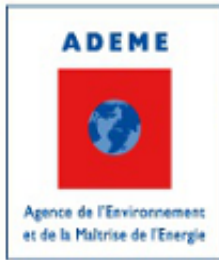


Dynamique des populations de la faune et infrastructures linéaires de transports terrestres (InfraLin-Dynpop) *Synthèse bibliographique*



Programme • **ITTECOP**
Infrastructures de transports terrestres, écosystèmes et paysages

Métadonnées

Titre Dynamique des populations de la faune en bordure d'infrastructures linéaires de transports terrestres (InfraLin-Dynpop)

Sous-titre Synthèse bibliographique

Nature Rapport d'étude

Commanditaires DGITM/ERN4
CGDD/DRI/SR4

Références client

Réalisé par Direction territoriale Sud-Ouest du Cerema
Département Aménagement et Intermodalité des Transports
Groupe Biodiversité et Milieux Naturels

Affaire suivie par : Eric GUINARD
Eric.guinard@cerema.fr - 05 56 70 66 73

Références Cerema Affaire n° 15SA0079

Bibliographie sur la dynamique de population en bordure d'infrastructures linéaires de transport.

Mots clés

Mots clés selon les thésaurus [URBAMET](#) et/ou [ECOPLANETE](#)

Dynamique de Populations ; Puits-Sources ; Emprises ; Gestion ; Mesures de réduction ; Vertébrés ; Infrastructures linéaires de transport, impacts

Droits

Ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans autorisation expresse de :

Crédits photos – illustrations :

Référence documentaire

n° ISRN : oui non

Référence
documentaire

si oui n°ISRN - CEREMA-DTERSO-15-295-FR
(Référence du type : CEREMA-DTerSO-Année-n°-FR)

Conditions
diffusion

de **Notice (auteurs, titre, résumé, ..)**

diffusable
 non diffusable

Rapport d'étude

libre (document téléchargeable librement)
 contrôlé (celui qui en veut communication doit en faire la demande et obtenir l'autorisation et les conditions d'usage auprès du commanditaire)
 confidentiel (document non diffusable)

Historique
versions

| Version(s) | Date | Commentaire |
|------------|----------|--|
| V 2.0 | 07/07/17 | Modification après avis du CS ITTECOPP |
| V1.0 | 03/09/15 | |

Validation du document

| | | | |
|---------------|-------------------------|------------------------------|--|
| Rédacteur(s) | Eric GUINARD | Cerema/DTerSO DAIT / GBMN | Eric.guinard@cerema.fr 05 56 70 66 73 |
| | Vanessa RAUEL | | Vanessa.rauel@cerema.fr 05 56 70 66 75 |
| Rellecteur(s) | Géraldine AUDIE-LIEBERT | Cerema/DTerSO DAIT / GBMN | Geraldine.audie-liebert@cerema.fr 05 56 70 66 93 |
| | Eric LE MITOUARD | Cerema/DTerSO DAIT / GBMN | Eric.le-mitouard@cerema.fr 05 56 70 67 11 |
| Validé par | | | |

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Résumé - Abstract..... | 7 |
| 1 - Introduction..... | 8 |
| 2 - Définitions de la démographie et de la dynamique de population..... | 8 |
| 3 - La recherche bibliographique..... | 10 |
| 3.1 - Méthodologie de recherche bibliographique..... | 10 |
| 3.2 - Résultats sur la recherche bibliographique..... | 12 |
| 3.2.1 - Les études traitant de la dynamique de population..... | 12 |
| 3.2.2 - Les facteurs d'influence d'une dynamique de population..... | 12 |
| 4 - Synthèse des publications..... | 15 |
| 4.1 - Impacts des ILTe sur la démographie..... | 15 |
| 4.1.1 - Mammifères..... | 15 |
| 4.1.2 - Oiseaux..... | 15 |
| 4.1.3 - Reptiles..... | 15 |
| 4.1.4 - Amphibiens..... | 15 |
| 4.1.5 - Études de populations multi-spécifiques..... | 15 |
| 4.2 - Impacts des ILTe sur le succès reproducteur..... | 16 |
| 4.3 - Impacts des ILTe sur la densité de populations..... | 17 |
| 4.3.1 - Les mammifères..... | 17 |
| 4.3.2 - Les oiseaux..... | 17 |
| 4.3.3 - Les reptiles..... | 17 |
| 4.3.4 - Les amphibiens..... | 17 |
| 4.3.5 - Les poissons..... | 18 |
| 4.3.6 - Les modèles théoriques..... | 18 |
| 4.4 - La mortalité liée aux ILTe sur la dynamique des populations..... | 18 |
| 4.4.1 - Les mammifères..... | 18 |
| 4.4.2 - Les oiseaux..... | 19 |
| 4.4.3 - Les reptiles..... | 19 |
| 4.4.4 - Les amphibiens..... | 19 |
| 4.4.5 - Les invertébrés..... | 19 |
| 4.4.6 - Comparaison interspécifique..... | 20 |
| 4.5 - Impact des ILTe sur le sexe-ratio..... | 20 |
| 4.5.1 - Les Mammifères..... | 20 |
| 4.5.2 - Les Oiseaux..... | 20 |
| 4.5.3 - Les Reptiles..... | 21 |
| 4.5.4 - Les Invertébrés..... | 21 |
| 4.6 - Impact des ILTe sur le comportement de déplacements..... | 21 |
| 4.6.1 - Les Mammifères..... | 21 |
| 4.6.2 - Les Reptiles..... | 21 |
| 4.6.3 - Les Amphibiens..... | 21 |

| | |
|---|-----------|
| 4.6.4 - Les études pluri-spécifiques..... | 22 |
| 4.7 - Impact des ILTe sur la génétique des populations..... | 22 |
| 4.7.1 - Les Reptiles - Chéloniens..... | 22 |
| 4.7.2 - Les Amphibiens..... | 22 |
| 4.7.3 - Les modèles théoriques..... | 22 |
| 4.8 - Effets indirects des ILTe sur la dynamique des populations..... | 23 |
| 4.8.1 - Effets négatifs..... | 23 |
| 4.8.2 - Effets positifs..... | 23 |
| 4.8.3 - Effets neutres..... | 24 |
| 4.9 - Cas des lignes de transport d'énergie électrique..... | 24 |
| 4.10 - Cas des voies ferrées..... | 24 |
| 5 - Synthèse des différents effets sur la démographie et ses paramètres..... | 26 |
| 6 - Conclusion et perspectives..... | 28 |
| 6.1 - Bilan du nombre de publications..... | 28 |
| 6.2 - Conclusion sur le contenu des études..... | 28 |
| Bibliographie..... | 30 |

Index des illustrations

| | |
|---|----|
| Figure 1: Schéma de principe de la dynamique d'une population en fonction des individus qui entrent et qui sortent expliquant la cinétique de la densité d'une population (en partie extrait de Nevoux 2008)..... | 9 |
| Figure 2: Répartition du nombre des publications de démographie par groupes taxinomiques..... | 12 |
| Figure 3: Répartition du nombre des publications des facteurs d'influence démographiques par groupes taxinomiques..... | 14 |
| Figure 4: Répartition du nombre des publications par facteurs d'influence démographiques..... | 14 |
| Figure 5: Synthèse des différents effets des ILTe et leurs impacts sur la démographie des espèces animales..... | 27 |

Index des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 - Principales stratégies de recherche bibliographique avec leurs équations de recherche, les domaines concernés et leurs nombres d'articles obtenus puis sélectionnés..... | 11 |
|--|----|

Résumé - Abstract

Cette étude bibliographique propose une analyse des effets des Infrastructures Linéaires de Transport et d'énergie (ILTe) sur la dynamique des populations animales adjacentes et leurs paramètres démographiques tels que le succès reproducteur, la densité, la mortalité liée au trafic, le sexe-ratio et d'autres paramètres tels que, les comportements dans les déplacements et la génétique des populations, des classes des Vertébrés et anecdotiquement sur la faune piscicole et sur la classe des insectes. Une synthèse de ces effets et de leurs impacts a permis de dégager trois principaux types d'effets sur les paramètres démographiques : l'effet barrière, l'effet filtre et l'effet attractivité des bermes. Ceux-ci ont, sauf cas particuliers, des impacts négatifs sur la démographie des espèces animales. L'effet attractivité des bermes peut cependant impacter positivement la démographie des espèces à faible dispersion et à forte natalité, cette dernière compensant la surmortalité liée au trafic. Les mesures de réduction comme les passages faune permettraient d'assurer la pérennité des espèces impactées. Ces trois effets sont influencés par des facteurs extrinsèques (i.e. environnementaux : trafic, qualité d'habitat des bermes....) et intrinsèques (i.e. biologiques : la natalité, la sensibilité aux impacts physiques des ILTe...). Le nombre de publications sur ce thème difficile à étudier est faible, 114 parmi celles-ci (représentant a priori une majorité de publications) ont été analysées. Ceci nous amène à conclure que la connaissance sur ce sujet est à consolider par la communauté scientifique en proposant des études à long terme.

Title : Population dynamic of fauna and terrestrial linear infrastructures of transportation : a revue

This literature revue analyses Linear Transport Infrastructures and energy (LTle) effects on population dynamic and on demographic parameters such as breeding success, density, mortality due to trafic, sex-ratio and other parameters like dispersal behaviour and genetic of population, of all terrestrial Vertebrate taxonomic classes and punctually of fishes and Insects. A synthesis of these effects and their impacts allows us to propose three main effects on demographic parameters: the barrier effect, the filter effect and the attractiveness effect of verges habitat. These effects, with a few exceptions, generate negative impacts on demographic parameters of animal populations. The attractiveness effect of verges can however induce positive impact on demography of species with low dispersal behaviour and high birth rate compensating high mortality due to trafic. Mitigation measures such as fauna passages can preserve population continuation. These three effects are influenced by extrinsic (or environmental) parameters (i.e. trafic, habitat verges quality...) and intrinsic (or biological) parameters (i.e. birth rate, sensitivity to LTle physical impacts...). The number of publications concerning this topic is weak, only 114 publications among them (a majority of publications have certainly been analysed). Then, the conclusion is that the knowledge on this topic needs to be strengthened by scientific community that could propose long term studies.

1 - Introduction

Dans un contexte d'érosion de la biodiversité pour lequel le rôle des Infrastructures Linéaires de Transport et d'énergie (ILTe) fut observé dès les années 30, cette étude vise à évaluer l'avancement de la recherche dans la bibliographie nationale et internationale sur un domaine pourtant encore peu étudié : l'effet des ILTe sur la dynamique des populations de Vertébrés riveraines des ILTe. Nombre d'études ont spécifiquement décrit les effets que la fragmentation des ILTe génère sur les populations de Vertébrés et le rôle des mesures de réduction. D'autres études ont analysé la mortalité animale due, entre autres, au trafic, ou encore ont décrit les effets des ILTe sur la santé ou le succès reproducteur de ces populations. Ce projet de recherche exploratoire vise à synthétiser au travers d'une analyse bibliographique de la littérature scientifique internationale les études décrivant les effets des ILTe sur la dynamique des populations en évaluant séparément ou ensemble les flux d'individus (sortants et entrants qui entre populations traduisent l'isolement des populations animales), la mortalité / natalité (ou bien d'autres descripteurs suivant la théorie des méta-populations) pouvant expliquer cette dynamique populationnelle.

2 - Définitions de la démographie et de la dynamique de population

La démographie est l'étude de l'évolution densitaire d'une population et de ses divers paramètres dits démographiques, c'est-à-dire les distributions par classes d'âge des abondances, soit absolues (issues de comptages exhaustifs d'une population fermée) soit relatives (issues d'estimations par méthodes diverses d'échantillonnage sur une population donnée) sur un instant donné (Touffet 1982, Frontier et al. 2008).

La dynamique des populations est l'analyse des forces déterminant les variations d'abondance de populations au cours du temps (ou fluctuations démographiques, cf. Figure 1, Nevoux 2008). Cela revient la plupart du temps à réaliser des modèles explicatifs de ces variations d'abondance (Frontier et al. 2008).

Cependant, de nombreux articles déforment ces définitions et décrivent en réalité uniquement des variations d'abondance sans analyse des forces qui les sous-tendent, c'est-à-dire leur *cinétique* plutôt que leur *dynamique* (Frontier et al. 2008).

C'est pourquoi, par souci de simplification, nous grouperons les études traitant de la dynamique de population sous le thème générique de « démographie ».

