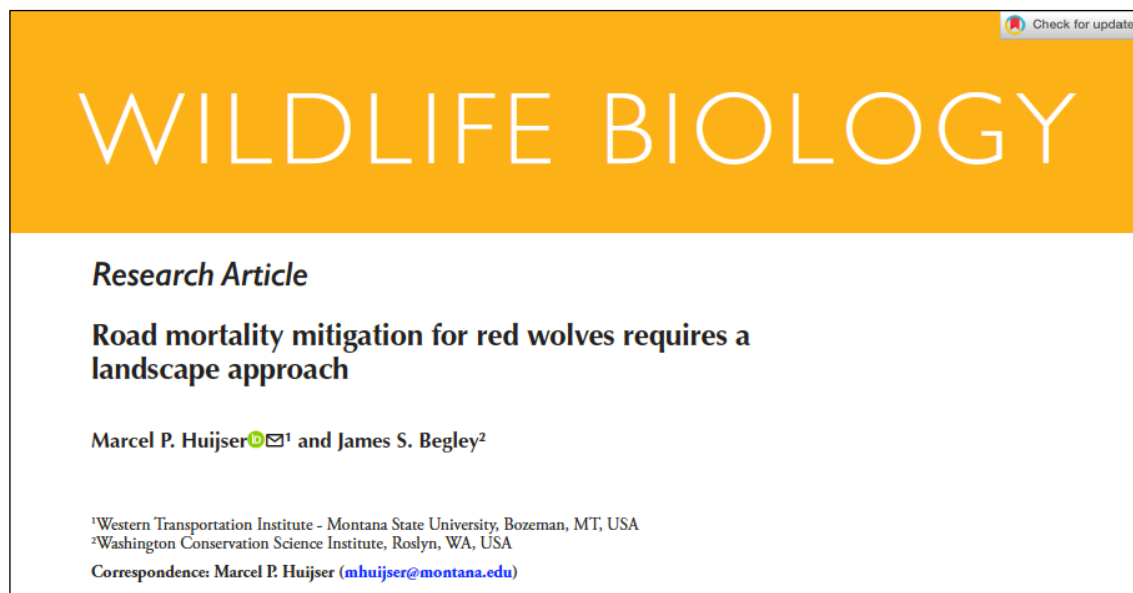


La réduction de la mortalité routière chez les loups rouges nécessite une approche à l'échelle du paysage



Résumé

En 1980, le loup rouge (*Canis rufus*) a été déclaré éteint à l'état sauvage. **Cependant**, à partir de 1987, un programme **d'élevage** en captivité a permis de mener une opération de réintroduction au sein et aux alentours de la réserve nationale de faune sauvage d'Alligator River (Alligator River NWR), en Caroline du Nord, aux États-Unis. En 2012, la population de loups rouges sauvages a atteint un pic d'environ 120 individus. Aucun nouvel individu n'ayant été relâché entre 2010 et 2019, un déclin s'est amorcé, et on estime qu'il ne restait plus que 17 à 20 individus en 2021. Nous avons étudié les tendances temporelles et spatiales de la mortalité des loups rouges afin de formuler des recommandations visant à réduire la **mortalité routière**. Parmi tous les cas de mortalité signalés entre 1987 et 2022, les coups de feu (25,90%) et les collisions avec des véhicules (19,32%) constituaient les causes de décès connues les plus fréquemment rapportées. Pour que la population de loups rouges devienne indépendante d'une gestion intensive, ces deux sources de mortalité non naturelle doivent être prises en compte. La mise en place de mesures d'atténuation sur l'autoroute Américaine 64 traversant la réserve naturelle nationale d'Alligator River (Alligator River NWR) pour réduire la mortalité routière constitue une priorité immédiate pour la conservation du loup rouge, car cela contribuerait à protéger le dernier couple reproducteur sauvage restant et sa progéniture (situation 2022-2023). Cela permettrait également de réduire de 24,36% le taux global historique de mortalité routière des loups rouges dans la région. **De plus**, la mise en place de mesures d'atténuation sur ce tronçon routier est relativement efficace, car c'est là que le plus grand nombre de décès de loups rouge dus aux accidents de la route peut être réduit sur la plus courte longueur de route concernée. **Cependant**, pour favoriser le rétablissement de la population dans l'ensemble de la région, il est également nécessaire de mettre en place des mesures d'atténuation sur les routes à faible trafic, car la plupart des décès historiques dus aux accidents routiers (92,31%) se sont produits sur des tronçons routiers, notamment certains tronçons de l'autoroute Américaine 64, où le trafic ne dépasse pas 101 à 5 000 véhicules par jour. **De plus**, bon nombre des lieux de naissance historiques des loups rouges sont situés à proximité de routes à faible trafic. **Par conséquent**, cette étude montre

qu'une conservation efficace du loup roux nécessite une approche paysagère des mesures d'atténuation, incluant à la fois les routes à fort et à faible trafic.

Mots-clés : connectivité des habitats, taille de la population, viabilité de la population, écologie routière, mortalité routière, passages à faune, clôtures à faune

INTRODUCTION

Le loup rouge (*Canis rufus*) est classé comme « en danger » au titre de la loi sur les espèces menacées (USFWS 2025). Avant la colonisation Européenne, le loup rouge était commun dans tout l'est et le centre-sud des États-Unis. **Cependant**, la chasse délibérée et la perte de son habitat ont entraîné un déclin sévère de sa population. En 1972, le loup rouge n'était plus présent que dans une zone côtière proche de la frontière entre le Texas et la Louisiane (USFWS 2018). Entre 1973 et 1980, les loups rouges restants ont été capturés et soumis à des tests de dépistage d'hybridation avec des coyotes (*Canis latrans*). **En 1980, l'espèce a été déclarée éteinte à l'état sauvage.**

Après le succès des programmes d'élevage en captivité et des lâchers expérimentaux (USFWS 2022), un programme de réintroduction sur le continent visant à établir une population de loups rouge de l'est de la Caroline du Nord (ENC RWP) a été lancé dans et autour de la réserve naturelle nationale d'Alligator River, en Caroline du Nord (USFWS 2018). Les loups roux de cette réserve et des zones environnantes sont classés comme une « population expérimentale non essentielle » (NEP). Plus de 60 adultes ont été relâchés entre 1987 et 1994 et, dès le milieu des années 1990, les loups rouges sauvages avaient établi des territoires, vivaient en meutes et élevaient leurs petits avec succès. Les couples reproducteurs élevaient leurs petits nés à l'état sauvage ainsi que des louveteaux d'adoption nés en captivité et placés dans des tanières par le personnel de l'USFWS. Les meutes de loups rouges se composent presque exclusivement d'un couple reproducteur et de leurs petits nés naturellement cette année-là (ou de louveteaux adoptés), ainsi que de ceux des années précédentes. Les loups rouges n'adoptent généralement pas d'individus plus âgés comme membres de la meute s'ils sont nés dans une autre meute (Joe Madison, chef de projet en Caroline du Nord, Programme de rétablissement du loup rouge, comm. pers.). **Le décès d'un mâle ou d'une femelle reproducteur entraîne une perturbation de la reproduction, et un partenaire de remplacement n'est pas forcément disponible facilement lorsque la densité de population est faible** (Hinton et al. 2017a ; Joe Madison, chef de projet en Caroline du Nord, Programme de rétablissement du loup rouge, comm. pers.).

En 2012, la population de loups rouges réintroduite a atteint son apogée et était estimée à environ 120 individus (USFWS 2025). Après 2012, un déclin s'est amorcé, avec seulement 17 à 20 individus estimés à l'état sauvage en 2021 (USFWS 2025). Les principales causes de ce déclin ont été l'absence de lâchers de nouveaux individus entre 2010 et 2019, combinée à une mortalité élevée due à l'activité humaine. Sans intervention substantielle (c'est-à-dire le lâcher de nouveaux individus et la gestion de l'introgression avec les coyotes), on estimait qu'une population de loups rouges composée de trois couples reproducteurs et comptant au total 44 individus disparaîtrait dans un délai de huit ans (USFWS 2018). Les mises à mort illégales de loups rouges par balle et par collision avec des véhicules représentaient respectivement 29,3% et 24,8% des causes de mortalité connues (Hinton et al. 2017b). Le risque pour un loup rouge adulte marqué de mourir des suites d'un tir ou d'une collision avec

un véhicule a été estimé respectivement à 51,1-63,5% et 15,2-21,4% (Agan et al. 2021a). Parmi les autres menaces figurent l'empoisonnement, le piégeage privé, l'hybridation avec les coyotes, les activités de gestion et les événements stochastiques liés à la petite taille de la population (Roth et al. 2008, Hinton et al. 2017b, USFWS 2018). Les efforts de réintroduction ont repris en 2020 et se poursuivent depuis (USFWS 2025). Depuis 2021, la taille estimée de la population sauvage a légèrement augmenté pour atteindre 20 à 23 individus fin 2023, puis 28 à 31 individus en août 2025 (USFWS 2025). La population de loups rouges en captivité s'élevait à 280 individus en août 2025 (USFWS 2025).

