréquenté. Cependant, cela reste une hypothèse et l'effet année reste confondu avec l'effet mise en service. Il faut donc plus d'années pour en déduire quelque chose de robuste. ». Aujourd'hui avec l'ensemble des cinq années de suivi, l'hypothèse se confirme.

Conclusion

Le protocole mis en place en 2015, malgré un nombre limité de réplicats de types d'ouvrages et un nombre important de variables environnementales pouvant jouer sur l'activité et la richesse en chiroptères, a permis d'effectuer une analyse statistique donnant lieu à des résultats intéressants et pour partie similaires sur cinq années consécutives : 2015, 2016, 2017, 2018 et 2019. L'étude globale du jeu de données a donné lieu aux conclusions suivantes :

- presque toutes les espèces utilisent les ouvrages inférieurs ;
- certaines espèces peuvent traverser tous les types d'ouvrages comme le Petit rhinolophe et les Oreillardes. Inversement, les petits ouvrages ne sont pas utilisés par plusieurs espèces ;
- les ouvrages aux plus grandes dimensions telles que les voûtes favorisent la fréquentation (estimation via l'activité enregistrée) mais aussi la richesse spécifique. Les petits ouvrages sont traversés par peu d'espèces. L'effet lié à la longueur du tunnel n'est pas connu au-delà des dimensions étudiées ;
- la mise en service de la ligne change la relation espèce/ouvrage puisque de nouveaux comportements sont apparus après la mise en circulation du TGV. L'effet mise en service a induit la baisse de fréquentation des abords de l'infrastructure, seules quelques espèces semblent s'y adapter (Grand rhinolophe et Oreillardes, qui se contraignent à passer dans des ouvrages plus petits) ;
- en termes d'aménagement, les ouvrages les plus grands sont à privilégier. Les petits sont à conseiller dans des zones vides d'ouvrages pour au moins favoriser les Petits

rhinolophes et Oreillard dans les zones à enjeux même si ces espèces préfèrent aussi les plus grands ouvrages ;

- un suivi attentif des populations sur plusieurs années après 2019 est conseillé, du fait de la baisse globale d'activité enregistrée, notamment pour le Grand rhinolophe dont le comportement a changé après mise en service des trains.

Afin de vérifier la véritable efficacité des ouvrages, un autre protocole permettrait également de regarder si les espèces

passent plus ou moins par les ouvrages inférieurs que par-dessus la ligne. Il faudrait ainsi ajouter le suivi de zones témoin sans ouvrage. Ce protocole permettrait également de suivre d'autres typologies d'ouvrages tels que les Hop-over et les passages aériens « Grande faune » qui ont également été créés pour sécuriser le passage des Chauves-souris. Dans ce sens LISEA a déjà financé une étude sur l'efficacité des hop-over réalisée en partenariat avec PCN et le MNHN.

Une telle étude servirait de référence pour l'ensemble des projets LGV sur le territoire français.

Bibliographie

ABBOTT, ISOBEL & BUTLER, FIDELMA & HARRISON, SIMON. (2012). When flyways meet highways – The relative permeability of different motorway crossing sites to functionally diverse bat species. *Landscape and Urban Planning*. 106. 293-302. 10.1016/j.landurbplan.2012.03.015.

BACH, L., BURKHARDT, P., & LIMPENS, H. J. G. A. (2004). Tunnels as a possibility to connect bat habitats. *Mammalia*, 68(4), 411–420.

BARATAUD, M., J. JEMIN, Y. GRUGIER & S. MAZAUD. 2012. Etude sur les territoires de chasse du Rhinolophe euryale, *Rhinolophus euryale*, en Corrèze, site Natura 2000 des Abîmes de La Fage. *Le Naturaliste Vendéen* 9 : 43-55.

BICKMORE, C. (2003). Review of work carried out on the trunk road network in Wales for bats. Bangor, Wales: Welsh Assembly and Countryside Council of Wales., 65 pp.

BOONMAN, M. (2011). Factors determining the use of culverts underneath highways and railway tracks by bats in lowland areas. *Lutra*, 54, 3–16.