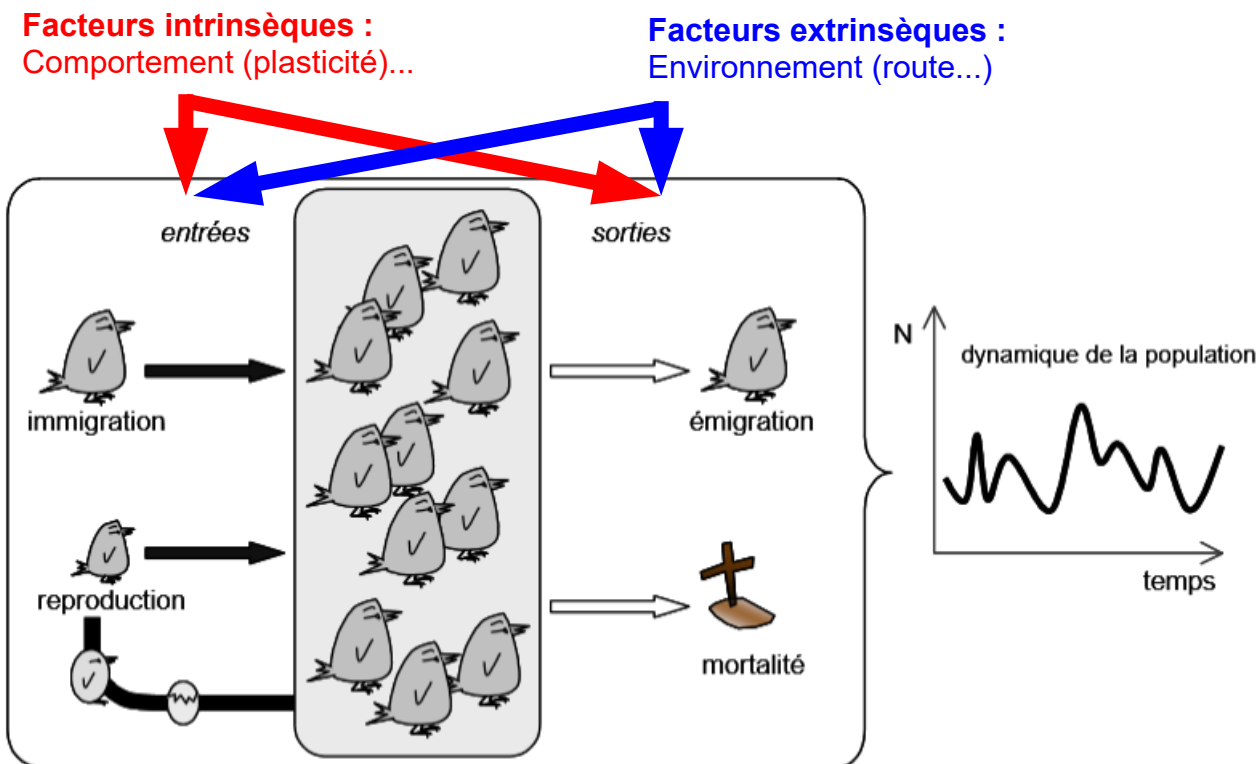


Figure 1: Schéma de principe de la dynamique d'une population en fonction des individus qui entrent et qui sortent expliquant la cinétique de la densité d'une population (en partie extrait de Nevoux 2008)

3 - La recherche bibliographique

3.1 - Méthodologie de recherche bibliographique

La recherche bibliographique a porté sur la littérature étrangère en langue anglaise et plus marginalement sur la littérature francophone.

Nous avons utilisé le moteur de recherche bibliographique Web of Science dans les deux thématiques suivantes, sélectionnées en interaction :

- la dynamique de populations et les paramètres la contrôlant directement
ET
- les infrastructures linéaires de transport et d'énergie (ILTe)

Les équations principales de recherche et les mots clefs utilisés sur Web of Science sont indiquées dans le Tableau 1.

La méthode employée fut de réaliser des stratégies successives de recherche par mots clefs, traduites en différentes équations. Chacune de ces équations fournit une liste d'articles après avoir choisi des domaines précis (demography, ecology...). Une sélection des articles obtenus à partir de ces équations de recherche est réalisée par la lecture des titres puis des résumés des publications listées.

Dans le Tableau 1 sont indiqués les résultats des principales stratégies employées. À noter que ces équations de recherche sont directement inspirées du projet ITTECOP de revue systématique COHNECS-IT.

Remarque : les canaux n'ont pas été pris en compte dans cette analyse.

| Stratégie | Chaîne de mots clefs | Domaines de recherche |
|-----------|--|--|
| 1 | <p>TOPIC: ("transport* infrastructure*" OR road* OR highway\$ OR motorway\$ OR freeway\$ OR rail* OR pipeline\$ OR powerline\$ OR "power line" OR "power lines" OR "transmission line*" OR "electric* line" OR "electric* lines" OR "electric* pylon*")</p> <p>AND</p> <p>TOPIC : (demograph* OR "population\$ dynamic\$" OR "breeding success*")</p> <p>109 articles – 61 sélectionnés</p> | <p>Science technology :</p> <p>RESEARCH AREAS: (ENVIRONMENTAL SCIENCES OR ECOLOGY OR EVOLUTIONARY BIOLOGY OR ZOOLOGY OR BIODIVERSITY CONSERVATION OR DEMOGRAPHY OR BEHAVIORAL SCIENCES OR ENTOMOLOGY)</p> |
| 2 | <p>TOPIC: ("transport* infrastructure*" OR road* OR highway\$ OR motorway\$ OR freeway\$ OR rail* OR pipeline\$ OR powerline\$ OR "power line" OR "power lines" OR "transmission line*" OR "electric* line" OR "electric* lines" OR "electric* pylon*")</p> <p>AND</p> <p>TOPIC : (population\$ OR mortalit* OR birth* OR "turn over")</p> <p>273 articles – 107 sélectionnés</p> | <p>Science technology :</p> <p>RESEARCH AREAS: (ENVIRONMENTAL SCIENCES ECOLOGY OR EVOLUTIONARY BIOLOGY OR ZOOLOGY OR BIODIVERSITY CONSERVATION OR DEMOGRAPHY OR BEHAVIORAL SCIENCES OR ENTOMOLOGY)</p> |
| 3 | <p>TOPIC: ("transport* infrastructure*" OR road* OR highway\$ OR motorway\$ OR freeway\$ OR rail* OR pipeline\$ OR powerline\$ OR "power line" OR "power lines" OR "transmission line*" OR "electric* line" OR "electric* lines" OR "electric* pylon*")</p> <p>AND</p> <p>TOPIC : ("growth rate\$" OR "population growth\$" OR "birth rate\$" OR "turn over" OR "population\$ dynamic\$" OR densit* OR demograph* OR "sex ratio")</p> <p>76 articles – 28 sélectionnés</p> | <p>Science technology :</p> <p>RESEARCH AREAS: (ENVIRONMENTAL SCIENCES ECOLOGY OR EVOLUTIONARY BIOLOGY OR ZOOLOGY OR BIODIVERSITY CONSERVATION OR DEMOGRAPHY OR BEHAVIORAL SCIENCES OR ENTOMOLOGY)</p> |
| 4 | <p>TOPIC AND TITLE : ("transport* infrastructure*" OR road* OR highway\$ OR motorway\$ OR freeway\$ OR rail* OR pipeline\$ OR powerline\$ OR "power line" OR "power lines" OR "transmission line*" OR "electric* line" OR "electric* lines" OR "electric* pylon*")</p> <p>AND</p> <p>TOPIC AND TITLE: (demograph* OR "population\$ dynamic\$" OR "breeding success*" OR "turn over" OR "birth rate\$" OR "growth rate\$")</p> <p>58 articles : 15 sélectionnés</p> | <p>Science technology :</p> <p>RESEARCH AREAS: (ENVIRONMENTAL SCIENCES ECOLOGY OR EVOLUTIONARY BIOLOGY OR ZOOLOGY OR BIODIVERSITY CONSERVATION OR DEMOGRAPHY OR BEHAVIORAL SCIENCES OR ENTOMOLOGY)</p> |

Tableau 1 - Principales stratégies de recherche bibliographique avec leurs équations de recherche, les domaines concernés et leurs nombres d'articles obtenus puis sélectionnés

3.2 - Résultats sur la recherche bibliographique

3.2.1 - Les études traitant de la dynamique de population

Après analyse (lecture des résumés puis des articles entiers) de l'ensemble des articles ainsi obtenus, la recherche bibliographique sur l'unique thème de la démographie n'a permis d'obtenir que 13 articles traitant plus ou moins directement de démographie et de l'impact des ILTe sur la densité des populations.

La majorité des publications étudient la démographie des mammifères (5 publications) ou sont des modèles multi-spécifiques (4 publications) ; aucune ne concerne les invertébrés et la faune aquatique (Figure 2).

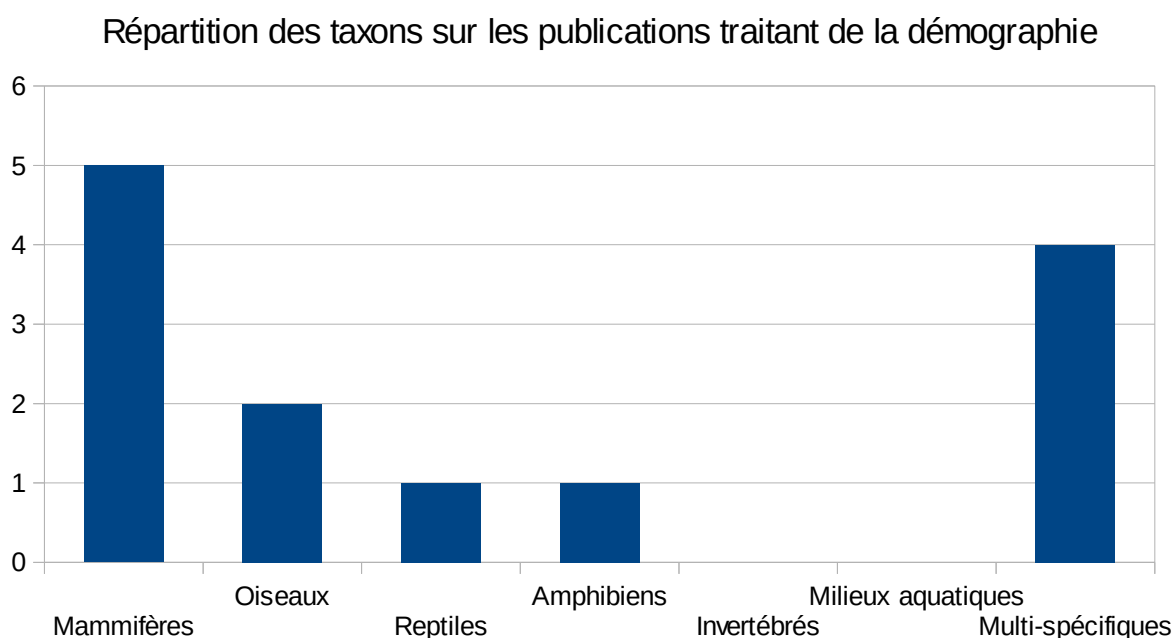


Figure 2: Répartition du nombre des publications de démographie par groupes taxinomiques

Ce faible nombre de publications disponibles sur le sujet de la dynamique de population nous a incité à élargir le champ de recherche bibliographique aux « forces » ou facteurs d'influence des variations de densité de population au cours du temps. Ces études sur les « forces » devaient toutefois s'inscrire dans une thématique démographique analysant leurs effets sur une population (des études méthodologiques de comptage de cadavres ne sont pas sélectionnées par exemple).

3.2.2 - Les facteurs d'influence d'une dynamique de population

Les facteurs d'influence des variations démographique de populations au cours du temps, choisis d'après la Figure 1, sont les suivants :

pour les facteurs extrinsèques :

- la densité des ILTe
- une recherche spécifique sur les lignes de transport d'énergie électrique
- une recherche spécifique sur les voies ferrées
- des effets indirects

pour les facteurs intrinsèques :

- Comportement dans les déplacements des espèces
- la génétique des paysages (proxy de l'isolement et du succès reproducteur d'une population)
- le sexe-ratio
- des effets indirects

pour les paramètres d'entrée :

- le succès reproducteur
- (- le comportement de déplacement inclut l'immigration)

pour les paramètres de sortie :

- la mortalité
 - le sexe ratio (résultante d'une mortalité assez différente en fonction du sexe)
- (- le comportement de déplacement inclut émigration)

La résultante mesurée de l'influence de ces divers paramètres est la densité qui a également fait l'objet d'une recherche spécifique.

A l'issue du complément de recherche bibliographique, 114 publications ont été sélectionnées au final du processus de sélection (équation de recherche puis sélection des titres et résumés).

La majorité des publications concerne les vertébrés et en particulier les oiseaux (35 publications) et les mammifères (28 publications), la faune des milieux aquatiques ne trouvant qu'une seule publication (Figure 3).

La répartition des publications conservées par facteur d'influence (Figure 4) révèle une majorité d'études en lien avec la mortalité (27 publications) et l'évaluation de la densité (21 publications). Parmi les ILTe, les études qui concernent les voies ferrées ne sont qu'au nombre de 4.