La **mortalité routière** étant l'une des principales causes de décès non naturels chez les loups rouges sauvages, en particulier chez ceux nés en captivité puis relâchés dans la nature, il existe un vif intérêt pour l'étude de mesures visant à réduire cette mortalité (Joe Madison, chef de projet en Caroline du Nord, Programme de rétablissement du loup rouge, comm. pers.). Nous avons étudié les schémas temporels et spatiaux de la mortalité des loups rouges sauvages, en particulier la mortalité routière, dans le cadre du Programme de réintroduction des loups rouges de l'ENC (ENC RWP). Nous avons ensuite utilisé ces résultats pour formuler des recommandations visant à réduire les impacts des routes et de la circulation sur les loups rouges.

Si notre principale préoccupation était de contribuer à la conservation de la population sauvage de loups rouges, notre étude visait également à illustrer les conséquences des biais présents dans certaines pratiques d'écologie routière. En Amérique du Nord, la plupart des mesures d'atténuation en écologie routière visent principalement à améliorer la sécurité des personnes en réduisant les collisions avec les grands mammifères sauvages courants (par exemple, le cerf de Virginie, *Odocoileus virginianus*) le long d'autoroutes relativement fréquentées (Clevenger et al. 2001, Ford et al. 2011, Gagnon et al. 2015). **Cependant**, si la conservation biologique d'une espèce spécifique est l'objectif principal, nous devrions probablement envisager de mettre en œuvre des mesures d'atténuation dans l'habitat où l'espèce est présente, plutôt qu'uniquement le long de nos autoroutes les plus fréquentées, qui constituent peut-être la principale préoccupation en matière de sécurité humaine (Frair et al. 2008, Matos et al. 2012, Series et al. 2021). Le loup rouge est une espèce qui se prête bien à l'étude de **ce concept**, car il s'agit d'une espèce menacée dont l'aire de répartition à l'état sauvage est très limitée, et pour laquelle des registres détaillés sont tenus sur presque tous les individus sauvages. **Cela signifie que les animaux tués par des véhicules sont susceptibles d'être recensés partout, quels que soient le type de route, le volume de circulation ou l'entité responsable de l'entretien routier et de l'enlèvement des carcasses.**

Bien que nous n'ayons pas eu accès aux données de déplacement ni aux traversées routières réussies des loups rouges, les mortalités routières de ces derniers indiquent des traversées infructueuses et la présence d'une barrière, du moins pour les individus tués lors d'une collision. Nous savons toutefois que les loups gris (*Canis lupus*) ont tendance à éviter les autoroutes les plus fréquentées (Musiani et al. 2010, De Feudis et al. 2025). **La théorie dominante est que la mortalité routière de la faune sauvage augmente avec l'augmentation du volume de trafic, mais seulement jusqu'à un certain point (Seiler 2003). Lorsque le volume de trafic devient suffisamment élevé, les animaux choisissent de plus en plus de ne plus traverser l'autoroute.** Comme moins d'animaux tentent de traverser, la mortalité routière diminue. Il convient de noter qu'il existe de profondes différences entre les espèces quant

aux niveaux de volume de trafic qui influencent leur propension à s'approcher et à traverser une autoroute (Blanco et al. 2005, Waller et Servheen 2005, Coe et al. 2015, Huijser et Bell 2025). Nous avons étudié comment le volume de trafic le long de différentes routes et portions de route de la région est associé à la mortalité routière des loups rouges. En combinant ces données avec la longueur des routes entrant dans une certaine catégorie de volume de trafic, cela nous a permis d'identifier les portions de route présentant une concentration relativement élevée de mortalité routière des loups rouges, et où la mise en œuvre de mesures d'atténuation pourrait s'avérer la plus efficace pour réduire au maximum la mortalité routière sur la plus courte longueur de route concernée.

Nous avons non seulement étudié les schémas temporels et spatiaux de la mortalité routière des loups rouges, mais nous avons également identifié les tronçons routiers situés à proximité des couples reproducteurs et de leur progéniture. Si le mâle ou la femelle reproducteur(trice) est tué(e) alors que les juvéniles dépendent encore de leurs parents, cela met en péril toute la portée. **De plus**, si les jeunes ne survivent pas au moins jusqu'à leur dispersion (en moyenne vers l'âge de 15 mois ; Karlin et Chadwick 2012), ils ne contribuent pas à améliorer la viabilité ni à étendre l'aire de répartition occupée par la population. Bien sûr, la survie des loups rouges reste également importante après la dispersion des jeunes. **Cependant**, les jeunes en phase de dispersion peuvent parcourir de longues distances (par exemple, plusieurs dizaines de kilomètres ; Karlin et Chadwick 2012) et sont exposés à des risques le long de pratiquement n'importe quelle route ou portion de route sur une très vaste zone. **En revanche**, le mâle et la femelle reproducteurs sont susceptibles de rester dans leur domaine vital centré autour de la tanière. **Par conséquent**, réduire le risque de mortalité routière à proximité des lieux de naissance est également susceptible de contribuer à la survie à long terme du couple reproducteur, leur permettant ainsi de produire des portées supplémentaires au cours des années suivantes.

MATERIEL et METHODES

Zone d'étude

La zone ENC RW comprend des terres fédérales, d'État et privées situées dans les comtés de Beaufort, Dare, Hyde, Tyrrell et Washington, sur la péninsule d'Albemarle en Caroline du Nord (Fig. 1). Les principales autoroutes sont l'US Highway 64, l'US Highway 264, la Highway 94 et la Highway 45 (Fig. 1). Nous avons également indiqué sur la carte certaines routes à faible trafic en raison de leur proximité avec des lieux de mortalité routière ou des lieux de naissance de loups rouges.

Causes de mortalité

Nous avons analysé les données sur la mortalité des loups rouges, fournies par l'USFWS, dans la zone ENC RWP. Le cas de mortalité le plus ancien répertorié dans ces données remonte au 29 avril 1987, et le plus récent au 27 juin 2022. Les données comprennent les enregistrements de tous les loups rouges dont on sait qu'ils sont morts, leur cause de décès (y compris les causes inconnues) et les coordonnées du lieu où le décès s'est produit. Presque tous les loups rouges de la population sauvage sont répertoriés et font l'objet d'un suivi, qu'il s'agisse de savoir s'ils sont encore en vie ou de déterminer où, quand et comment ils sont morts (par exemple, grâce à des colliers GPS ou à des observations directes effectuées par le personnel de l'USFWS).

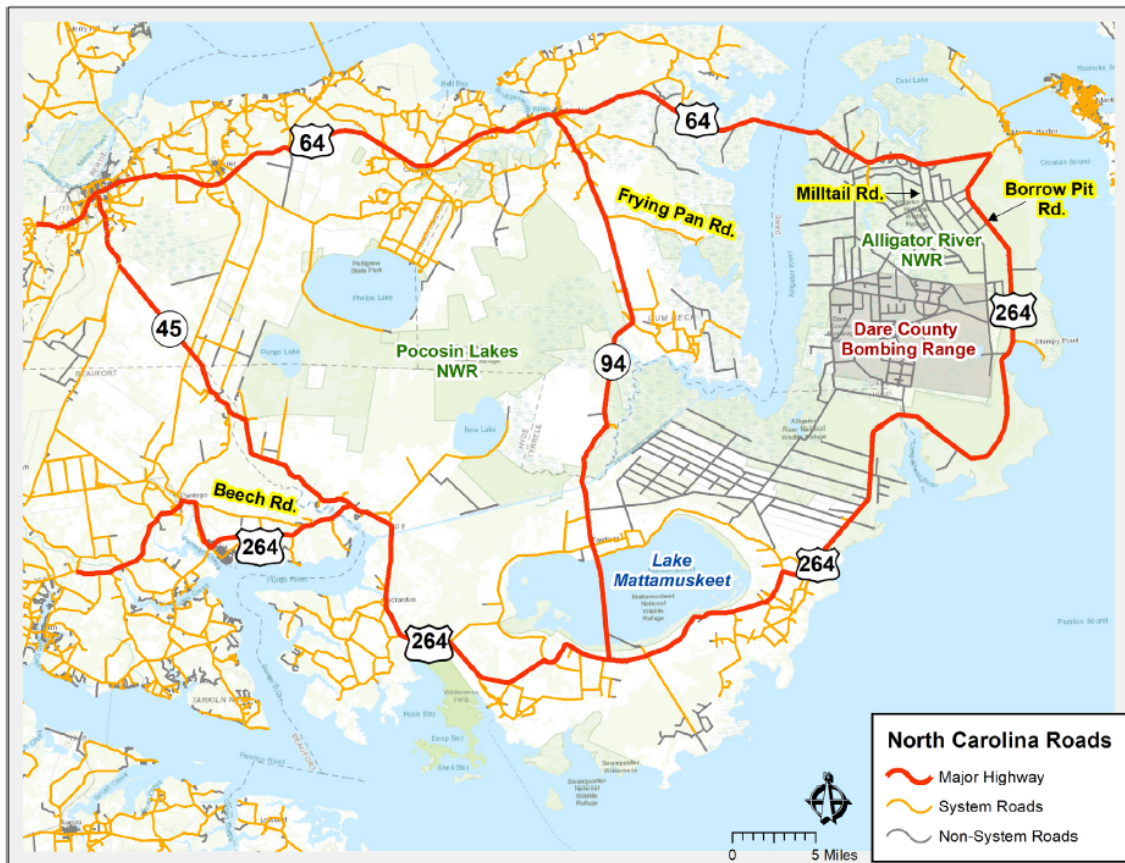


Figure 1. La zone d'étude située sur la péninsule d'Albemarle, en Caroline du Nord (États-Unis), avec les réserves naturelles, les autoroutes principales, les routes secondaires les plus importantes et les autres zones mentionnées dans cet article