BROWN, GREGORY & PHILLIPS, BEN & WEBB, JONATHAN & SHINE, RICHARD. (2006). Toad on the road: Use of roads as dispersal corridors by cane toads (*Bufo marinus*) at an invasion front in tropical Australia. *Biological Conservation*. 133. 88-94. 10.1016/j.biocon.2006.05.020.

FAHRIG, LENORE. (2003). Fahrig L.. Effects of Habitat Fragmentation on Biodiversity. *Annu Rev Ecol Evol Syst* 34: 487-515. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 34. 487-515. 10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419.

FAHRIG, L., AND T. RYTWINSKI. 2009. Effects of roads on animal abundance: an empirical review and synthesis. *Ecology and Society* 14(1): 21. [online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss1/art21/>

HIGHWAYS AGENCY UK. (2011). A review of bat mitigation in relation to highway severance. London, England: Highways Agency UK., 112 pp.

JACKSON, NATHAN & FAHRIG, LENORE. (2011). Relative effects of road mortality and decrease connectivity on population

genetic diversity. *Biological Conservation* 144. 10.1016/j.biocon.2011.09.010.

KERTH, G., & MELBER, M. (2009). Species-specific barrier effects of a motorway on the habitat use of two threatened forest-living bat species. *Biological Conservation*, 142(2), 270–279.

LIMPENS, H. J. G. A., TWISK, P., & VEENBASS, G. (2005). Bats and road construction. Delft, Arnhem, Netherlands: Ministerie van Verkeer en Waterstaat., 24 pp.

M.E.A. (2005) A Report of the Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being. Island Press, Washington DC

NATIONAL ROADS AUTHORITY. (2006). Best practice guidelines for the conservation of bats in the planning of national road schemes. Dublin, Ireland: National Roads Authority., 44 pp.

RACEY, PAUL & ENTWISTLE, ABIGAIL. (2000). Life-history and Reproductive Strategies of Bats. 10.1016/B978-012195670-7/50010-2.

RUSSELL, A.L., BUTCHKOSKI, C. M., SAIDAK, L., & McCracken, G.F. (2008). Road-killed bats, highway design, and the commuting ecology of bats. *Endangered Species Research*, <http://dx.doi.org/10.3354/esr00121>

SÉTRA. (2008). Rapport bibliographique: routes et chiroptères: état des connaissances. Bagneux, France: Service d'études sur les transports les routes et leurs aménagements., 253 pp.

TROMBULAK, S. C., & FRISSELL, C. A. (2000). Review of Ecological Effects of Roads on Terrestrial and Aquatic Communities. *Conservation Biology*, 14, 18-30. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.99084.x>

Remerciements

Nous remercions LISEA d'avoir permis la réalisation de ce travail important pour la conservation des chiroptères. Nous remercions également très sincèrement Poitou-Charente Nature (PCN) qui coordonne le programme pour les associations et qui a confié à la SEISE l'étude statistique de ce dernier. Dans le détail, sont remerciés :

Pour PCN : Ludivine Delamare, Clementine Dentz, Agnès Boyer.

Pour LPO37 : Etienne Sarrazin,

Pour DSNE : Anthony Le Guen, Jérémy Dechartre, Angèle Barideau-Castets.

Pour VN : Miguel Gailledrat, Nicolas Tranchant.

Pour CN : Méryl Gervot, Sylvain Doussine, Matthieu Dorfiac.

Pour NE17 : Maxime Leutchmann, Naïs Aubouin, Mélanie Darnault.

Pour CEN Aquitaine : Denis Vincent, Quentin Dilasser.

Pour citer cet article :

FILIPPI-CODACCIONI, O., M. LARTIGAU, P. TARTARY, E. JOMAT, A. LE NOZAHIC, Y. PRIOUL, A. CHÉRON, N. GRIFFAUT. 2021.

Transparence écologique des ouvrages d'art de la LGV Paris-Bordeaux pour les chauves-souris : résultats de cinq années d'études. *Plume de Naturalistes* 5 : 147-166.

ISSN 2607-0510

Pour télécharger tous les articles de *Plume de Naturalistes* : www.plume-de-naturalistes.fr