Répartition des taxons sur toutes les publications scientifiques analysées

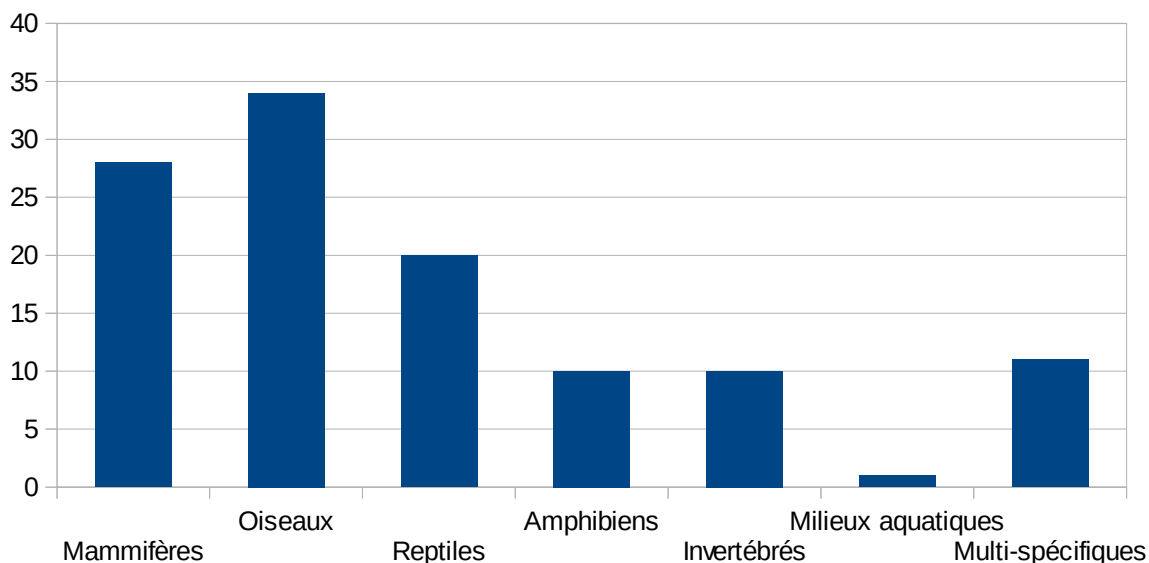


Figure 3: Répartition du nombre des publications des facteurs d'influence démographiques par groupes taxinomiques

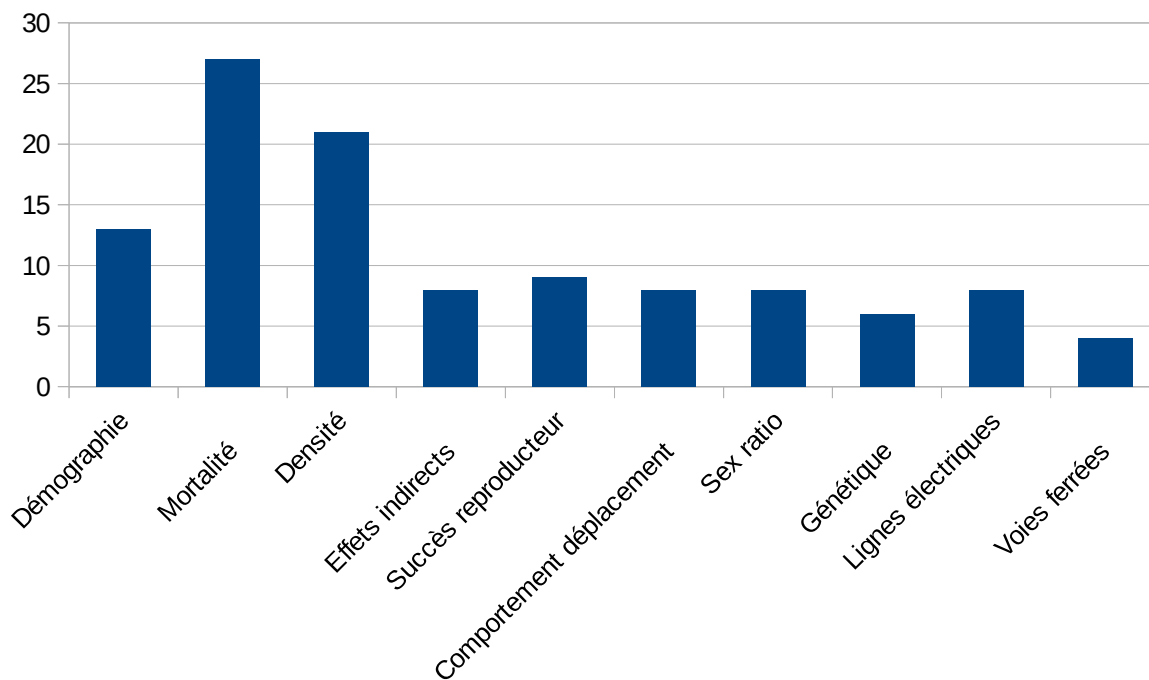


Figure 4: Répartition du nombre des publications par facteurs d'influence démographiques

4 - Synthèse des publications

4.1 - Impacts des ILTe sur la démographie

Le faible nombre de publications ne permet pas ici de conclure à une bonne solidité de la connaissance dans ce domaine.

4.1.1 - Mammifères

Chez les mammifères, l'effet de la route sur la démographie est contrasté selon les espèces. Les espèces les plus sensibles sont ainsi le Lynx bai américain (*Lynx rufus*), dont les populations subissent un effet puits dans les zones denses en routes d'après un modèle démographique numérique (Litvaitis et al. 2015). Un modèle numérique sur la dynamique de population de Wombat commun (*Vombatus ursinus*) montre également un effet négatif des routes sur les effectifs des populations, effet qui peut, d'après ce même modèle, être fortement réduit par des mesures efficaces de réduction des collisions avec le trafic routier (Roger et al. 2011). Cet effet des routes sur la dynamique des populations n'est pas franchement significatif pour le Grizzly (*Ursus arctos horribilis*) mais il s'ajoute aux effets cumulés de la chasse et du dérangement (McLellan et Shackleton 1988). Aucun effet n'a par contre été détecté sur la densité de la population pourtant menacée du Renard véloce nord américain (*Vulpes macrotis mutica*) (Cypher et al. 2009).

Les effets sur cette classe de Vertébrés sont ainsi à étudier au cas par cas en fonction des espèces.

4.1.2 - Oiseaux

Les populations aviaires d'après les deux articles récoltés ne semblent pas être impactées par les routes : les mésanges charbonnières (*Parus major*) et bleues (*P. caeruleus*) (Junker-Bornholdt et al. 1998) ainsi que la Chouette hulotte (*Strix aluco*) (Baudvin et Jouaire 2003).

4.1.3 - Reptiles

La seule espèce de reptile dont l'effet des routes (uniquement) sur leurs populations a été étudié est la Tortue du désert (*Gopherus agassizii*) (Nafus et al. 2013). Les auteurs démontrent l'existence d'un effet négatif des routes sur la densité de population et sur le nombre de gros individus reproducteurs.

4.1.4 - Amphibiens

Une seule publication sur le Pélobate brun (*Pelobates fuscus*) montre au moyen d'un modèle sur la dynamique de population, un effet puits sur les zones avec forte densité de routes (Hels et Nachman 2002).

4.1.5 - Études de populations multi-spécifiques

Forman et Alexander (1998) ont les premiers évoqué le fait que les routes avaient un effet majeur sur la démographie des espèces. Trombulak et Frissell (2000) ont précisé qu'il existe pour la faune aquatique et terrestre un effet différencié en fonction des espèces sur le comportement et la

démographie. Benitez-Lopez et ses collaborateurs (2010) ont plus tard nuancé les effets des routes et de leur trafic sur les oiseaux. Ces auteurs ont en effet démontré par une méta-analyse que l'effet des routes portait sur 5 km pour les mammifères et sur 1 km pour les oiseaux : plus précisément les rapaces sont plus abondants au bord des routes que les autres espèces aviaires et les effets sur les populations des mammifères peuvent aller de quelques mètres de la route pour les micro-mammifères à plusieurs kilomètres pour de plus grosses espèces de la même classe de Vertébrés. De plus, Rytwinski et Fahrig (2012) ont plus récemment précisé, d'après une méta-analyse, que les espèces à faible taux de reproduction, à déplacements fréquents et importants (ou les oiseaux à grands territoires) et ayant un faible comportement d'évitement des routes, sont plus impactées que les autres.

4.2 - Impacts des ILTe sur le succès reproducteur

Les impacts des ILTe et plus particulièrement des routes sur le succès reproducteur ont été étudiés seulement sur les oiseaux (8 publications).

Pour ces derniers, les effets sont différents en fonction des espèces. Une majorité des espèces aviaires étudiées subissent des impacts négatifs. Ainsi Anthony et Isaacs (1989) ont observé que l'activité humaine (dont la présence de routes) a un effet négatif sur la construction des nids par les pygargues à tête blanche (*Haliaeetus leucocephalus*), cette espèce s'éloignant de la route. Foppen et Reijnen (1994) ont montré que la proximité de routes a pour effet d'augmenter le taux d'activité de dispersion des mâles, ces derniers devant plus s'activer pour compenser la mauvaise qualité des habitats (en termes de ressources trophiques pour l'élevage des jeunes). Il a par ailleurs été démontré que le succès reproducteur est plus faible dans les forêts fragmentées du fait d'une plus grande prédation au nid (Robinson et al. 1995). Le succès reproducteur du Gobemouche noir (*Ficedula hypoleuca*), en particulier au stade poussin avant l'envol, est négativement impacté du fait de la surmortalité parentale lors des apports de nourriture et donc quand les déplacements des adultes reproducteurs sont les plus importants (M. T. Kuitunen et al. 2003). Le bruit routier a par ailleurs un effet négatif sur le succès reproducteur de la Mésange charbonnière (*Parus major*) (Halfwerk et al. 2011). Par ailleurs, Dietz et ses collaborateurs (2013) ont montré que le Bruant à couronne blanche (*Zonotrichia leucophrys oriantha*), passereau migrateur américain, présente un taux d'abandon de nid inversement corrélé à la distance à la route, du fait d'un effet de stress (effet lié à la concentration sanguine en hormone de stress (i.e. la corticostérone)).

A contrario, les bermes routières comprenant des espèces herbacées autochtones sont plus attractives pour les oiseaux reproducteurs que des habitats analogues éloignés des routes du paysage de cultures intensives du Middle West américain. Ce phénomène est lié à la présence de clôtures qui servent de support de nid et aux brûlis préconisés par les services en charge de l'entretien des routes. Ces brûlis augmentent l'hétérogénéité de la végétation et par conséquent celle de la ressource trophique (graines, bourgeons, invertébrés...) (Camp et Best 1994). Il est à nuancer toutefois : le succès reproducteur est d'autant meilleur que les nids sont en hauteur ou dans des terriers car plus abrités de ces feux que les nids au ras du sol (Shochat et al. 2005).

Pour les espèces charognardes telles que la Pie bavarde (*Pica pica*), les bermes autoroutières sont plus favorables au succès reproducteur que des routes de plus faible importance, à cause de la meilleure disponibilité en ressource trophique (Yamac et Kirazli 2012). En période de reproduction, les cadavres d'animaux sont plus exploités sur les bords d'autoroutes pour nourrir les poussins (Guinard et al. 2012).

4.3 - Impacts des ILTe sur la densité de populations

Le nombre d'études publiées sur ce sujet (21 publications) permet de trouver des publications sur presque tous les groupes taxinomiques, exception faite des Invertébrés pour lesquels existent plutôt des études sur la richesse spécifique. Les impacts des ILTe et ici seulement des routes dans les présentes publications sont majoritairement négatifs mais quelques espèces bénéficient significativement de la présence des routes.

4.3.1 - Les mammifères

Deux publications montrent des effets positifs des routes sur la densité des micromammifères (la Souris à pattes blanches (*Peromyscus leucopus*, Rytwinski et Fahrig 2007) et le Mulot sylvestre (*Apodemus sylvaticus*) en zone méditerranéenne où le bord des routes sert de refuges (Ruiz-Capillas et al. 2013). Il a été démontré d'autre part que le Cerf de Virginie (*Odocoileus virginianus*) est présent en plus forte densité dans les zones denses en route en dépit de la surmortalité liée aux collisions avec le trafic, car cette espèce y subit moins la chasse et dispose de plus de ressources trophiques (Munro et al. 2012). L'effet négatif des routes sur la densité du Grizzli (*Ursus arctos horribilis*) n'est pas clairement démontré, d'autres facteurs pouvant interagir (Ciarniello et al. 2007).

A l'opposé, Roedenbeck et Voser (2008) ont démontré l'existence d'un effet négatif des routes sur la densité de population des lièvres d'Europe (*Lepus europaeus*), Huijser et Bergers (2000) ont montré le même effet sur le Hérisson d'Europe (*Erinaceus europaeus*). De façon plus indirecte, les vents dominants déterminent la densité des ongulés du Serengeti à cause de la gêne générée par la poussière projetée des pistes en terre par le trafic (Ndibalema et al. 2008).

4.3.2 - Les oiseaux

Selon Kuitunen, Rossi et Stenroos (1998), les autoroutes n'ont pas d'effet majeur sur les oiseaux. Cependant, cette étude est contredite par d'autres auteurs : la densité des oiseaux est significativement plus faible près des ILT (des routes surtout) pour les espèces forestières (Reijnen et Foppen 1994, 1995 et (Reijnen et al. 1995), sur les espèces en milieux ouverts (Vanderzande et al. 1980, Reijnen et al. 1996) et sur les Strigiformes tels la Chouette d'Athéna (*Athene noctua*) et la Chouette hulotte (*Strix aluco*) (Silva et al. 2012).

4.3.3 - Les reptiles

La seule étude trouvée concernant l'impact des routes sur la densité des reptiles porte sur certaines tortues d'eau douce d'Amérique du Nord. Les auteurs (DeCatanzaro et Chow-Fraser 2010) ont ainsi montré un effet négatif de la densité des routes et de la qualité des marais qui reçoivent leurs eaux de ruissellement sur la Tortue musquée commune (*Sternotherus odoratus*) et un effet positif a contrario sur la Tortue peinte (*Chrysemys picta*), cette dernière espèce ayant cependant un sexe-ratio biaisé en faveur des mâles.

4.3.4 - Les amphibiens

Une étude montre une corrélation négative entre l'intensité du trafic routier et la densité locale des populations d'urodèles et d'anoures (Fahrig et al. 1995), ceci étant expliqué par la surmortalité en

bordure de routes. Eigenbrod, Hecnar et Fahrig (2009) ont précisé que les Anoures voient baisser non seulement leur densité de population près des autoroutes à cause de la surmortalité mais aussi à cause de l'effet répulsif du bruit du trafic.