Le fichier de données comportait deux paramètres relatifs à la cause de mortalité : **1)** la cause de mortalité telle qu'évaluée sur le terrain ; et **2)** la cause de mortalité établie à l'issue d'une autopsie officielle. **Cependant**, toutes les carcasses n'ont pas été envoyées au laboratoire pour y subir une autopsie officielle. Nous avons combiné ces deux paramètres en un seul paramètre de mortalité selon le protocole suivant : s'il existait un résultat d'autopsie officielle, nous avons alors utilisé cette cause de mortalité. Si aucun résultat d'autopsie officielle n'était répertorié, nous avons alors utilisé la cause de mortalité évaluée sur le terrain. Ce nouveau paramètre de mortalité a été analysé pour déterminer le nombre de loups rouges par cause de mortalité, les chiffres de mortalité par mois et la mortalité par rapport à la taille de la population. Nous avons synthétisé les chiffres de mortalité pour les différents types de mortalité d'origine humaine et les causes naturelles de mortalité. Pour les causes de mortalité les plus courantes, nous avons étudié les différences potentielles dans les chiffres de mortalité au fil des mois de l'année à l'aide d'un test χ^2 . Afin d'étudier le nombre de décès dus à différentes causes, corrigé en fonction de la taille de la population, nous avons d'abord synthétisé la taille de la population de loups rouges de la zone ENC RWP à la fin de chaque année civile, estimée par l'USFWS (2025). Pour certaines années, il n'existait pas de chiffre unique, mais une fourchette (minimum-maximum) pour la taille estimée de la population. Lorsqu'une fourchette était la seule donnée disponible, la moyenne des estimations minimale et maximale de la taille de la population a été utilisée. Nous avons eu recours à une analyse de covariance pour étudier l'effet des types de mortalité les plus courants (variable factorielle) sur les chiffres de mortalité, corrigés en fonction de l'année civile et de la taille de la population (deux covariables).

Zones à forte mortalité routière

Au total, 91 collisions entre des loups rouges et des véhicules ont été signalées entre le 29 avril 1987 et le 27 juin 2022. Nous avons cartographié tous les cas de mortalité routière pour lesquels des coordonnées étaient disponibles (89 sur les 91 cas) afin d'identifier les tronçons routiers présentant les plus fortes concentrations de collisions entre loups rouges et véhicules, quel que soit le type de route ou le revêtement routier. Pour identifier les zones à forte mortalité routière, nous avons réalisé une analyse de densité par noyau à l'aide d'ArcGIS 10.6.1 (ESRI 2018) sur les entités ponctuelles correspondant aux lieux de collision entre des loups rouges et des véhicules, en utilisant une taille de cellule de 25 m. La taille de cellule de 25 m est relativement fine, mais permet néanmoins de tenir compte de certaines imprécisions spatiales dans les coordonnées GPS. L'analyse de densité par noyau calcule la densité des accidents mortels sur la route dans un voisinage autour de chaque cellule et repose sur la fonction de noyau quartique décrite par Silverman (1986). Nous avons fixé le rayon de recherche du voisinage à 1 000 m.

Sur une route rectiligne, cela signifie que les cas de mortalité routière de loups rouges situés jusqu'à 1 000 m de distance sont inclus dans l'analyse de densité pour chaque cellule. Afin de faciliter l'interprétation des résultats des analyses de densité par noyau et d'identifier les points chauds, nous avons représenté le résultat raster à l'aide d'une classification sous forme de carte thermique, avec des densités variables de mortalité routière des loups rouges. Nous avons utilisé des tranches de pourcentage pour créer cinq catégories (< 5, 5-< 25, 25-< 50, 50-< 75 et 75-100%) qui vont des zones présentant les densités les plus élevées de mortalité routière des loups rouges (< 5) aux zones présentant les densités les plus faibles (75-100%).

Volume de trafic en relation avec la mortalité routière

Les données relatives au volume de trafic (trafic quotidien annuel moyen, AADT) ont été obtenues pour les routes principales de la zone de l'ENC RWP (NCDOT 2023). La plupart des données sur le volume de trafic dataient de 2021, mais pour certaines routes secondaires, les données les plus récentes provenaient d'années antérieures (les données les plus anciennes dataient de 2012) (NCDOT 2023). Toutes les routes revêtues entretenues par le Département des transports de Caroline du Nord (NCDOT) (c'est-à-dire les « routes du réseau ») situées au plus près des cas enregistrés de mortalité routière de loups rouges et au plus près de l'aire de répartition historique des couples reproducteurs dans la zone du programme de réintroduction des loups rouges de l'ENC ont été sélectionnées pour des analyses plus approfondies visant à déterminer où surviennent les cas de mortalité routière des loups rouges par rapport au volume de trafic, indépendamment de la date à laquelle ces décès se sont produits ou de la présence de couples reproducteurs depuis le début de la réintroduction. Une mise en garde s'impose concernant cette analyse : les loups rouges n'ont jamais été répartis de manière homogène sur l'ensemble de la zone et la taille de la population a également connu des fluctuations importantes. **Ainsi**, tous les tronçons routiers inclus dans l'analyse n'ont pas présenté le même niveau d'exposition aux loups rouges. **Cependant**, la durée de vie des mesures d'atténuation s'étend sur plusieurs décennies, voire de nombreuses décennies (la durée de vie des clôtures pour la faune sauvage est de 25 ans, celle des passages à niveau de 75 ans) (Huijser et al. 2009). Il est donc important d'utiliser un ensemble de données exhaustif couvrant une longue période (ici 1987-2022) pour projeter la présence et l'abondance possibles de la mortalité routière à long terme, plutôt que de fonder les recommandations d'atténuation uniquement sur la situation actuelle. Bien entendu, cela n'est

valable que s'il n'y a pas eu de changements majeurs dans l'occupation des sols entre-temps. La zone d'étude comprend de vastes étendues faisant partie de plusieurs réserves naturelles, ainsi qu'un champ de tir aérien. L'occupation des sols dans ces zones est stable depuis plusieurs décennies. Les villes et villages répartis sur la majeure partie de la zone d'étude sont très petits et ne semblent pas avoir beaucoup grandi au cours des dernières décennies, voire pas du tout. La plupart des aménagements dans la région au sens large se sont concentrés plus à l'ouest, le long de l'autoroute Américaine 64, et plus à l'est, le long de la côte atlantique. Deux des 91 cas de mortalité routière recensés ne comportaient pas de coordonnées, et 11 cas se sont produits sur des routes hors réseau, telles que des routes en gravier ou en terre. Il restait donc 78 cas enregistrés de mortalité routière de loups rouges associés à des coordonnées correspondant à des routes du réseau routier. Pour les routes du réseau sélectionnées, chaque tronçon routier a été divisé en segments de 0,1 mile (160,9 m) et chaque segment a été associé à son trafic journalier moyen (AADT). Le nombre de cas de mortalité routière de loups rouges sur les routes du réseau a été comptabilisé pour différentes catégories de volume de trafic. **De plus**, le nombre de segments routiers de 0,1 mile pour chaque catégorie de volume de trafic a été recensé, en distinguant les segments routiers sur lesquels des cas de mortalité routière de loups rouges avaient été enregistrés de ceux sur lesquels aucun cas n'avait été signalé. Cela a permis de calculer la proportion de loups rouges tués sur la route pour chaque catégorie de volume de trafic, par rapport à ce à quoi on pourrait s'attendre si le volume de trafic n'avait aucun impact sur la mortalité routière des loups rouges.

Lieux de naissance par rapport aux routes

Les tronçons d'autoroute qui traversent ou se trouvent à proximité des territoires des couples reproducteurs revêtent une grande importance pour les mesures d'atténuation. Pour que la population de loups rouges se reconstitue, la survie des individus reproducteurs et de leur progéniture est essentielle. Dans le cadre de cette analyse, nous avons cherché à déterminer où se trouvaient les plus fortes concentrations de lieux de naissance de loups roux entre le 28 avril 1988 et le 8 avril 2016. Au total, 707 lieux de naissance de loups rouges ont été signalés (données fournies par l'USFWS). Comme presque tous les loups rouges et tous les couples reproducteurs de la population sauvage sont répertoriés (par exemple grâce à des colliers GPS ou à des observations directes par le personnel de l'USFWS), les sites de reproduction et la progéniture des couples reproducteurs ont également été minutieusement enregistrés par le personnel de l'USFWS. À l'instar de l'analyse des points chauds de mortalité routière, nous avons réalisé une analyse de densité par noyau afin de générer une carte des points chauds correspondant aux lieux de naissance. Étant donné que la population de loups rouges a connu un déclin important entre 2014 et 2022, on peut s'attendre à ce que la plupart des points chauds de lieux de naissance signalés soient historiques plutôt qu'actuels. Néanmoins, ces points chauds indiquent la qualité de l'habitat où les loups rouges en dispersion ont pu trouver des partenaires, établir des territoires et se reproduire avec succès.

Afin de déterminer quels tronçons routiers du réseau étaient les plus proches des lieux de naissance, les tronçons routiers sélectionnés ont été divisés en segments de 0,1 mile (160,9 m). Chaque lieu de naissance a été projeté sur le segment routier de 0,1 mile le plus proche d'une route du réseau. Trois distances de recherche ont été utilisées pour les lieux de naissance, quel que soit le côté de la route où se trouvait le lieu de naissance : **1)** jusqu'à 500 m, **2)** jusqu'à 1 000 m et **3)** jusqu'à 1 500 m.

Ces trois distances se situent largement dans le rayon moyen du domaine vital du loup rouge (4,7 km pour les loups rouges sédentaires) (Hinton et al. 2016). Les lieux de naissance situés à des distances de recherche plus courtes indiquent un danger accru lié à la circulation routière pour les loups rouges reproducteurs et leur progéniture. Le nombre de lieux de naissance projetés sur chaque segment routier de 0,1 mile a été comptabilisé. Les segments routiers de 0,1 mile présentant le plus grand nombre de lieux de naissance proches de la route peuvent être considérés comme particulièrement préoccupants pour les loups rouges reproducteurs et leur progéniture, que des cas de mortalité routière de loups rouges y aient été observés ou non par le passé. Les cartes peuvent également être interprétées au-delà des segments routiers de 0,1 mile. Si différents segments routiers de 0,1 mile proches les uns des autres présentent un nombre total élevé de lieux de naissance projetés, ces tronçons routiers peuvent alors représenter un danger similaire pour les loups rouges reproducteurs et leur progéniture.

Tableau 1. Fréquence des différentes causes de mortalité chez les loups rouges (1987-2022). Lorsqu'une cause de mortalité représentait moins de 5% du nombre total de décès, elle a été regroupée avec d'autres causes de mortalité

Mortality cause	Mortalities (n)	Mortalities (%)
Human-caused		
Gunshot	122	25.90
Vehicle	91	19.32
Management	33	7.01
Other (private trap, poison, foul play)	42	8.92
Subtotal human-caused	288	61.15
Natural		
Intraspecific	25	5.31
Other (health, natural, drowned, fire)	51	10.83
Subtotal natural	76	16.14
Unknown		
Unknown	94	19.96
Other (euthanized, injuries)	13	2.76
Subtotal unknown	107	22.72
Total	471	100.00

RESULTATS

Causes de mortalité

Entre le 29 avril 1987 et le 27 juin 2022, le nombre total de décès de loups rouges signalés et recensés à l'état sauvage s'élevait à 471. Les décès d'origine humaine (61,15%) ont été signalés beaucoup plus fréquemment que les décès naturels (16,14%) (Tableau 1). Les causes de mortalité inconnues, y compris les cas où il était difficile de déterminer si la cause était d'origine humaine ou naturelle, représentaient 22,72%. Les coups de feu (25,90%) et les collisions avec des véhicules (19,32%) étaient de loin les causes de décès connues les plus fréquemment signalées (Tableau 1).

En excluant les années 1987 et 2022, qui ne figuraient pas dans leur intégralité dans la base de données sur la mortalité, le pourcentage moyen annuel de décès par **coup de feu** par rapport au nombre total de décès signalés était de 23,96% (écart-type = 21,42). Le pourcentage moyen annuel de décès par collision avec un véhicule par rapport au nombre total de décès signalés était de 22,67% (écart-type = 17,31).

Mortalité par mois

En excluant les années 1987 et 2022, qui ne sont pas des années complètes dans la base de données sur la mortalité, la fréquence des décès par **arme à feu** présentait une différence significative entre les mois de l'année ($\chi^2(df = 11, n = 120) = 55,74, p < 0,001$). **Les décès par arme à feu étaient les plus nombreux d'octobre à décembre** (Fig. 2). Il n'y avait pas de différence significative entre les mois de l'année en ce qui concerne les collisions avec des véhicules ($\chi^2(df = 11, n = 90) = 6,23, p = 0,857$) ni les autres causes de mortalité combinées ($\chi^2(df = 11, n = 252) = 6,25, p = 0,856$).

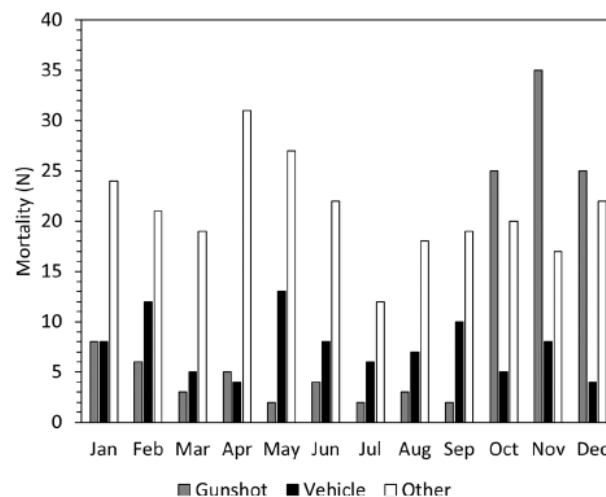


Figure 2. Mortalité des loups rouges dans la population sauvage (de 1988 à 2021, $n_{\text{total}} = 462$) par mois, due à des coups de feu, des collisions avec des véhicules et d'autres causes

Mortalité par rapport à la taille de la population

De manière générale, la taille de la population de loups rouge a augmenté entre 1987 et 2000, est restée relativement stable entre 2001 et 2014 (entre 81 et 110 individus à la fin de chaque année civile), puis a fortement diminué par la suite (Fig. 3). Bien que la taille de la population ait été très faible entre 2019 et 2022, elle semblait se stabiliser autour de 18 à 20 individus (Fig. 3). Les chiffres de mortalité des loups rouges présentaient des différences significatives selon les différentes causes de mortalité (coups de feu (en moyenne 3,39 par an) contre collisions avec des véhicules (en moyenne 2,53 par an) contre autres causes (en moyenne 7,17 par an)) ($F(2,108) = 31,69, p < 0,001$) après correction pour tenir compte de la taille de la population ($F(1,108) = 58,89, p < 0,001$) (analyse de covariance). L'année civile n'a pas eu d'impact significatif sur les chiffres de mortalité des loups rouges ($F(1,108) = 0,10, p = 0,757$) (analyse de covariance). En excluant les années 1987 et 2022, qui ne figuraient pas dans leur intégralité dans la base de données sur la mortalité, le pourcentage moyen annuel de mortalité par balle par rapport à la taille estimée de la population était de 4,95% (écart-type = 3,58). Le pourcentage annuel moyen de mortalité par collision routière par rapport à la taille estimée de la population était de 5,38% (écart-type = 5,21).

Zones à forte mortalité routière

Bien que les collisions avec des loups rouges soient répandues le long des grandes autoroutes ainsi que sur les routes secondaires dans toute la zone du programme de rétablissement de l'ENC, **six tronçons routiers présentent une concentration de collisions dans les deux catégories de densité les plus élevées** (orange et rouge) (Fig. 4) : 1) L'autoroute US 64

traversant la réserve naturelle nationale d'Alligator River (Alligator River NWR) et les zones adjacentes (plus précisément aux abords de Lake Neighborhood Rd/River Rd et Buffalo City Rd, aux abords de Milltail Rd, juste à l'ouest de la jonction avec l'autoroute US 264) ; 2) l'autoroute US 264 aux abords de Long Shoal River/Stomper Rd ; 3) l'autoroute US 264 au nord d'Engelhard ; 4) la route 94 entre Columbia et Northwest Fork Alligator River, ainsi que Frying Pan Rd ; 5) la route 94 au nord de Fairfield ; et 6) Beech Ridge Rd au nord de Belhaven.