4.3.5 - Les poissons

La seule étude sur l'effet des ILTe, et en particulier des routes sur la densité de population de l'ichtyofaune, est celle de Pepino, Rodriguez et Magnan (2012) qui révèle un effet négatif cumulé de la présence des routes sur la densité des populations de l'Omble des fontaines (*Salvelinus fontinalis*).

4.3.6 - Les modèles théoriques

La densité modélisée d'une population théorique est un type d'étude qui permet de faire ressortir les forces majeures qui influent sur la densité d'une population. Ainsi Borda-de-Agua et ses collaborateurs (2011) a démontré qu'une population est affectée négativement par les routes et aussi par les clôtures en bordure de routes. Une autre étude a précisé que les effets des routes sont positifs pour les espèces ayant de petits territoires et un fort taux de reproduction (i.e. les micromammifères et certains passereaux), surtout du fait d'une baisse de pression de prédation par des espèces généralistes (Rytwinski et Fahrig 2013). Il existe aussi une densité plafond des routes pour les grandes espèces au-delà de laquelle elles évitent les zones denses en ILT (Rytwinski et Fahrig 2013). Ces auteurs concluent sur le fait que les mesures de réduction ne doivent se mettre en place que pour des espèces qui subissent un impact négatif des routes.

4.4 - La mortalité liée aux ILTe sur la dynamique des populations

Le nombre de publication sur ce thème est de loin le plus important par rapport aux autres paramètres démographiques, surtout si cela ne concerne que les seules évaluations de mortalité sans démonstration d'un effet sur la dynamique de population. Nous n'avons analysé que les publications traitant uniquement de l'effet de cette mortalité liée aux ILTe sur la dynamique de population, qui étaient beaucoup moins nombreuses mais encore majoritaires par rapport aux autres paramètres démographiques (27 publications). La mortalité liée aux ILTe a été étudiée chez tous les grands groupes taxinomiques.

4.4.1 - Les mammifères

La mortalité liée aux infrastructures a des effets significatifs sur les populations de mammifères, l'intensité de l'effet de ce paramètre variant en fonction des espèces. La mortalité liée au trafic touche 5 % des loutres d'Europe (*Lutra lutra*) en Israël et présente un enjeu en termes de conservation (Guter et al. 2005). Par ailleurs, 10% de la population de babouins olives (*Papio cynocephalus*) du Parc National de Mikumi en Zambie et Tanzanie est tuée par le trafic routier sans que cela mette pour autant la population en danger (Drews 1995), tout comme le Cerf de Virginie (*Odocoileus virginianus*) en dépit de la surmortalité liée aux collisions avec le trafic (Munro et al. 2012 ; cf. chap.4.3.1). La mortalité routière affecte plus durablement la population du Wallaby de l'île d'Eugène (*Macropus eugeni*) (Chambers et Bencini 2010), et pouvant conduire jusqu'à l'extinction à court terme du Lynx pardel (*Felis pardina*) (Ferrerias et al. 1992) si aucune mesure

n'est prise. La Martre marsupiale (*Dasyurus viverrinus*) et le diable de Tasmanie (*Sarcophilus harrisi*) peuvent suivre la même voie d'extinction d'après les simulations de modèles numériques, mais ces modèles montrent que l'application de mesures de réduction de la mortalité sont efficaces pour ces derniers (Jones 2000) ; et une modélisation de dynamique de population sur le Wallabie bicolore (*Wallabia bicolor*) révèle que l'application de telles mesures d'atténuation peuvent réduire la mortalité de 20 % des femelles ce qui est suffisant pour le maintien de la population (Ramp et Ben-Ami 2006). Van Manen et ses collaborateurs (2012) ont montré que l'impact sur la population d'Ours noir (*Ursus americanus*) de la mortalité liée à l'ouverture d'une autoroute nouvelle est plus fort que le seul effet d'appauvrissement de la variabilité génétique, mais est toutefois moins fort que l'impact de la mortalité liée à la chasse. Ces auteurs, d'après leurs modèles numériques, précisent qu'il existe un effet positif des passages faune pour cette espèce.

4.4.2 - Les oiseaux

Une étude très complète a démontré (Mumme et al. 2000) un effet puits des routes sur une population de Geai à gorge blanche (*Aphelocoma coerulescens*), effet lié à la mortalité des adultes reproducteurs non compensée par la production de jeunes qui sont également frappés par une forte mortalité lorsqu'ils quittent le nid. Ainsi leur succès reproducteur est trop faible pour compenser la mortalité adulte et c'est l'immigration qui compense et maintient la densité de population (Mumme et al. 2000). Bujoczek, Ciach et Yosef (2011) ont par ailleurs montré que les passereaux en bonne santé sont plus tués à proportion par le trafic routier que par la prédation, ce qui impacte indirectement la dynamique de ces populations. D'autres études révèlent par contre que l'Effraie des clochers (*Tyto alba*) est, selon les pays, peu touchée par l'effet de la mortalité routière sur la dynamique de population (Portugal : Borda-de-Agua et al. 2014) jusqu'à très touchée (une menace pèse à moyen terme sur la pérennité de la population (USA Idaho : Boves et Belthoff 2012).

4.4.3 - Les reptiles

Row, Blouin-Demers et Weatherhead (2007) ont démontré dans leur étude que la mortalité menace à échéance de 500 ans la survie de l'ensemble de la population du Serpent ratier (*Elaphe obsoletta*) aux USA. Cependant, pour mesurer correctement l'effet de la mortalité sur les populations locales de serpents, (Jochimsen, Peterson et Harmon (2014) affirment qu'il est nécessaire de faire des mesures d'abondance de population. Concernant les tortues, elles seraient largement menacées par le réseau routier aux USA (Gibbs et Shriver 2002). D'autres études détaillent que le risque d'extinction passe de 5 % pour la Tortue ponctuée (*Clemmys guttata*) à 59 % pour la Tortue mouchetée (*Emydoidea blandingii*) (Beaudry et al. 2008), la mortalité étant par ailleurs la plus forte en saison de reproduction (Beaudry et al. 2010, Cureton et Deaton 2012).

4.4.4 - Les amphibiens

Une seule publication indique que 10 % des populations de trois espèces (Pelobate brun *Pelobates fuscus*, Grenouilles rousse *Rana temporaria* et des champs *R. arvalis*) sont tués par les ILT (Hels et Buchwald 2001).

4.4.5 - Les invertébrés

Le nombre de publications sur l'effet sur la démographie de la mortalité liée aux ILTe pour cet embranchement est relativement conséquent en comparaison d'autres groupes taxinomiques. Les insectes sont les principaux sujets d'études.

(Munoz, Torres et Megias (2015) ont observé dans une synthèse bibliographique que la route à un double effet négatif, pour certains taxons la mortalité est d'autant plus forte que le trafic est intense et la route constitue une barrière infranchissable pour les espèces les moins mobiles. Ce premier constat est confirmé par Skorka et ses collaborateurs (2013) qui ont noté un lien positif entre la mortalité due au trafic et l'intensité du trafic routier. Les mêmes auteurs ont qui plus est observé que la mortalité des papillons est liée à leur abondance sur la berme, à ceci près que les papillons de petits tailles sont plus tués que les autres. Ces mêmes auteurs (Skórka et al. 2015) ont observé que la mortalité est supérieure sur les bermes à herbacées de faible en richesse spécifique végétale quand elles sont proches de prairies à herbes hautes. Ce lien entre la présence de bermes de type prairial et la mortalité routière des insectes a été confirmé par Ries, Debinski et Wieland (2001), auteurs qui se posent la question d'un effet puits que pourrait causer de telles bermes. Munguira et Thomas (1992) ont estimé que 30 % des populations de papillons proches des routes les traversent et qu'un maximum de 1,9 % était tué, ce qui représente un effet négligeable sur la dynamique de ces populations.

Concernant les Odonates, selon Soluk, Zercher et Worthington (2011), les libellules sont longévives et présentent des populations de faibles effectifs ce qui rend ce groupe taxinomique vulnérable à l'impact des ILT, les espèces à vol bas (< 2m de haut) étant les plus vulnérables. La pose sur chaque côté d'un ouvrage de franchissement hydraulique d'un filet haut de 3 m au droit d'un cours d'eau ou d'un marais est une mesure efficace pour réduire mortalité de libellules (Furness et Soluk 2015).

4.4.6 - Comparaison interspécifique

Après mesures sur le terrain, une comparaison entre les amphibiens et les oiseaux a montré que les premiers sont d'autant moins tués que le trafic est plus fort au contraire des oiseaux, à l'échelle d'une route et même d'un réseau routier (Eberhardt et al. 2013).

4.5 - Impact des ILTe sur le sexe-ratio

N'ont ici été retenues que les publications traitant des impacts des ILTe sur le sexe-ratio de populations animales. Le nombre d'études sur ce thème est relativement faible (9 publications), majoritairement représentées dans la classe des Reptiles ; les Mammifères, les Oiseaux et les Invertébrés étant traités dans une seule étude chacun.

4.5.1 - Les Mammifères

Une étude de Russell, Herbert et Kohen (2009) a montré pour l'Opossum Phalanger renard (*Trichosurus vulpecula*) que la mortalité routière biaise le sexe-ratio en faveur des mâles immatures. A contrario, ces auteurs n'ont pas constaté ce fait sur le Possum à queue en anneau (*Pseudocheirus peregrinus*).

4.5.2 - Les Oiseaux

La seule publication qui concerne les oiseaux sur ce thème précise que le sexe-ratio n'est aucunement biaisé par la mortalité routière, cette mortalité biaiserait plus les classes d'âges, les immatures étant généralement plus touchés que les adultes (Erritzoe et al. 2003).

4.5.3 - Les Reptiles

Chez les tortues américaines, le sexe-ratio est biaisé par la mortalité routière en défaveur des femelles qui se déplacent beaucoup au bord des routes (Aresco 2005, Steen et al. 2006). Ce biais est d'autant plus fort que la densité des routes est importante (Steen et Gibbs 2004). Ce biais du sexe-ratio en défaveur des femelles a d'ailleurs cru au travers de l'histoire avec la densité des routes (Gibbs et Steen 2005), diminuant la densité des femelles (Aresco 2005, Mali et al. 2013). Cela n'a toutefois pas d'effet mesurable sur la morphologie et l'abondance de ces populations (Steen et Gibbs 2004).

4.5.4 - Les Invertébrés

Chez les Odonates du nord USA, dans la majorité des espèces, les mâles sont généralement plus tués par le trafic routier, mais l'impact sur les populations est plus fort pour les quelques espèces dont les femelles sont plus tuées que les mâles par le trafic (Riffell 1999).

4.6 - Impact des ILTe sur le comportement de déplacements

Le nombre d'études sur le thème de l'effet des ILTe sur les déplacements des animaux et son effet indirect sur la démographie est relativement faible (9 publications), représentant dans la Classe des Reptiles, des Amphibiens et des Invertébrés chacun une publication, les Mammifères présentent deux publications et des modèles multi-spécifiques trois publications.

4.6.1 - Les Mammifères

Les voies de recolonisation de l'Ours noir (*Ursus americanus*) évitent les routes sans altération apparente de son processus de colonisation au sud des USA (Simek et al. 2015). Le Rat-Kangourou de Stephen (*Dipodomys stephensi*) quant à lui utilise les pistes de terre comme axes de déplacement et non des routes revêtues qui constituent pour lui des barrières difficilement franchissables (Brock et Kelt 2004).

4.6.2 - Les Reptiles

Proulx, Fortin et Blouin-Demers (2014) ont démontré l'existence d'un comportement d'évitement des routes chez la Tortue mouchetée (*Emydoidea blandingii*) qui a des conséquences directes sur sa démographie en limitant les échanges entre sous-populations.

4.6.3 - Les Amphibiens

La Grenouille léopard (*Rana pipiens*) dévie de sa trajectoire devant une route mais finit par la traverser et sa lenteur et la forte probabilité qui en découle de mourir écrasée par le trafic rend la population vulnérable (Bouchard et al. 2009).

4.6.4 - Les études pluri-spécifiques

Shepard et ses collaborateurs (2008) ont démontré, en croisant une étude comportementale (suivis par radio-télémetrie) avec des relevés de mortalité sur trois espèces terrestres (le Serpent ratier ou Massasauga (*Sistrurus catenatus*), la Tortue-boîte (*Terrapene carolina*) et la Tortue-boîte ornée (*Terrapene ornata*), un fort comportement d'évitement qui a des conséquences directes sur la survie à terme de ces populations. Jaeger et ses collaborateurs (2005) précisent que les populations les plus vulnérables fuient le bruit du trafic et la surface des routes et les moins vulnérables sont celles qui évitent le mieux les véhicules, avec un effet aggravant du niveau de trafic. Ce dernier point est par ailleurs illustré dans la classe des oiseaux par Guinard (2013) qui démontre que le facteur expliquant le mieux la différence interspécifique de mortalité des passereaux liée aux collisions avec le trafic, indépendamment de la densité d'individus, est la distance d'envol face à un danger (corrélation négative).

4.7 - Impact des ILTe sur la génétique des populations

Le nombre d'études sur le thème de l'effet des ILTe sur la génétique des populations animales et son effet indirect sur la démographie est faible (6 publications), représentant dans la classe des Reptiles, des Amphibiens chacun deux publications, les modèles multi-spécifiques présentant une seule publication. Aucune étude ne met en lien la dynamique des populations avec la génétique chez les oiseaux et les mammifères, exceptée une analyse « état initial » avant construction d'une autoroute de la diversité génétique et la démographie sur l'Ours brun (*Ursus arctos*) en Grèce (Karamanlidis et al. 2012).