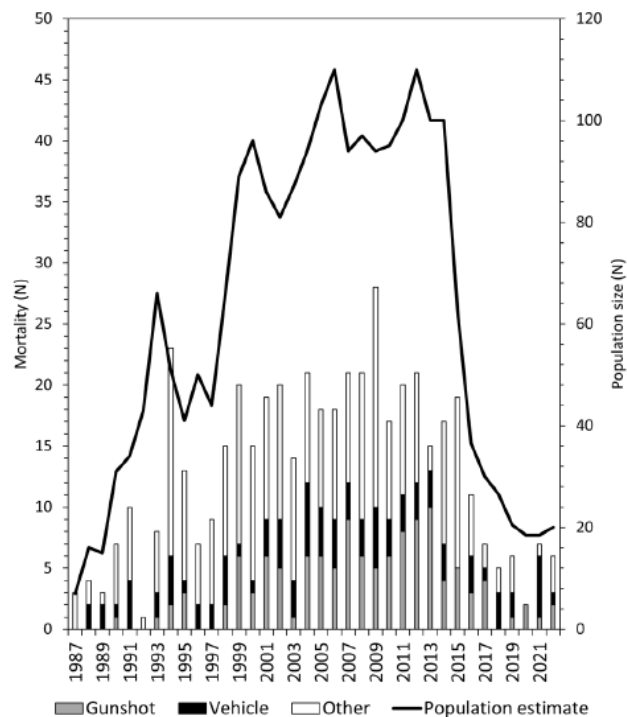


Figure 3. Mortalité annuelle due aux coups de feu, aux collisions avec des véhicules et à d'autres causes entre 1987 et 2022 (barres du graphique) et estimation de la taille de la population de loups rouges à la fin de chaque année (ligne du graphique)

Volume de trafic par rapport à la mortalité routière

L'autoroute US 64 présente le volume de trafic le plus élevé de toutes les routes de la région, allant d'environ 4 000 véhicules par jour près de la côte jusqu'à 8 700 véhicules par jour vers l'extrémité ouest de la région (informations complémentaires). Les autres autoroutes et tronçons routiers de la région présentaient un volume de circulation nettement inférieur, allant de quelques centaines de véhicules par jour à environ 1 000 ou 2 000 véhicules par jour. Les zones à forte mortalité routière des loups rouges se situaient aussi bien le long de l'autoroute la plus fréquentée (autoroute US 64, en particulier à travers la réserve naturelle nationale d'Alligator River) que le long de routes enregistrant environ 1 000, voire seulement quelques centaines de véhicules par jour. La catégorie de trafic comprise entre 101 et 500 véhicules par jour a enregistré davantage de cas de mortalité routière chez les loups rouges ($n = 26$, soit 33,33% de l'ensemble des cas de mortalité routière signalés sur les routes du réseau) que les autres catégories de trafic (Fig. 5). Dans l'ensemble, la plupart des cas de mortalité routière chez les loups rouges ($n = 72$, soit 92,31% de l'ensemble des cas signalés sur les routes du réseau) se sont produits sur des routes enregistrant entre 101 et 5 000 véhicules par jour (Fig. 5).

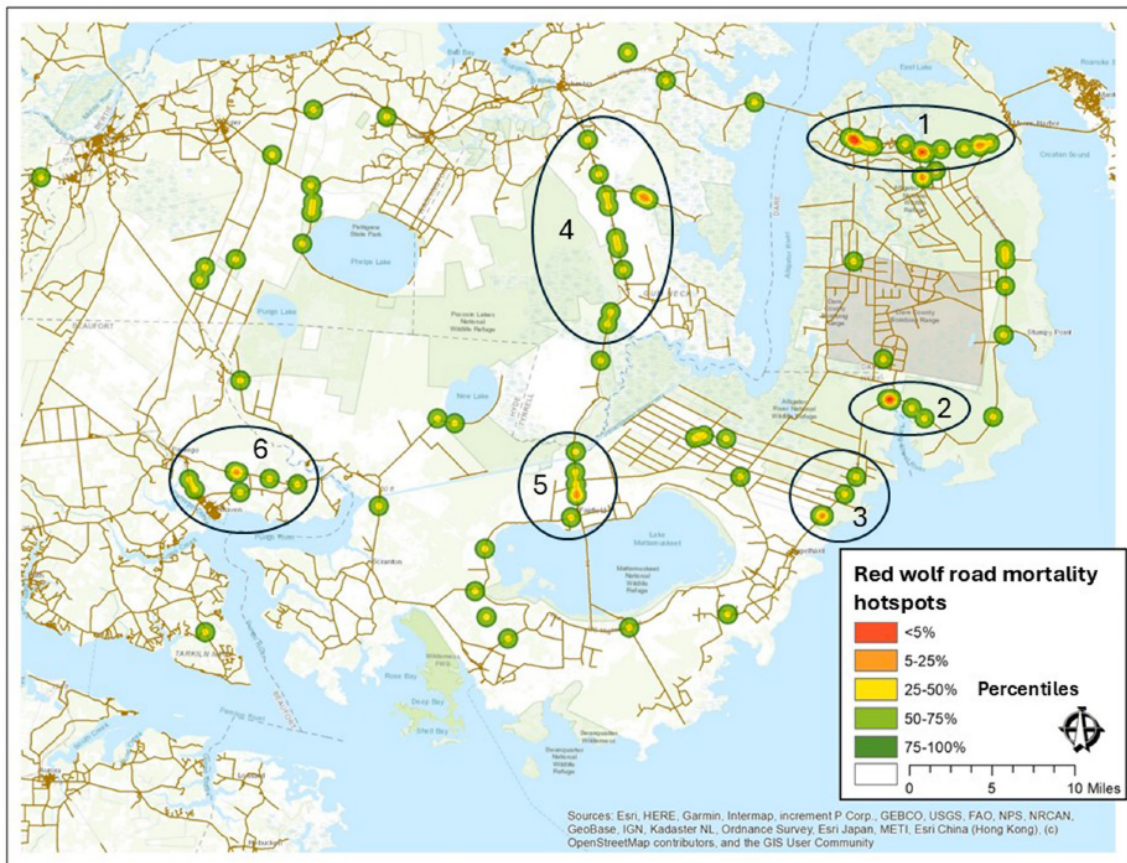


Figure 4. Percentiles des zones de forte densité (méthode du noyau) correspondant aux collisions entre des loups rouges et des véhicules (1987-2022). Les six chiffres correspondent aux descriptions figurant dans le corps du texte

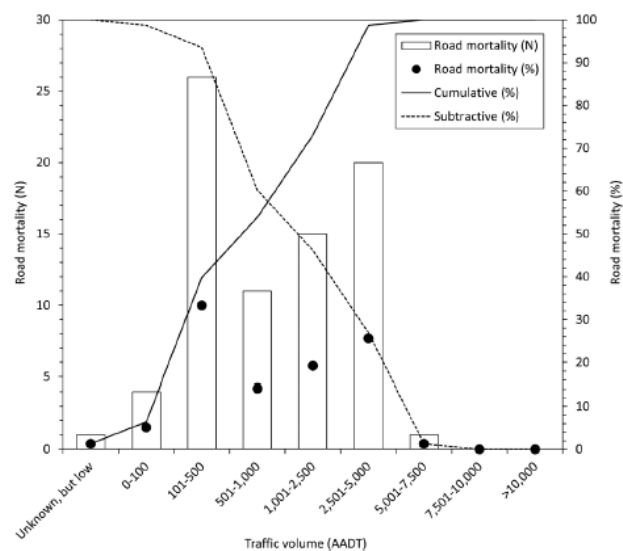


Figure 5. Nombre de loups rouges tués sur les routes (barres, axe des y de gauche) pour les différentes catégories de volume de trafic (trafic journalier annuel moyen, TJAM) et pourcentage du total des mortalités routières sur les routes du réseau que ces chiffres représentent (lignes, axe des y de droite). Les deux lignes montrent quel pourcentage des mortalités serait pris en compte si les mesures d'atténuation commençait soit par les routes à volume de trafic le plus élevé (approche soustractive), soit par celles à volume de trafic le plus faible (approche cumulative)

Proportionnellement, si l'on tient compte de la longueur des tronçons routiers relevant des différentes catégories de volume de circulation, ce sont les routes enregistrant un trafic

compris entre 2 501 et 5 000 véhicules par jour qui ont affiché le taux le plus élevé de mortalité routière observée chez les loups rouges (Fig. 6). Le nombre de décès de loups rouges sur les tronçons routiers de cette catégorie de trafic était 2,34 fois plus élevé que ce à quoi on aurait pu s'attendre si le volume de trafic n'avait pas influencé la mortalité routière. Cela signifie que la mise en œuvre de mesures d'atténuation le long des routes présentant un volume de trafic compris entre 2 501 et 5 000 véhicules par jour serait la plus efficace, permettant de réduire le plus grand nombre de décès de loups rouges sur la plus courte longueur de route concernée par ces mesures. Les catégories de volume de circulation comprises entre 0 et 2 500 véhicules par jour présentaient des taux de mortalité routière des loups rouges à peu près proportionnels à la longueur de leurs routes (Fig. 6). Les catégories de volume de circulation les plus faibles et les plus élevées enregistraient proportionnellement très peu de décès de loups rouges sur les routes ; c'est donc là que les mesures d'atténuation seraient les moins efficaces, le nombre de décès de loups rouges sur les routes étant le plus faible par rapport à la longueur de route traitée.

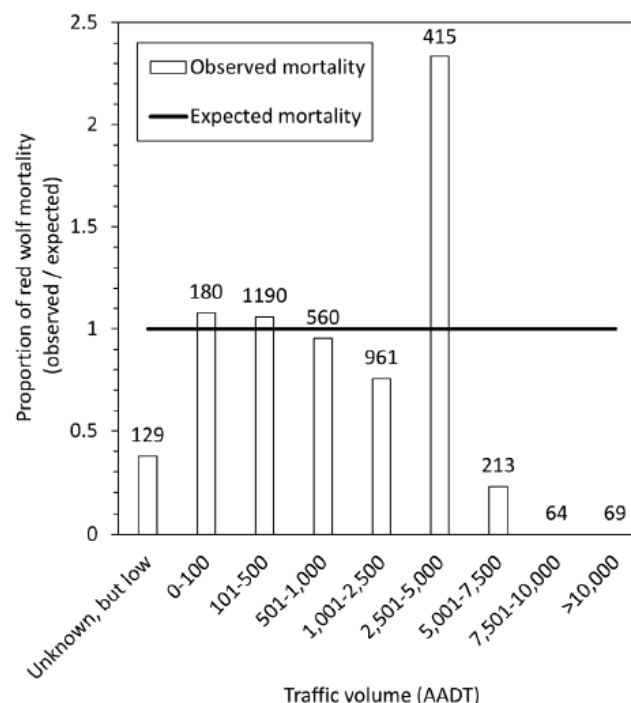


Figure 6. Proportion de la mortalité routière observée chez les loups rouges pour chaque catégorie de volume de circulation, comparée à ce à quoi on pourrait s'attendre si les loups rouges étaient percutés de manière proportionnelle dans les différentes catégories de volume de circulation. Le nombre total de tronçons routiers de 0,1 mile pour chaque catégorie de volume de circulation, qu'une mortalité routière de loups rouges ait été observée ou non sur ces tronçons, est indiqué au-dessus des barres. Ce nombre correspond à la taille de l'échantillon pour chaque catégorie de volume de circulation

Lieux de naissance

Les tronçons routiers situés à proximité de lieux de naissance à forte concentration comprennent : **1)** l'autoroute US 64 près de Milltail Rd, juste à l'ouest de la jonction avec l'autoroute US 264 ; **2)** (a) l'autoroute US 264 au nord de Link Rd/Borrow Pit Rd, (b) au nord d'Engelhard, (c) près de New Holland et au sud du lac Mattamuskeet, et (d) à l'est de Belhaven ; **3)** l'autoroute 94 au nord de Frying Pan Rd et au sud de Frying Pan Rd, et **4)** aux alentours de Kilkenny (Fig. 7).

Il convient de noter qu'il existe d'autres tronçons routiers, situés le long de routes revêtues à faible trafic, qui se trouvent également à proximité de zones présentant une forte concentration de lieux de naissance. Citons par exemple : 5) Frying Pan Rd ; 6) l'autoroute 45 au nord de la rivière Pungo ; 7) Beech Ridge Rd ; 8) Piney Woods Rd, le long de la rive ouest du lac Mattamuskeet ; et 9) North Lake Rd, le long de la rive nord du lac Mattamuskeet (Fig. 7).

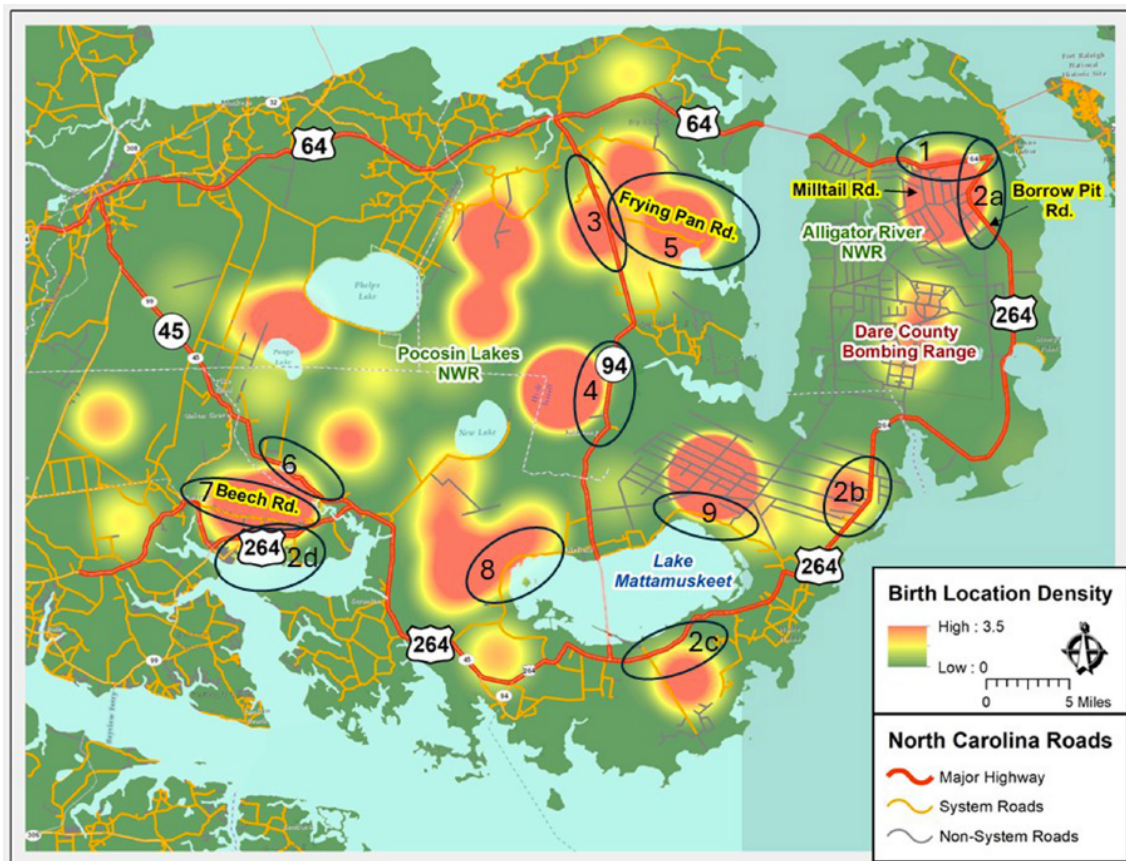


Figure 7. Lieux de naissance des loups rouges mis en évidence par l'analyse de densité par noyau (1987-2022), ainsi que les deux principales zones dépourvues d'autoroutes majeures (la réserve naturelle nationale de Pocosin Lakes et ses environs, et la réserve naturelle nationale d'Alligator River et ses environs), les zones de concentration des lieux de naissance des loups rouges étant séparées par l'autoroute 94

Il existe deux vastes zones contiguës dépourvues de grandes autoroutes, séparées par l'autoroute 94, qui présentent le plus grand nombre de zones à forte concentration de lieux de naissance et qui peuvent servir de source pour la colonisation ou la recolonisation d'autres zones potentiellement plus petites et plus isolées : 1) la réserve naturelle nationale de Pocosin Lakes et ses environs (sept zones de concentration de lieux de naissance à l'ouest de l'autoroute 94) ; et 2) la réserve naturelle nationale d'Alligator River et ses environs (six zones de concentration de lieux de naissance à l'est de l'autoroute 94) (Fig. 7). **Par conséquent**, la mise en place de passages sécurisés le long de l'autoroute 94 permettrait de relier le plus grand nombre de zones de concentration de lieux de naissance situées de part et d'autre de cette autoroute dans la zone d'étude.

Les tronçons routiers de 0,1 mile présentant le plus grand nombre de lieux de naissance à proximité de la route (Fig. 8, Tableau 2) peuvent être considérés comme très préoccupants pour les loups rouges reproducteurs et leur progéniture, qu'il y ait eu ou non des cas de

mortalité routière de loups rouges à ces endroits par le passé. Si l'autoroute américaine 64, aux abords de Milltail Rd, est proche de nombreux lieux de naissance, des routes à faible trafic telles que Frying Pan Rd et Beech Ridge Rd représentent une menace similaire pour les couples reproducteurs historiques et leur progéniture (Fig. 8, Tableau 2).