4.7.1 - Les Reptiles - Chéloniens

Les études sur ce groupe taxinomique donnent des résultats contrastés : (Laporte, Beaudry et Angers (2013) ont utilisé des loci de microsatellites d'ADN nucléaire et mitochondrial comme proxy du succès reproducteur des femelles de Tortue peinte (*Chrysemys picta*) et ce afin de mesurer les impacts des routes sur le succès reproducteur. Aucun effet des routes n'a alors été détecté sur le succès reproducteur, mais les routes tuent plus de femelles entraînant une moindre diversité génétique. Une autre étude révèle par contre que la Tortue-boîte (*Terrapene c. carolina*) maintient sa diversité génétique malgré la baisse de population générale (Marsack et Swanson 2009).

4.7.2 - Les Amphibiens

Deux publications ont été récoltées : une première publication souligne qu'il existe une baisse d'effectif de population accompagnée d'une faible diversité génétique, baisse détectée chez la Grenouille agile (*Rana dalmatina*) liée à la fragmentation autoroutière dans l'ouest de la France (Lesbarreres et al. 2006). Les auteurs d'une autre publication ne détectant aucun effet génétique sur le Triton alpestre (*Triturus alpestris*) par une coupure autoroutière historique, certainement du fait de l'existence de passages hydrauliques de petite dimension utilisés par cet amphibien (Prunier et al. 2014).

4.7.3 - Les modèles théoriques

Au niveau théorique, après modélisation, la mortalité routière a un effet direct sur la variabilité génétique et donc à long terme sur la dynamique de population plutôt qu'un effet barrière ou qu'un effet négatif non compensé par l'immigration (Jackson et Fahrig 2011).

4.8 - Effets indirects des ILTe sur la dynamique des populations

Les effets indirects sont les effets extrinsèques ou intrinsèques qui influencent la dynamique de population qui n'ont pas d'influence immédiatement évidente sur la démographie d'une espèce mais qui agit sur un facteur impactant. Huit publications ont été répertoriées dans cette synthèse sur ce sujet. Elles ont été classées en fonction de la qualité de l'effet : négatif ou positif.

4.8.1 - Effets négatifs

Le sel utilisé pour la viabilité hivernale des routes est attractif chez *Carduelinae* alors qu'il est une menace pour leur santé (Mineau et Brownlee 2005) et peut conduire à une extinction locale chez les amphibiens (Karraker, Gibbs et Vonesh 2008). Par ailleurs, un autre effet indirect des routes sur les populations aviaires est qu'elles entraînent une augmentation de la compétition mâle – mâle accrue chez les passereaux chanteurs nord-américains car s'accompagnant d'une forte concentration sanguine en corticostérone (dite « hormone de stress »). Cette forte concentration de corticostérone chez les mâles a un effet direct sur leur capacité d'élevage et donc sur leur succès reproducteur, ceux-ci abandonnant plus fréquemment leur nid (Butler et al. 2013). Une autre étude rapporte que même les petites routes ont un effet « île » (c'est-à-dire représente un élément de fragmentation importante) sur les populations de micromammifères (Macpherson et al. 2011). Un autre effet plus subtil est une différenciation dans la zone d'occupation dans leur territoire des deux sexes et des classes d'âge, qui plus est différente entre deux espèces de micromammifères de la famille des Muridae (*Oryzomys couesi cozumelae* et *Reithrodontomys spectabilis*) de l'île de Cozumel au Mexique. Les femelles peuvent dans les micro-habitats en bordure immédiate de la route et les mâles dans des micro-habitats plus éloignés pour une espèce et on peut observer le cas l'inverse pour d'autres espèces. Cette répartition peut avoir des effets négatifs sur ces populations en fonction de la typologie des bords de routes (Fuentes-Montemayor et al. 2009).

4.8.2 - Effets positifs

Saarinen et ses collaborateurs (2005) ont démontré que la taille des routes en Finlande a tendance à être corrélée positivement à la richesse spécifique des Lépidoptères diurnes. Ce phénomène s'explique par le fait que cette richesse spécifique est proportionnelle à la taille des bermes qui est plus large sur les autoroutes que sur les autres infrastructures routières. Plus précisément, les lépidoptères diurnes sont plus nombreux dans les bermes routières traversant des milieux forestiers que celles traversant des zones cultivées. Par ailleurs, Jaeger et Fahrig (2004) ont d'après leurs modèles, détecté l'existence d'un effet clôture qui est positif pour toutes les populations fragiles et à bas comportement d'évitement de route. Cet effet des clôtures peut selon ces auteurs a contrario être néfaste à terme, si elles sont posées de façon permanente, dans le cas d'espèces qui ont une population en bon état de conservation et qui ont des besoins en ressources trophiques de part et d'autre des ILT.

4.8.3 - Effets neutres

Un effet neutre des ILT sur une population animale étudiée a été rapporté par Svobodova, Salek et Albrecht (2007), les auteurs signalant, a contrario de ce qui est souvent signalé par la littérature, que pour le Tétralyre (*Lyrurus tetrrix*), la prédation au nid en bord de route n'est pas différente que celle observable au cœur d'une zone forestière dans des forêts fortement fragmentées par les routes ou autres pistes forestières. Dans ces zones fortement fragmentées, les espèces prédatrices seraient plus dérangées par la présence humaine fréquente en bordure de route.

4.9 - Cas des lignes de transport d'énergie électrique

Le nombre d'études sur le thème de l'effet des lignes de transport d'énergie électrique sur les populations animales et leur effet indirect sur la démographie est faible (8 publications) en comparaison des routes. Les études ne traitent que des impacts sur les Oiseaux.

Selon certaines études, des espèces aviaires sont peu impactées (i.e. Cigogne blanche *Ciconia ciconia* ; Garrido et Fernandez-Cruz 2003). Mais les collisions s'ajoutent à d'autres facteurs et peuvent en impact cumulé avoir des effets non négligeables sur les populations comme celle du Grand Tétralyre (*Tetrao urogallus*) et le Tétralyre (*Lyrurus tetrrix*) et à un moindre degré le Lagopède des saules (*Lagopus lagopus*). Ces facteurs s'ajoutent au principal facteur perturbateur pour ces espèces qu'est la pression cynégétique (Bevanger 1995). Il en va de même pour le Vautour chasseur (*Gyps coprotheres*) pour lesquels les collisions sur des lignes électriques s'ajoutent entre autres aux empoisonnements et au braconnage (Boshoff et al. 2011). Silva et ses collaborateurs (2010) ont montré que la densité d'outardes canepetières reproductrices (*Tetrax tetrax*) est négativement corrélée à la densité de lignes électriques. Une autre étude (Manosa et Real 2001) a d'autre part montré que le turn-over pour l'occupation d'un nid est plus important près des lignes électriques chez l'Aigle de Bonelli (*Hieraaetus fasciatus*). Pour certaines espèces, la mortalité liée aux collisions avec les lignes électriques est incompatible avec la pérennité de leur population : l'Outarde de Ludwig (*Neotis ludwigii*) (sud-est Afrique ; Jenkins et al. 2011) ou la Grande Outarde (*Otis tarda*) sur les territoires est autrichien et ouest hongrois, pour laquelle toutefois l'application de mesures de réduction telle que l'enterrement des lignes semble améliorer la situation (Raab et al. 2012).

4.10 - Cas des voies ferrées

Le nombre d'études sur le thème de l'effet des voies ferrées est très faible (4 publications) en comparaison des routes. Ce faible nombre d'études est le reflet du nombre réduit de publications sur l'écologie et les voies ferrées en général.

Le chevreuil (*Capreolus capreolus*) voit sa mortalité augmenter en fonction de la fréquence des trains et de la saison avec un maximum en hiver (Kusta et al. 2014). Concernant les reptiles, Hu et ses collaborateurs (2012) constatent une différenciation génétique de part et d'autre d'une voie ferrée (construite entre 1958 et 1979) au Tibet, suggérant ainsi la nécessité d'une mise en place de passages spécifiques. Concernant les Amphibiens, leur mortalité dépend selon Budzik et Budzik (2014) de leur agilité à franchir les rails ; les voies ferrées constituant notamment une barrière génétique chez la Salamandre marbrée (*Ambystoma opacum*) d'après l'étude de Bartoszek et Greenwald (2009).

5 - Synthèse des différents effets sur la démographie et ses paramètres

Si l'on dresse un bilan général, il ressort que les effets sur la démographie et ses paramètres sont généralement négatifs sur la plupart des taxons. Mais ils arrivent parfois que les effets soient neutres et même positifs. Nous allons dans ce chapitre synthétiser les mécanismes qui sous-tendent ces effets.

Les ILTe en particulier les routes et les voies ferrées, ont potentiellement plusieurs effets distincts possibles. Ceux-ci peuvent être regroupés en trois effets principaux d'intensité variable en fonction des espèces, que nous avons synthétisé sur la Figure 5 en page suivante (Thorne 1993) :

1- un *effet répulsif*, plus communément appelé effet barrière étanche. Il concerne et affecte plus durement les espèces les plus sensibles aux impacts liés aux ILT (bruit, éclairage artificiel ... et les clôtures). L'effet barrière aura des impacts négatifs à plus ou moins long terme sur la diversité génétique des populations si le territoire qu'elles occupent est isolé d'autres alentours. Cela reste à nuancer par le fait que les clôtures, si elles sont provisoires ou accompagnées de passages faune auraient un effet positif sur les espèces à faible capacité d'évitement des véhicules. À une échelle supérieure, les espèces à grands territoires et à forte capacité de dispersion sont repoussées par un effet seuil de densité d'ILT.

2- un *effet filtre*, le filtre étant le trafic qui prélève en les tuant certains des individus traversant l'ILTe. Cela se traduit par un effet barrière plus ou moins perméable (aux adultes en pleine santé en phase de nourrissage de leurs petits, à un des deux sexes [effet sur le sexe-ratio]). Les espèces évitant le mieux les véhicules (espèces très mobiles ou fuyant rapidement) sont dans ce contexte plus avantagées.

3- un *effet attractivité* des habitats et corridors que constituent les bermes d'une ILT, pour une population animale, se décompose en deux principaux types d'impacts :

- impact positif : le caractère attractif de « l'habitat berme » favorise l'implantation d'espèces à forte natalité, n'ayant besoin que de petits territoires. Ils sont mieux abrités des prédateurs, compensant par les naissances une surmortalité liée au trafic. Sont également favorisées les espèces saprophages, les routes pourvoyant régulièrement ces charognards en cadavres. Les bermes peuvent dans ce contexte avoir un effet « source », pour les espèces autochtones mais aussi aux espèces allochtones invasives. Les bermes peuvent leur servir de corridors du fait de leur forme longitudinale et du réseau qu'elles constituent.

- impact négatif : l'effet d'attractivité de l'habitat berme peut également être négatif, en particulier chez les espèces dont la mortalité liée au trafic n'est pas compensée par leur natalité, générant ainsi un effet « puits ». Il peut également créer du stress lié au bruit notamment (le stress entraîne une baisse du succès reproducteur et même un abandon du nid chez les oiseaux).

Nota : ces trois effets principaux peuvent également n'avoir dans quelques cas (peu relevés dans la littérature) aucun impact (i.e. un impact neutre) chez certaines espèces peu sensibles à ceux-ci.

Une même espèce peut subir concomitamment les effets filtres et attractivité ; l'effet barrière est exclusif et ne peut impacter une espèce animale en synergie avec les deux autres effets sus-dits. Les effets décrits ci-dessus sont principalement influencés par deux types de facteurs (Figure 5) :

Des facteurs extrinsèques (environnementaux)

+ plus le trafic et la largeur de l'ILT (ou la hauteur pour les lignes très hautes tensions) sont importants et plus la mortalité sera forte (sauf pour les amphibiens notamment pour lesquels le niveau de bruit du trafic engendre un effet répulsif)

- + la qualité de « l'habitat bermes » en contraste avec le milieu extérieur à l'emprise routière (l'effet de l'attractivité des bermes sera plus fort en secteur type agricole intensif qu'en milieu préservé).
- + et d'autres facteurs secondaires tels que la présence ou non de mesures de réduction d'impact (passages faune...), le profil transversal de l'ILT...

Des facteurs intrinsèques (éco-éthologiques et démographiques spécifiques)

- + Il apparaît clairement que la natalité est le facteur démographique dimensionnant dans l'extinction d'une population locale proche d'une ILTe, cette natalité devant compenser la mortalité générée par les ILT pour que se maintienne cette population. Les fortes natalités concernent surtout les petites espèces avec de petits territoires et des déplacements limités qui de ce fait ont une plus faible probabilité de se faire tuer par le trafic.
- + La capacité d'évitement d'un véhicule (pouvant se traduire par une distance minimale de fuite face à un danger ou par une grande rapidité de mouvement) est un autre facteur intrinsèque positif pour la démographie d'une espèce en réduisant la mortalité dû au trafic.
- + Le facteur sensibilité aux impacts physiques des ILT (bruit, lumières, mouvements...) est également important car plus il sera fort et plus l'espèce risque l'isolement et une extinction locale ou a minima une érosion de la diversité génétique à plus ou moins long terme (voir plus haut). Ce facteur entraîne une modification importante du comportement de déplacement sur un territoire donné. Cette sensibilité qui est variable en fonction des taxons fait ainsi varier la distance de retrait vis-à-vis des ILTe ainsi que de façon indirecte leur densité. Une forte sensibilité aux impacts physiques des ILTe pour une espèce échappe à la mortalité liée au trafic ce qui peut présenter un avantage à la condition sine qua non que la zone géographique soit peu fragmentée.