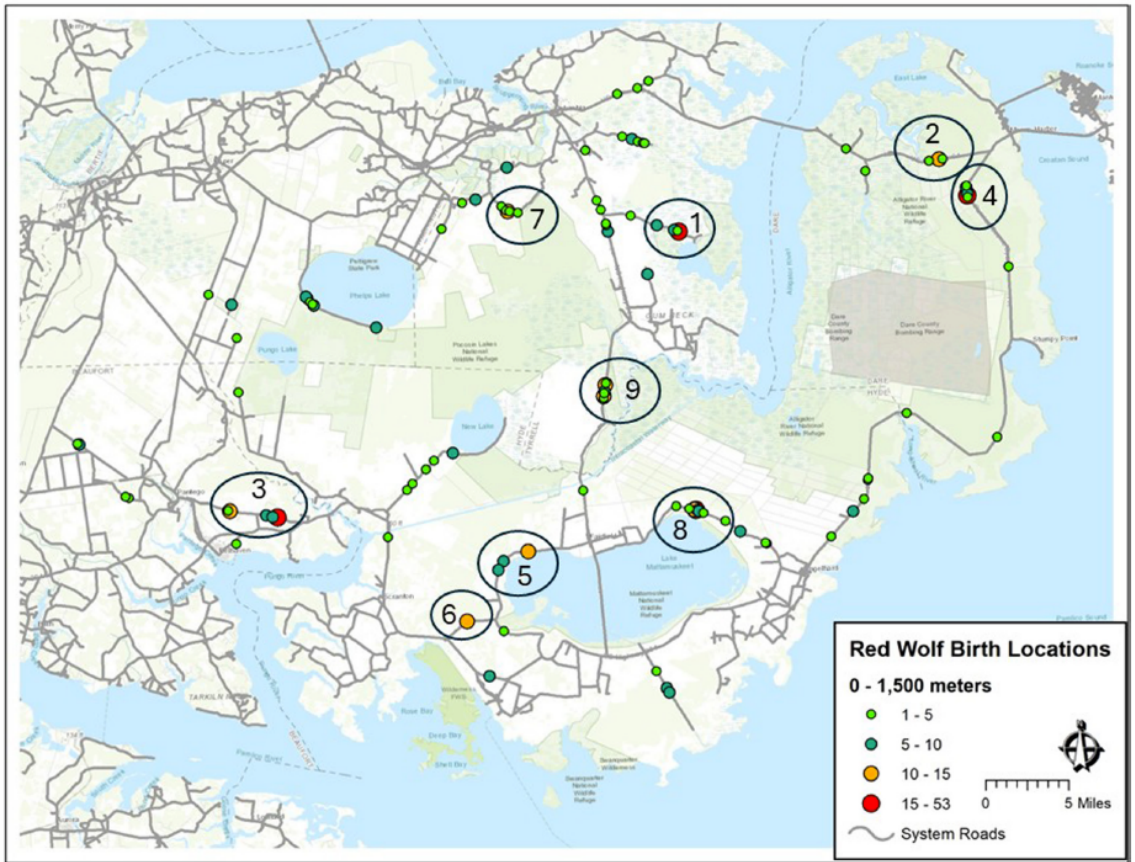


Figure 8. Nombre de lieux de naissance de loups rouges projetés sur le tronçon routier le plus proche (au 0,1 mile près), jusqu’à 1 500 m, quel que soit le côté de la route. Les ovales numérotés indiquent les tronçons routiers sur lesquels au moins 10 lieux de naissance de loups rouges ont été projetés (Tableau 2). Les cartes indiquant les lieux de naissance projetés sur le tronçon routier le plus proche jusqu’à 500 et 1 000 m sont incluses dans les informations complémentaires

Tableau 2. Tronçons routiers comportant au moins un segment de 0,1 mile sur lequel ont été localisés au moins 10 lieux de naissance de loups rouges. L'ordre des lieux dans le tableau correspond aux ovales numérotés de la Figure 8

Location description	≤ 500 m	≤ 1000 m	≤ 1500 m
Frying Pan Rd	X	X	X
US Highway 64, Milltail Rd area	X	X	X
Beech Ridge Rd	X	X	X
US Highway 264, landfill area		X	X
SR 1305, Piney Woods Rd, NW of Lake Mattamuskeet		X	X
SR 1304, Turnpike Rd, W of Lake Mattamuskeet			X
SR 1105, Newlands Rd, SW of Columbia			X
SR 1311, N. Lake Rd, NE of Lake Mattamuskeet			X
Highway 94, N of junction with Kilkenny Rd			X

DISCUSSION

L'importance de lutter contre la mortalité routière

Parmi tous les cas de mortalité signalés chez le loup rouge, les coups de feu et les collisions avec des véhicules constituaient les causes de décès les plus fréquemment rapportées. Le pourcentage moyen annuel de mortalité par coup de feu et par collision avec un véhicule, par rapport au nombre total de décès signalés, était très similaire. Pour ces deux causes de

mortalité, les pourcentages annuels moyens par rapport à la taille estimée de la population étaient également très similaires. Aucune tendance saisonnière significative n'a été observée pour les décès dus aux collisions avec des véhicules, mais les décès par balle ont été les plus nombreux d'octobre à décembre, ce qui coïncide avec la saison de chasse au cerf (à la poudre noire et au fusil) (conformément à Agan et al. 2021a, North Carolina Wildlife Resources Commission, 2026). Ces deux causes de mortalité sont d'origine non naturelle et ont contribué au grave déclin de la population en l'absence de nouvelles réintroductions de loups rouges entre 2010 et 2019 (USFWS 2023). Conjuguées à d'autres causes de mortalité, elles ont entraîné une taille de population critique et un risque élevé d'extinction, au moins jusqu'à la reprise des réintroductions en 2020. En l'absence de nouveaux lâchers, les abattages illégaux et la mortalité routière se sont avérés trop élevés pour que la population reste stable (Hinton et al. 2017b). **Cela suggère** que des initiatives visant à réduire considérablement à la fois les abattages illégaux et la mortalité routière sont essentielles pour que la population de loups rouges puisse, à terme, devenir indépendante d'une gestion intensive. Comme ces causes de mortalité ne représentent encore qu'un peu moins de la moitié de la mortalité connue, une réduction substantielle des abattages illégaux et de la mortalité routière ne garantit pas nécessairement une population autosuffisante. **Néanmoins, une réduction substantielle des abattages illégaux et de la mortalité routière est une condition préalable à l'obtention d'une population de loups rouges plus viable.**

- **Réduire** la mortalité de 50%, en particulier les collisions avec des véhicules et la mortalité par balle, et porter le taux de stérilisation des coyotes à 10% de la population de coyotes non stérilisés, tout en éliminant 5% des coyotes, sont les mesures qui s'avéreront les plus efficaces pour favoriser l'augmentation de la population de loups rouges et minimiser l'hybridation et l'introgression avec les coyotes (USFWS 2023).
- **Réduire** de manière substantielle les abattages illégaux d'animaux sauvages nécessite des changements au niveau des valeurs humaines, des normes sociales, de la culture, des connaissances, des politiques et de l'application de la loi (Serenari et Taub 2019, Agan et al. 2021b, Santiago-Avila et al. 2022, Toth et Rubino 2024, Ghasemi et al. 2026). Ce type de **changements sociétaux** est difficile à mettre en œuvre et peut prendre beaucoup de temps, s'étendant potentiellement sur plusieurs générations humaines (Treves et Karanth 2003, George et al. 2016, Newsom et al. 2025). **Comparé à la mise en œuvre de changements sociétaux, il est relativement simple et rapide de planifier, concevoir, financer et mettre en place des mesures d'atténuation capables de réduire considérablement la mortalité routière et d'offrir des possibilités de traversée en toute sécurité.**

Il **n'est pas** certain qu'une réduction substantielle de la mortalité routière, en l'absence d'une réduction substantielle des abattages illégaux, soit suffisante pour que la population se stabilise et augmente en taille. **Par conséquent**, nous avons recommandé de modéliser l'évolution de la taille de la population pour un ensemble de scénarios dans lesquels la mortalité routière et le nombre de réintroductions varient, mais où la mortalité par balle est maintenue à un taux similaire. **Quoi qu'il en soit**, si l'objectif est de parvenir à terme à une population autosuffisante de loups rouges, il est impératif d'œuvrer à une réduction substantielle de toutes les sources de mortalité non naturelle. **Dans l'intervalle**, la poursuite des réintroductions sera probablement également nécessaire pour aider la population à se

stabiliser, à croître en nombre, à étendre son aire de répartition et à garantir une base génétique suffisamment diversifiée.

Où réduire en priorité la mortalité routière et pourquoi ?

Compte tenu de la taille extrêmement réduite de la population et de la mortalité routière persistante parmi les individus restants, il convient de s'attaquer en priorité à la mortalité routière le long de la route nationale 64 (en particulier à l'est de Milltail Rd) et dans la partie nord de la route nationale 264 (notamment la zone de la décharge au nord de Borrow Pit Rd) traversant la réserve naturelle d'Alligator River. C'est dans cette zone que le dernier couple reproducteur à l'état sauvage (c'est-à-dire en dehors d'un enclos d'acclimatation, à savoir le groupe familial de Milltail) a établi son domaine vital (Situation 2022-2023) (USFWS 2023, 2025). Au fil des ans, des adultes et des jeunes de ce groupe familial ont été tués sur ces deux tronçons routiers. **De plus**, ces deux tronçons sont situés à proximité de zones où se concentrent les lieux de naissance historiques et actuels. Une réduction substantielle de la mortalité routière le long de ces deux tronçons est susceptible d'avoir un effet bénéfique immédiat sur la conservation de ce groupe familial et, par conséquent, sur l'ensemble de la population restante de loups rouges dans la région.