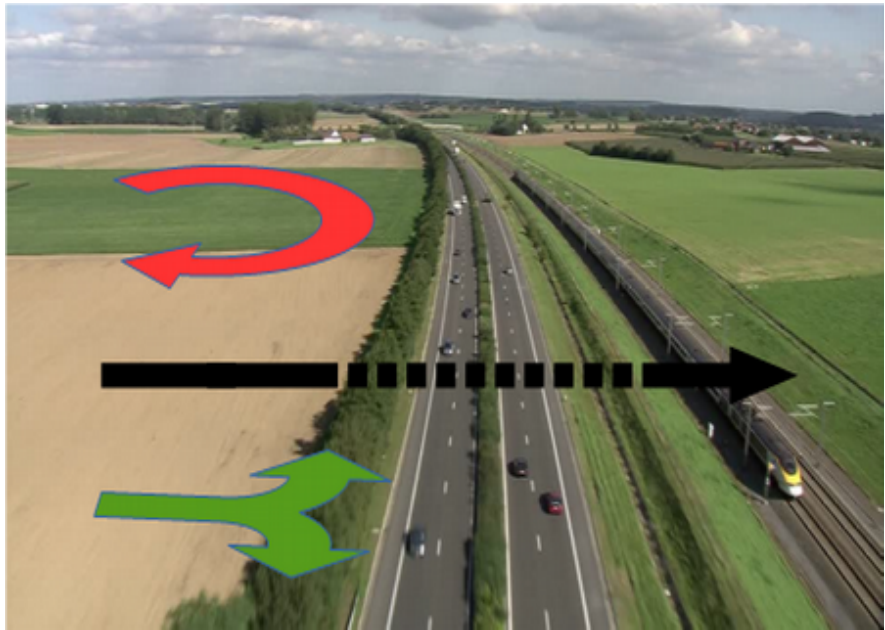
| | | | |
|--|---|--|--|
| <p>Les types d'effets sur la démographie des espèces :</p> <p>1. Effet barrière (dû au bruit, mouvement trafic...) + clôtures : = Effet (-) : ↘ variabilité génétique (isolement sp)</p> <p>2. Effet filtre (dû à la mortalité liée au trafic) : = Effet (-) : sur démographie et sur variabilité génétique</p> <p>3. Effet attractif des bermes (rôle d'habitat / corridor) plus fort en zones très anthropisées :</p> <p><i>Impacts (-) :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Stress lié au bruit : ↗ abandon nid et ↘ succès reproducteur - ↗ mortalité-traffic adulte et immature [mortalité > natalité] (=> effet Puits) et ↘ variabilité génétique <p><i>Impacts (+) :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - ↗ démographie [natalité > mortalité-traffic] (=> effet Source) car bermes = habitats favorables avec moins de prédateurs |  <p>Paramètres d'influence majeure :</p> <table border="0"> <tr> <td data-bbox="539 1697 954 1877"> <p>Extrinsèques (impact) :</p> <ul style="list-style-type: none"> (-) trafic et largeur ILT (±) clôtures (±) qualité bermes (+) mesure réduction (passage faune...) </td> <td data-bbox="970 1697 1444 1877"> <p>Intrinsèques (impact) :</p> <ul style="list-style-type: none"> (-) sensibilité aux impacts (bruits,...) (-) sp à grands déplacements et territoire (+) capacité évitement véhicules (+) natalité forte et petit territoire pour 1 sp </td> </tr> </table> | <p>Extrinsèques (impact) :</p> <ul style="list-style-type: none"> (-) trafic et largeur ILT (±) clôtures (±) qualité bermes (+) mesure réduction (passage faune...) | <p>Intrinsèques (impact) :</p> <ul style="list-style-type: none"> (-) sensibilité aux impacts (bruits,...) (-) sp à grands déplacements et territoire (+) capacité évitement véhicules (+) natalité forte et petit territoire pour 1 sp |
| <p>Extrinsèques (impact) :</p> <ul style="list-style-type: none"> (-) trafic et largeur ILT (±) clôtures (±) qualité bermes (+) mesure réduction (passage faune...) | <p>Intrinsèques (impact) :</p> <ul style="list-style-type: none"> (-) sensibilité aux impacts (bruits,...) (-) sp à grands déplacements et territoire (+) capacité évitement véhicules (+) natalité forte et petit territoire pour 1 sp | | |

Figure 5: Synthèse des différents effets des ILTe et leurs impacts sur la démographie des espèces animales

6 - Conclusion et perspectives

6.1 - Bilan du nombre de publications

Il y a actuellement très peu de publications sur le thème de la démographie de façon globale. La connaissance n'est donc pas consolidée dans ce domaine. La problématique de la dynamique des populations est généralement traitée partiellement par le biais d'un seul paramètre contrôlant la démographie de populations animales.

→ Un effort doit donc être porté sur les études démographiques intégrant l'ensemble des paramètres les contrôlant, en tenant compte toutefois de la difficulté à mener de telles études pour certains groupes taxinomiques. Dans ce dernier cas, il pourra être effectivement difficile de mesurer tous les paramètres d'une population ouverte (en particulier les Invertébrés).

La plupart des publications concernent les routes (101/113 publications). Les lignes de transport d'énergie électrique ne sont concernées que par la Classe des Oiseaux et présentent donc en soit moins de publications potentielles. Les voies ferrées sont par contre très peu traitées à proportion des enjeux et de la taille du réseau.

→ La pression d'étude de la communauté de la « road ecology » doit être en partie reportée sur les autres ILTe et en particulier sur les vois ferrées.

Il y a à proportion plus de publications sur la mortalité et la densité comparé aux autres paramètres démographiques.

Les publications analysées concernent en grande majorité les mammifères et les oiseaux et à un moindre degré les reptiles (plus particulièrement des Chéloniens).

→ Un effort de recherche devra être porté sur les reptiles, les amphibiens et les invertébrés voire la faune aquatique sur d'autres paramètres que la mortalité et la densité.

6.2 - Conclusion sur le contenu des études

Les résultats des publications concernant les différents paramètres indiquent un effet contrasté en fonction des groupes taxinomiques et au niveau interspécifique. Il est à noter que même si l'effet des ILTe est plutôt négatif pour la démographie ou des paramètres démographiques pour une grande majorité d'espèces, les ILTe ont des effets positifs pour certaines espèces qui sont le plus souvent communes telle la Pie bavarde (*Pica pica*). Les études utilisant les modèles numériques appliqués ou non sur des espèces cibles, sont à cet égard riches d'enseignements, car elles permettent de dégager des mécanismes de fonctionnement et de réponse des espèces à des effets des ILTe, au travers de caractéristiques biologiques ou comportementales communes à la plupart des espèces mais plus ou moins marquées chez ces dernières. À titre d'illustration, les espèces ayant une faible capacité d'évitement des véhicules et sensibles au bruit sont plus vulnérables que d'autres espèces pouvant mieux éviter les véhicules et étant plus mobiles (Jaeger et al. 2005).

→ Le comportement des espèces (mobilité, sensibilité aux nuisances liées aux ILTe...) est donc un paramètre indispensable à étudier pour connaître les impacts des ILTe sur la démographie de ces espèces afin d'en tirer des règles plus générales expliquant les différences dans la sensibilité des populations de la plupart des espèces. Il ne faudra pas non plus négliger l'évaluation des effets indirects dans la mesure du possible. Cela permettra de proposer des mesures de réduction d'impacts ciblées et efficaces qui seront au demeurant à tester, celles-ci semblant être efficaces sur la pérennité des populations animales.

Il n'en demeure pas moins que ce sont des études complexes nécessitant plus que d'autres du temps et des financements à la hauteur de l'ampleur de ces études, mais celles-ci sont indispensables pour voir les effets à long terme des ILTe sur la dynamique des populations animales avoisinantes.

Des innovations sont à trouver en couplant notamment la modélisation numérique, études du comportement issues du terrain. La génétique du paysage pourrait être couplée à un suivi démographique pluri-annuel.

En résumé, il découle de cette étude bibliographique, qu'il est difficile de généraliser pour l'ensemble des espèces animales et que des études au cas par cas dans le contexte d'espèces vulnérables sont incontournables.

Bibliographie

- Anthony, Robert G., and Frank B. Isaacs. 1989. "Characteristics of Bald Eagle Nest Sites in Oregon." *The Journal of Wildlife Management* 53 (1): 148. doi:10.2307/3801322.
- Aresco, M. J. 2005. "The Effect of Sex-specific Terrestrial Movements and Roads on the Sex Ratio of Freshwater Turtles." *Biological Conservation* 123 (1): 37–44. doi:10.1016/j.biocon.2004.10.006.
- Bartoszek, Joe, and Katherine R. Greenwald. 2009. "A Population Divided: Railroad Tracks as Barriers to Gene Flow in an Isolated Population of Marbled Salamanders (*Ambystoma Opacum*)." *Herpetological Conservation and Biology* 4 (2): 191–97.
- Baudvin, Hugues, and Stéphane Jouaire. 2003. "Les Causes de Mortalité Chez Les Chouettes Hulottes Adultes *Strix Aluco* Dans Quelques Forêts de Bourgogne." *Alauda* 71 (2): 221–26.
- Beaudry, Frederic, Phillip G. deMaynadier, and Malcolm L. Hunter. 2008. "Identifying Road Mortality Threat at Multiple Spatial Scales for Semi-aquatic Turtles." *Biological Conservation* 141 (10): 2550–63. doi:10.1016/j.biocon.2008.07.016.
- Beaudry, Frederic, Phillip G. Demaynadier, and Malcolm L. Hunter. 2010. "Identifying Hot Moments in Road-Mortality Risk for Freshwater Turtles." *Journal of Wildlife Management* 74 (1): 152–59. doi:10.2193/2008-370.
- Benitez-Lopez, Ana, Rob Alkemade, and Pita A. Verweij. 2010. "The Impacts of Roads and Other Infrastructure on Mammal and Bird Populations: A Meta-analysis." *Biological Conservation* 143 (6): 1307–16. doi:10.1016/j.biocon.2010.02.009.
- Bevanger, K. 1995. "Estimates and Population Consequences of Tetraonid Mortality Caused by Collisions with High Tension Power Lines in Norway." *Journal of Applied Ecology* 32 (4): 745–53. doi:10.2307/2404814.
- Borda-de-Agua, Luis, Clara Grilo, and Henrique M. Pereira. 2014. "Modeling the Impact of Road Mortality on Barn Owl (*Tyto Alba*) Populations Using Age-structured Models." *Ecological Modelling* 276 (March): 29–37. doi:10.1016/j.ecolmodel.2013.12.022.
- Borda-de-Agua, Luis, Laetitia Navarro, Catarina Gavinhos, and Henrique M. Pereira. 2011. "Spatio-temporal Impacts of Roads on the Persistence of Populations: Analytic and Numerical Approaches." *Landscape Ecology* 26 (2): 253–65. doi:10.1007/s10980-010-9546-2.
- Boshoff, Andre F., Johan C. Minnie, Craig J. Tambling, and Michael D. Michael. 2011. "The Impact of Power Line-related Mortality on the Cape Vulture *Gyps Coprotheres* in a Part of Its Range, with an Emphasis on Electrocution." *Bird Conservation International* 21 (3): 311–27. doi:10.1017/S095927091100013X.
- Bouchard, Julie, Adam T. Ford, Felix E. Eigenbrod, and Lenore Fahrig. 2009. "Behavioral Responses of Northern Leopard Frogs (*Rana Pipiens*) to Roads and Traffic: Implications for Population Persistence." *Ecology and Society* 14 (2): 23.
- Boves, Than J., and James R. Belthoff. 2012. "Roadway Mortality of Barn Owls in Idaho, USA." *Journal of Wildlife Management* 76 (7): 1381–92. doi:10.1002/jwmg.378.
- Brock, R. E., and D. A. Kelt. 2004. "Influence of Roads on the Endangered Stephens' Kangaroo Rat (*Dipodomys Stephensi*): Are Dirt and Gravel Roads Different?" *Biological Conservation* 118 (5): 633–40. doi:10.1016/j.biocon.2003.10.012.

- Budzik, Karolina A., and Krystian M. Budzik. 2014. "A Preliminary Report of Amphibian Mortality Patterns on Railways." *Acta Herpetologica* 9 (1): 103–7.
- Bujoczek, Malgorzata, Michal Ciach, and Reuven Yosef. 2011. "Road-kills Affect Avian Population Quality." *Biological Conservation* 144 (3): 1036–39. doi:10.1016/j.biocon.2010.12.022.
- Butler, Luke K., L. Ries, I.-A. Bisson, T. J. Hayden, M. M. Wikelski, and L. M. Romero. 2013. "Opposite but Analogous Effects of Road Density on Songbirds with Contrasting Habitat Preferences." *Animal Conservation* 16 (1): 77–85.
- Camp, M., and Lb Best. 1994. "Nest Density and Nesting Success of Birds in Roadsides Adjacent to Rowcrop Fields." *American Midland Naturalist* 131 (2): 347–58. doi:10.2307/2426260.
- Chambers, Brian, and Roberta Bencini. 2010. "Road Mortality Reduces Survival and Population Growth Rates of Tammar Wallabies on Garden Island, Western Australia." *Wildlife Research* 37 (7): 588–96. doi:10.1071/WR10080.
- Ciarniello, Lana M., Mark S. Boyce, Douglas C. Heard, and Dale R. Seip. 2007. "Components of Grizzly Bear Habitat Selection: Density, Habitats, Roads, and Mortality Risk." *Journal of Wildlife Management* 71 (5): 1446–57. doi:10.2193/2006-229.
- Cureton, James C., and Raelynn Deaton. 2012. "Hot Moments and Hot Spots: Identifying Factors Explaining Temporal and Spatial Variation in Turtle Road Mortality." *Journal of Wildlife Management* 76 (5): 1047–52. doi:10.1002/jwmg.320.
- Cypher, Brian L., Curtis D. Bjurlin, and Julia L. Nelson. 2009. "Effects of Roads on Endangered San Joaquin Kit Foxes." *Journal of Wildlife Management* 73 (6): 885–93. doi:10.2193/2007-576.
- DeCatanzaro, Rachel, and Patricia Chow-Fraser. 2010. "Relationship of Road Density and Marsh Condition to Turtle Assemblage Characteristics in the Laurentian Great Lakes." *Journal of Great Lakes Research* 36 (2): 357–65. doi:10.1016/j.jglr.2010.02.003.
- Dietz, M. S., Murdock, C. C., Romero, L. M., Ozgul, A., & Foufopoulos, J. 2013. "Distance to a Road Is Associated with Reproductive Success and Physiological Stress Response in a Migratory Landbird." https://www.researchgate.net/profile/Arpat_Ozgul/publication/257910034_Distance_to_a_Road_is_Associated_with_Reproductive_Success_and_Physiological_Stress_Response_in_a_Migratory_Landbird/links/546319ae0cf2837efdb01395.pdf.
- Drews, C. 1995. "Road Kills of Animals by Public Traffic in Mikumi National-Park, Tanzania, with Notes on Baboon Mortality." *African Journal of Ecology* 33 (2): 89–100. doi:10.1111/j.1365-2028.1995.tb00785.x.
- Eberhardt, Ewen, Scott Mitchell, and Lenore Fahrig. 2013. "Road Kill Hotspots Do Not Effectively Indicate Mitigation Locations When Past Road Kill Has Depressed Populations." *Journal of Wildlife Management* 77 (7): 1353–59. doi:10.1002/jwmg.592.
- Eigenbrod, Felix, Stephen J. Hecnar, and Lenore Fahrig. 2009. "Quantifying the Road-Effect Zone: Threshold Effects of a Motorway on Anuran Populations in Ontario, Canada." *Ecology and Society* 14 (1): 24.
- Erritzoe, J., T. D. Mazgajski, and L. Rejt. 2003. "Bird Casualties on European Roads - a Review." *Acta Ornithologica* 38 (2): 77–93.

- Fahrig, L., Jh Pedlar, Se Pope, Pd Taylor, and Jf Wegner. 1995. "Effect of Road Traffic on Amphibian Density." *Biological Conservation* 73 (3): 177–82. doi:10.1016/0006-3207(94)00102-V.
- Ferreras, P., Jj Aldama, Jf Beltran, and M. Delibes. 1992. "Rates and Causes of Mortality in a Fragmented Population of Iberian Lynx *Felis-Pardina* Temminck, 1824." *Biological Conservation* 61 (3): 197–202. doi:10.1016/0006-3207(92)91116-A.
- Foppen, R., and R. Reijnen. 1994. "The Effects of Car Traffic on Breeding Bird Populations in Woodland .2. Breeding Dispersal of Male Willow Warblers (*phylloscopus-Trochilus*) in Relation to the Proximity of a Highway." *Journal of Applied Ecology* 31 (1): 95–101. doi:10.2307/2404602.
- Forman, R. T. T., and L. E. Alexander. 1998. "Roads and Their Major Ecological Effects." *Annual Review of Ecology and Systematics* 29: 207–+. doi:10.1146/annurev.ecolsys.29.1.207.
- Frontier, S. 2008. *Ecosystèmes*. Dunod. Structure, Fonctionnement, Évolution: Structure, Fonctionnement, Évolution.
- Fuentes-Montemayor, Elisa, Alfredo D. Cuarón, Ella Vazquez-Dominguez, Julieta Benitez-Malvido, David Valenzuela-Galvan, and Ellen Andresen. 2009. "Living on the Edge: Roads and Edge Effects on Small Mammal Populations." *Journal of Animal Ecology* 78 (4): 857–65. doi:10.1111/j.1365-2656.2009.01551.x.
- Furness, Amber N., and Daniel A. Soluk. 2015. "The Potential of Diversion Structures to Reduce Roadway Mortality of the Endangered Hine's Emerald Dragonfly (*Somatochlora hineana*)." *Journal of Insect Conservation* 19 (3): 449–55. doi:10.1007/s10841-015-9765-6.
- Garrido, J. R., and M. Fernandez-Cruz. 2003. "Effects of Power Lines on a White Stork *Ciconia Ciconia* Population in Central Spain." *Ardeola* 50 (2): 191–200.
- Gibbs, J. P., and W. G. Shriver. 2002. "Estimating the Effects of Road Mortality on Turtle Populations." *Conservation Biology* 16 (6): 1647–52. doi:10.1046/j.1523-1739.2002.01215.x.
- Gibbs, J. P., and D. A. Steen. 2005. "Trends in Sex Ratios of Turtles in the United States: Implications of Road Mortality." *Conservation Biology* 19 (2): 552–56. doi:10.1111/j.1523-1739.2005.000155.x.
- Guinard, E., R. Julliard, and C. Barbraud. 2012. "Motorways and Bird Traffic Casualties: Carcasses Surveys and Scavenging Bias." *Biological Conservation* 147 (1): 40–51. doi:10.1016/j.biocon.2012.01.019.
- Guinard, E. 2013. Infrastructures de transport autoroutières et avifaune: les facteurs influençant la mortalité par collision. Thèse de doctorat, Ecole Pratique des Hautes Etudes-EPHE Paris.
- Guter, A., A. Dolev, D. Saltz, and N. Kronfeld-Schor. 2005. "Temporal and Spatial Influences on Road Mortality in Otters: Conservation Implications." *Israel Journal of Zoology* 51 (3): 199–207. doi:10.1560/3TF7-7B74-QWKC-6WV1.
- Halfwerk, Wouter, Leonard JM Holleman, C. Kate Lessells, Hans Slabbekoorn, and others. 2011. "Negative Impact of Traffic Noise on Avian Reproductive Success." *Journal of Applied Ecology* 48 (1): 210–19.
- Hels, T., and E. Buchwald. 2001. "The Effect of Road Kills on Amphibian Populations." *Biological Conservation* 99 (3): 331–40. doi:10.1016/S0006-3207(00)00215-9.

- Hels, T., and G. Nachman. 2002. "Simulating Viability of a Spadefoot Toad *Pelobates Fuscus* Metapopulation in a Landscape Fragmented by a Road." *Ecography* 25 (6): 730–44. doi:10.1034/j.1600-0587.2002.250609.x.
- Hu, Dun, Jinzhong Fu, Fangdong Zou, and Yin Qi. 2012. "Impact of the Qinghai-Tibet Railway on Population Genetic Structure of the Toad-Headed Lizard, *Phrynocephalus Vlangalii*." *Asian Herpetological Research* 3 (4): 280–87. doi:10.3724/SP.J.1245.2012.00280.
- Huijser, M. P., and P. J. M. Bergers. 2000. "The Effect of Roads and Traffic on Hedgehog (*Erinaceus Europaeus*) Populations." *Biological Conservation* 95 (1): 111–16. doi:10.1016/S0006-3207(00)00006-9.
- Jackson, Nathan D., and Lenore Fahrig. 2011. "Relative Effects of Road Mortality and Decreased Connectivity on Population Genetic Diversity." *Biological Conservation* 144 (12): 3143–48. doi:10.1016/j.biocon.2011.09.010.
- Jaeger, J. a. G., J. Bowman, J. Brennan, L. Fahrig, D. Bert, J. Bouchard, N. Charbonneau, K. Frank, B. Gruber, and K. T. von Toschanowitz. 2005. "Predicting When Animal Populations Are at Risk from Roads: An Interactive Model of Road Avoidance Behavior." *Ecological Modelling* 185 (2-4): 329–48. doi:10.1016/j.ecolmodel.2004.12.015.
- Jaeger, J. a. G., and L. Fahrig. 2004. "Effects of Road Fencing on Population Persistence." *Conservation Biology* 18 (6): 1651–57. doi:10.1111/j.1523-1739.2004.00304.x.
- Jenkins, Andrew R., Jessica M. Shaw, Jon J. Smallie, Bradley Gibbons, Ronelle Visagie, and Peter G. Ryan. 2011. "Estimating the Impacts of Power Line Collisions on Ludwig's Bustards *Neotis Ludwigii*." *Bird Conservation International* 21 (3): 303–10. doi:10.1017/S0959270911000128.
- Jochimsen, D. M., C. R. Peterson, and L. J. Harmon. 2014. "Influence of Ecology and Landscape on Snake Road Mortality in a Sagebrush-steppe Ecosystem." *Animal Conservation* 17 (6): 583–92. doi:10.1111/acv.12125.
- Jones, M. E. 2000. "Road Upgrade, Road Mortality and Remedial Measures: Impacts on a Population of Eastern Quolls and Tasmanian Devils." *Wildlife Research* 27 (3): 289–96. doi:10.1071/WR98069.
- Junker-Bornholdt, R., M. Wagner, M. Zimmermann, S. Simonis, K. H. Schmidt, and W. Wiltshko. 1998. "The Impact of a Motorway in Construction and after Opening to Traffic on the Breeding Biology of Great Tit (*Parus Major*) and Blue Tit (*P. caeruleus*)." *Journal Fur Ornithologie* 139 (2): 131–39. doi:10.1007/BF01651222.
- Karamanlidis, Alexandros A., Martin Straka, Elena Drosopoulou, Miguel de Gabriel Hernando, Ivna Kocijan, Ladislav Paule, and Zacharias Scouras. 2012. "Genetic Diversity, Structure, and Size of an Endangered Brown Bear Population Threatened by Highway Construction in the Pindos Mountains, Greece." *European Journal of Wildlife Research* 58 (3): 511–22. doi:10.1007/s10344-011-0598-7.
- Karraker, Nancy E., James P. Gibbs, and James R. Vonesh. 2008. "Impacts of Road Deicing Salt on the Demography of Vernal Pool-breeding Amphibians." *Ecological Applications* 18 (3): 724–34. doi:10.1890/07-1644.1.
- Kuitunen, M., E. Rossi, and A. Stenroos. 1998. "Do Highways Influence Density of Land Birds?" *Environmental Management* 22 (2): 297–302. doi:10.1007/s002679900105.

- Kuitunen, M. T., J. Viljanen, E. Rossi, and A. Stenroos. 2003. "Impact of Busy Roads on Breeding Success in Pied Flycatchers *Ficedula Hypoleuca*." *Environmental Management* 31 (1): 79–85. doi:10.1007/s00267-002-2694-7.
- Kusta, Tomas, Michaela Hola, Zdenek Keken, Milos Jezek, Tomas Zika, and Vlastimil Hart. 2014. "Deer on the Railway Line: Spatiotemporal Trends in Mortality Patterns of Roe Deer." *Turkish Journal of Zoology* 38 (4): 479–85. doi:10.3906/zoo-1308-18.
- Laporte, Martin, Claude-Olivier Silva Beaudry, and Bernard Angers. 2013. "Effects of Road Proximity on Genetic Diversity and Reproductive Success of the Painted Turtle (*Chrysemys Picta*)." *Conservation Genetics* 14 (1): 21–30. doi:10.1007/s10592-012-0419-x.
- Lesbarreres, David, Craig R. Primmer, Thierry Lode, and Julia Merila. 2006. "The Effects of 20 Years of Highway Presence on the Genetic Structure of *Rana Dalmatina* Populations." *Ecoscience* 13 (4): 531–38. doi:10.2980/1195-6860(2006)13[531:TEOYOH]2.0.CO;2.
- Litvaitis, John A., Gregory C. Reed, Rory P. Carroll, Marian K. Litvaitis, Jeffrey Tash, Tyler Mahard, Derek J. A. Broman, Catherine Callahan, and Mark Ellingwood. 2015. "Bobcats (*Lynx Rufus*) as a Model Organism to Investigate the Effects of Roads on Wide-Ranging Carnivores." *Environmental Management* 55 (6): 1366–76. doi:10.1007/s00267-015-0468-2.
- Macpherson, D., J. L. Macpherson, and P. Morris. 2011. "Rural Roads as Barriers to the Movements of Small Mammals." *Applied Ecology and Environmental Research* 9 (2): 167–80.
- Mali, Ivana, Brian E. Dickerson, Donald J. Brown, James R. Dixon, and Michael R. J. Forstner. 2013. "Road Density Not a Major Driver of Red-Eared Slider (*trachemys Scripta Elegans*) Population Demographics in the Lower Rio Grande Valley of Texas." *Herpetological Conservation and Biology* 8 (1): 131–40.
- Manosa, S., and J. Real. 2001. "Potential Negative Effects of Collisions with Transmission Lines on a Bonelli's Eagle Population." *Journal of Raptor Research* 35 (3): 247–52.
- Marsack, Kelly, and Bradley J. Swanson. 2009. "A Genetic Analysis of the Impact of Generation Time and Road-Based Habitat Fragmentation on Eastern Box Turtles (*Terrapene c. Carolina*)." *Copeia*, no. 4 (December): 647–52. doi:10.1643/CE-08-233.
- Mclellan, Bn, and Dm Shackleton. 1988. "Grizzly Bears and Resource-Extraction Industries - Effects of Roads on Behavior, Habitat Use and Demography." *Journal of Applied Ecology* 25 (2): 451–60. doi:10.2307/2403836.
- Mineau, P., and L. J. Brownlee. 2005. "Road Salts and Birds: An Assessment of the Risk with Particular Emphasis on Winter Finch Mortality." *Wildlife Society Bulletin* 33 (3): 835–41. doi:10.2193/0091-7648(2005)33[835:RSABAA]2.0.CO;2.
- Mumme, R. L., S. J. Schoech, G. W. Woolfenden, and J. W. Fitzpatrick. 2000. "Life and Death in the Fast Lane: Demographic Consequences of Road Mortality in the Florida Scrub-Jay." *Conservation Biology* 14 (2): 501–12. doi:10.1046/j.1523-1739.2000.98370.x.
- Munguira, MI, and Ja Thomas. 1992. "Use of Road Verges by Butterfly and Burnet Populations, and the Effect." *Journal of Applied Ecology* 29 (2): 316–29. doi:10.2307/2404501.

- Munro, Keith G., Jeff Bowman, and Lenore Fahrig. 2012. "Effect of Paved Road Density on Abundance of White-tailed Deer." *Wildlife Research* 39 (6): 478–87. doi:10.1071/WR11152.
- Nafus, Melia G., Tracey D. Tuberville, Kurt A. Buhlmann, and Brian D. Todd. 2013. "Relative Abundance and Demographic Structure of Agassiz's Desert Tortoise (*Gopherus Agassizii*) Along Roads of Varying Size and Traffic Volume." *Biological Conservation* 162 (June): 100–106. doi:10.1016/j.biocon.2013.04.009.
- Ndibalema, Vedasto G., Simon Mduma, Sigbjorn Stokke, and Eivin Roskaft. 2008. "Relationship Between Road Dust and Ungulate Density in Serengeti National Park, Tanzania." *African Journal of Ecology* 46 (4): 547–55. doi:10.1111/j.1365-2028.2007.00898.x.
- Nevoux Marie. 2008. "Réponse Démographique Des Populations Lo Ngévives Aux Changements Climatiques : Importance de La Variabilité Spatio- Temporelle et de L'hétérogénéité Individuelle." Thèse Université La Rochelle. <http://www.cebc.cnrs.fr/Fthese/PUBLI/Nevoux.pdf>.
- Pepino, Marc, Marco A. Rodriguez, and Pierre Magnan. 2012. "Impacts of Highway Crossings on Density of Brook Charr in Streams." *Journal of Applied Ecology* 49 (2): 395–403. doi:10.1111/j.1365-2664.2012.02108.x.
- Proulx, Catherine L., Gabrielle Fortin, and Gabriel Blouin-Demers. 2014. "Blanding's Turtles (*Emydoidea Blandingii*) Avoid Crossing Unpaved and Paved Roads." *Journal of Herpetology* 48 (2): 267–71. doi:10.1670/12-176.
- Prunier, Jérôme G., Bernard Kaufmann, Jean-Paul Léna, Serge Fenet, François Pompanon, and Pierre Joly. 2014. "A 40-year-old Divided Highway Does Not Prevent Gene Flow in the Alpine Newt *Ichthyosaura Alpestris*." *Conservation Genetics* 15 (2): 453–68.
- Raab, Rainer, Claudia Schuetz, Peter Spakovszky, Eike Julius, and Christian H. Schulze. 2012. "Underground Cabling and Marking of Power Lines: Conservation Measures Rapidly Reduced Mortality of West-Pannonian Great Bustards *Otis Tarda*." *Bird Conservation International* 22 (3): 299–306. doi:10.1017/S0959270911000463.
- Ramp, Daniel, and Dror Ben-Ami. 2006. "The Effect of Road-based Fatalities on the Viability of a Peri-urban Swamp Wallaby Population." *Journal of Wildlife Management* 70 (6): 1615–24. doi:10.2193/0022-541X(2006)70[1615:TEORFO]2.0.CO;2.
- Reijnen, R., and R. Foppen. 1994. "The Effects of Car Traffic on Breeding Bird Populations in Woodland .1. Evidence of Reduced Habitat Quality for Willow Warblers (*Phylloscopus-trochilus*) Breeding Close to a Highway." *Journal of Applied Ecology* 31 (1): 85–94. doi:10.2307/2404601.
- Reijnen, Rien, and Ruud Foppen. 1995. "The Effects of Car Traffic on Breeding Bird Populations in Woodland. IV. Influence of Population Size on the Reduction of Density Close to a Highway." *Journal of Applied Ecology*, 481–91.
- Reijnen, Rien, Ruud Foppen, Cajo Ter Braak, and Johan Thissen. 1995. "The Effects of Car Traffic on Breeding Bird Populations in Woodland. III. Reduction of Density in Relation to the Proximity of Main Roads." *Journal of Applied Ecology*, 187–202.
- Reijnen, Rien, Ruud Foppen, and Henk Meeuwssen. 1996. "The Effects of Traffic on the Density of Breeding Birds in Dutch Agricultural Grasslands." *Biological Conservation* 75 (3): 255–60.

- Ries, L., D. M. Debinski, and M. L. Wieland. 2001. "Conservation Value of Roadside Prairie Restoration to Butterfly Communities." *Conservation Biology* 15 (2): 401–11. doi:10.1046/j.1523-1739.2001.015002401.x.
- Riffell, S. K. 1999. "Road Mortality of Dragonflies (Odonata) in a Great Lakes Coastal Wetland." *Great Lakes Entomologist* 32 (1-2): 63–73.
- Robinson et al., Scott K. 1995. "Regional Forest Fragmentation and the Nesting Success of Migratory Birds." *Science* 267 (31): 93–102.
- Roedenbeck, Inga A., and Peter Voser. 2008. "Effects of Roads on Spatial Distribution, Abundance and Mortality of Brown Hare (*Lepus Europaeus*) in Switzerland." *European Journal of Wildlife Research* 54 (3): 425–37. doi:10.1007/s10344-007-0166-3.
- Roger, Erin, Shawn W. Laffan, and Daniel Ramp. 2011. "Road Impacts a Tipping Point for Wildlife Populations in Threatened Landscapes." *Population Ecology* 53 (1): 215–27. doi:10.1007/s10144-010-0209-6.
- Row, Jeffrey R., Gabriel Blouin-Demers, and Patrick J. Weatherhead. 2007. "Demographic Effects of Road Mortality in Black Ratsnakes (*Elaphe Obsoleta*)." *Biological Conservation* 137 (1): 117–24. doi:10.1016/j.biocon.2007.01.020.
- Ruiz-Capillas, Pablo, Cristina Mata, and Juan E. Malo. 2013. "Road Verges Are Refuges for Small Mammal Populations in Extensively Managed Mediterranean Landscapes." *Biological Conservation* 158 (February): 223–29. doi:10.1016/j.biocon.2012.09.025.
- Russell, Tracey C., Catherine A. Herbert, and James L. Kohen. 2009. "High Possum Mortality on Urban Roads: Implications for the Population Viability of the Common Brushtail and the Common Ringtail Possum." *Australian Journal of Zoology* 57 (6): 391–97. doi:10.1071/ZO09079.
- Rytwinski, Trina, and Lenore Fahrig. 2007. "Effect of Road Density on Abundance of White-footed Mice." *Landscape Ecology* 22 (10): 1501–12. doi:10.1007/s10980-007-9134-2.
- . 2012. "Do Species Life History Traits Explain Population Responses to Roads? A Meta-analysis." *Biological Conservation* 147 (1): 87–98. doi:10.1016/j.biocon.2011.11.023.
- . 2013. "Why Are Some Animal Populations Unaffected or Positively Affected by Roads?" *Oecologia* 173 (3): 1143–56. doi:10.1007/s00442-013-2684-x.
- Saarinen, K., A. Valtonen, J. Jantunen, and S. Saarnio. 2005. "Butterflies and Diurnal Moths Along Road Verges: Does Road Type Affect Diversity and Abundance?" *Biological Conservation* 123 (3): 403–12. doi:10.1016/j.biocon.2004.12.012.
- Shepard, D. B., A. R. Kuhns, M. J. Dreslik, and C. A. Phillips. 2008. "Roads as Barriers to Animal Movement in Fragmented Landscapes." *Animal Conservation* 11 (4): 288–96. doi:10.1111/j.1469-1795.2008.00183.x.
- Shochat, E., D. H. Wolfe, M. A. Patten, D. L. Reinking, and S. K. Sherrod. 2005. "Tallgrass Prairie Management and Bird Nest Success Along Roadsides." *Biological Conservation* 121 (3): 399–407. doi:10.1016/j.biocon.2004.05.012.
- Silva, Clara C., Rui Lourenco, Sergio Godinho, Edgar Gomes, Helena Sabino-Marques, Denis Medinas, Vania Neves, Carmo Silva, Joao E. Rabaca, and Antonio Mira. 2012. "Major Roads Have a Negative Impact on the Tawny Owl *Strix Aluco* and the

- Little Owl *Athene Noctua* Populations.” *Acta Ornithologica* 47 (1): 47–54. doi:10.3161/000164512X653917.
- Silva, Joao Paulo, Mario Santos, Luis Queiros, Domingos Leitao, Francisco Moreira, Marcia Pinto, Miguel Leqoc, and Joao Alexandre Cabral. 2010. “Estimating the Influence of Overhead Transmission Power Lines and Landscape Context on the Density of Little Bustard *Tetrax Tetrax* Breeding Populations.” *Ecological Modelling* 221 (16): 1954–63. doi:10.1016/j.ecolmodel.2010.03.027.
- Simek, Stephanie L., Jerrold L. Belant, Zhaofei Fan, Brad W. Young, Bruce D. Leopold, Jonathan Fleming, and Brittany Waller. 2015. “Source Populations and Roads Affect American Black Bear Recolonization.” *European Journal of Wildlife Research* 61 (4): 583–90. doi:10.1007/s10344-015-0933-5.
- Skorka, Piotr, Magdalena Lenda, Dawid Moron, Konrad Kalarus, and Piotr Tryjanowski. 2013. “Factors Affecting Road Mortality and the Suitability of Road Verges for Butterflies.” *Biological Conservation* 159 (March): 148–57. doi:10.1016/j.biocon.2012.12.028.
- Skórka, P., Lenda, M., Moroń, D., Martyka, R., Tryjanowski, P., & Sutherland, W. J. 2015. “Biodiversity Collision Blackspots in Poland: Separation Causality from Stochasticity in Roadkills of Butterflies.” http://www.researchgate.net/profile/Piotr_Skorka/publication/276354604_Biodiversity_collision_blackspots_in_Poland_Separation_causality_from_stochasticity_in_roadkills_of_butterflies/links/5557c47708ae6943a874b2cf.pdf.
- Soluk, Daniel A., Deanna S. Zercher, and Amy M. Worthington. 2011. “Influence of Roadways on Patterns of Mortality and Flight Behavior of Adult Dragonflies Near Wetland Areas.” *Biological Conservation* 144 (5): 1638–43. doi:10.1016/j.biocon.2011.02.015.
- Steen, D. A., M. J. Aresco, S. G. Beilke, B. W. Compton, E. P. Condon, C. Kenneth Dodd, H. Forrester, et al. 2006. “Relative Vulnerability of Female Turtles to Road Mortality.” *Animal Conservation* 9 (3): 269–73. doi:10.1111/j.1469-1795.2006.00032.x.
- Steen, D. A., and J. P. Gibbs. 2004. “Effects of Roads on the Structure of Freshwater Turtle Populations.” *Conservation Biology* 18 (4): 1143–48. doi:10.1111/j.1523-1739.2004.00240.x.
- Svobodova, Jana, Miroslav Salek, and Tomas Albrecht. 2007. “Roads Do Not Increase Predation on Experimental Nests in a Highly Fragmented Forest Landscape.” *Folia Zoologica* 56 (1): 84–89.
- Tamayo Munoz, Pilar, Felipe Pascual Torres, and Adela Gonzalez Megias. 2015. “Effects of Roads on Insects: a Review.” *Biodiversity and Conservation* 24 (3): 659–82. doi:10.1007/s10531-014-0831-2.
- Thorne J.F. 1993. « Landscape ecology » in « Ecology of greenways : design and function of linear conservation areas » Smith D.S. & Hellmund P. - Ed. University of Minnesota press : Minneapolis, p. 23-42.
- Touffet, Jean. 1982. *Dictionnaire Essentiel D'écologie*. Ouest-France. Les Dictionnaires Ouest-France.
- Trombulak, S. C., and C. A. Frissell. 2000. “Review of Ecological Effects of Roads on Terrestrial and Aquatic Communities.” *Conservation Biology* 14 (1): 18–30. doi:10.1046/j.1523-1739.2000.99084.x.

- Van Manen, Frank T., Matthew F. Mccollister, Jeremy M. Nicholson, Laura M. Thompson, Jason L. Kindall, and Mark D. Jones. 2012. "Short-Term Impacts of a 4-Lane Highway on American Black Bears in Eastern North Carolina." *Wildlife Monographs*, no. 181 (May): 1–35. doi:10.1002/wmon.7.
- Vanderzande, An, Wjt Keurs, and Wj Vanderweijden. 1980. "The Impact of Roads on the Densities of 4 Bird Species in an Open-Field Habitat - Evidence of a Long-Distance Effect." *Biological Conservation* 18 (4): 299–321. doi:10.1016/0006-3207(80)90006-3.
- Yamac, Elif, and Cihangir Kirazli. 2012. "Road Effect on the Breeding Success and Nest Characteristics of the Eurasian Magpie (*Pica Pica*)." *Ekoloji* 21 (83): 1–10. doi:10.5053/ekoloji.2012.831.