Si les mesures à court terme doivent viser à protéger le couple reproducteur restant et sa progéniture, une approche à long terme plus stratégique visant à réduire la mortalité routière des loups rouges devrait s'appuyer sur les lieux où des cas de mortalité routière ont été observés par le passé et sur les concentrations historiques de lieux de naissance situés à proximité d'une route dans l'ensemble de la région. Outre l'autoroute Américaine 64 traversant la réserve naturelle nationale d'Alligator River, certains tronçons de l'autoroute Américaine 264 et de l'autoroute 94, ainsi que Frying Pan Rd, Beech Ridge Rd et les routes situées juste au nord et à l'ouest du lac Mattamuskeet figureraient également parmi les tronçons routiers prioritaires.

Le type de mesures d'atténuation

La mesure la plus efficace et la plus solide susceptible de réduire considérablement la mortalité routière des grands mammifères est l'installation de clôtures de protection de la faune. Les clôtures à faune, conçues pour les espèces cibles, peuvent empêcher les grands mammifères d'accéder à la route et réduire la mortalité routière d'au moins 80% (Huijser et al. 2016, Rytwinski et al. 2016). **Si les clôtures à faune le long des routes peuvent réduire considérablement la mortalité routière, elles transforment également un corridor routier en une barrière quasi absolue pour toute espèce incapable de franchir la clôture. C'est pourquoi les clôtures à faune sont généralement associées à des structures de passage pour la faune (c'est-à-dire des passages souterrains et des passages supérieurs)** (Clevenger et Huijser 2011). Les clôtures à faune peuvent également contribuer à guider les animaux vers ces structures de passage, augmentant ainsi leur utilisation (Gagnon et al. 2015).

Si elle est correctement conçue, une clôture pour grands mammifères dans la zone ENC RWP peut limiter l'accès à la route pour le loup roux, l'ours noir (*Ursus americanus*), le cerf de Virginie (*Odocoileus virginianus*), le coyote (*Canis latrans*) et, potentiellement, le puma (*Puma concolor*). Les caractéristiques spécifiques de la clôture pour cette diversité d'espèces comprennent : une clôture de 3 m de haut, des poteaux métalliques, un treillis métallique, une barrière anti-fouissage ou une jupe enfouie dans le sol, un surplomb au sommet de la

clôture orienté vers le côté de l'habitat, éventuellement des fils électrifiés fixés à la clôture principale du côté de l'habitat, et un fil à haute résistance au sommet dans les zones boisées (à ajuster ou à reconsidérer en combinaison avec un surplomb) (Huijser et Begley 2023).

En partant du principe que les loups rouges se comportent de manière similaire aux loups gris et compte tenu des autres espèces de grands mammifères présentes dans la région, les structures de franchissement les plus susceptibles de convenir comprennent les ponts à travée ouverte (largeur minimale de 36 m, hauteur de 3 à 4 m) et les passages supérieurs pour la faune (largeur de 50 à 70 m) (Foster et Humphrey 1995, Clevenger et Huijser 2011, Huijser et Begley 2023). Une approche très progressive vers un passage souterrain et un passage supérieur (pente maximale de 10 à 15%) est recommandée. Cela peut s'avérer particulièrement pertinent dans les paysages ouverts et plats, par rapport aux paysages présentant une végétation dense et un relief accidenté.

Les approches en pente douce peuvent avoir un impact sur la végétation naturelle, nécessitant une restauration sur place à la fois pour rétablir la végétation indigène et pour offrir un habitat continu aux espèces cibles. La structure elle-même aura probablement une durée de vie de 75 à 80 ans (Huijser et al. 2009). En cas de remplacement des ouvrages, les perturbations supplémentaires n'affectent généralement que le sol et la végétation situés au sommet d'un viaduc ou au niveau d'un passage souterrain, plutôt que sur les voies d'accès. De nombreux tronçons routiers de la zone ENC RW sont adjacents à des canaux, ce qui rend nécessaire la mise en place d'ouvrages de franchissement au-dessus de ces derniers, à l'instar de certains ouvrages destinés à la panthère de Floride (*Puma concolor coryi*) dans le sud de la Floride.

L'échelle spatiale des mesures d'atténuation

Un tronçon routier clôturé devrait au moins couvrir toute la longueur d'un point noir en matière de collisions et inclure les zones tampons adjacentes. Pour les grands mammifères en général, en particulier les grands ongulés, cela signifie que le tronçon routier clôturé devrait mesurer au moins 5 km de long (Huijser et al. 2016). Cependant, les loups rouges ont tendance à avoir des domaines vitaux plus étendus que les grands ongulés courants. Le domaine vital moyen des loups rouges résidents était de 68,4 km² selon les courbes de probabilité à 95% (Hinton et al. 2016). Pour les loups rouges de passage, la zone d'activité moyenne était de 319,2 km² selon les courbes de probabilité à 95% (Hinton et al. 2016). En supposant une forme circulaire, cela correspond à un diamètre de territoire ou de zone d'activité de 9,3 et 20,2 km, respectivement. Cela signifie que, pour les loups rouges dont le centre du territoire ou de la zone d'activité se trouve sur la route ou à proximité, les tronçons routiers clôturés devraient avoir une longueur de 10 à 20 km (hors zones tampons).

Compte tenu de l'échelle à laquelle les clôtures destinées aux loups rouges devraient être mises en place, il pourrait s'avérer plus efficace d'étendre les clôtures jusqu'aux zones voisines à fort risque de collision plutôt que de laisser de petites brèches, lesquelles peuvent également entraîner une augmentation des courses vers l'extrémité de la clôture et des collisions associées (Clevenger et al. 2001, Huijser et al. 2016). Il est logique qu'il y ait au moins une structure de franchissement adaptée aux loups rouges sur un tronçon routier clôturé de 10 à 20 km de long, car sinon, la route clôturée constituerait une barrière quasi absolue pour les loups rouges que nous cherchons à maintenir à l'écart de la route. Une structure de franchissement doit être implantée là où les loups rouges ont manifesté un intérêt pour la

traversée de la route (par exemple, aux points noirs de mortalité routière et aux lieux de traversées réussies, d'après les données obtenues auprès d'individus équipés d'un collier GPS. L'espacement entre les structures de franchissement adaptées aux loups roux n'est pas nécessairement bien défini, car il dépend des objectifs spécifiques). Les objectifs peuvent être liés aux lieux de passage actuels ou historiques, à la proximité des lieux de naissance et des domaines vitaux principaux des différents groupes familiaux, à la présence d'un habitat (de reproduction) adapté, ou à des objectifs associés à la recolonisation et à la dispersion. **Néanmoins, si un tronçon routier est clôturé pour les loups rouges sur une distance de 10 à 20 km, il devrait y avoir au moins une structure de passage adaptée aux loups rouges sur ce tronçon clôturé.**

Comment réduire le plus efficacement possible la mortalité routière des loups rouges ?

Il est important d'évaluer sur quelles routes et sur quels tronçons routiers il convient de donner la priorité aux mesures d'atténuation. D'après notre analyse de la mortalité routière des loups rouges en fonction du volume de circulation, les routes dont le volume de circulation se situait entre 2 501 et 5 000 véhicules par jour présentaient un facteur de 2,34 de mortalité routière supplémentaire chez les loups rouges par rapport à ce qui aurait été attendu si le volume de circulation n'avait aucune influence sur la mortalité routière. Les catégories de volume de circulation comprises entre 0 et 2 500 véhicules par jour présentaient des taux de mortalité routière des loups rouges à peu près proportionnels à la longueur de la route. Les catégories de volume de circulation les plus faibles et les plus élevées affichaient proportionnellement très peu de cas de mortalité routière des loups rouges ; c'est donc là que les mesures d'atténuation seraient les moins efficaces, car elles ne permettraient de réduire qu'un très faible nombre de cas de mortalité routière des loups rouges par rapport à la longueur de route concernée. Les routes dont le volume de circulation est compris entre 2 501 et 5 000 véhicules par jour concernent principalement l'autoroute américaine 64 traversant la réserve naturelle nationale d'Alligator River. Outre la protection du dernier groupe familial sauvage restant (à savoir le groupe familial de Milltail, situation 2022-2023), cela constitue une raison supplémentaire de mettre en œuvre en priorité des mesures d'atténuation le long de ce tronçon routier.

Cependant, la mortalité routière des loups rouges ne se limite pas à l'autoroute US 64. Si les mesures d'atténuation le long de l'autoroute US 64 sont très susceptibles de réduire considérablement la mortalité routière des quelques loups rouges restants, d'autres cas de mortalité routière touchant les animaux restants se produisent également le long de l'autoroute US 264, près de la décharge. À condition que la population de loups rouges recommence à croître et que son aire de répartition soit similaire à celle observée au cours des dernières décennies, des mesures d'atténuation sont également nécessaires le long de routes à faible trafic, y compris d'autres tronçons de l'autoroute US 264 et de la route 94. Si les mesures d'atténuation n'étaient mises en œuvre que le long de toutes les routes du réseau situées dans la zone ENC RW dont le trafic est compris entre 2 501 et 5 000 véhicules par jour, seules 20 des 78 (25,64%) mortalités historiques de loups rouges sur le réseau routier seraient prises en compte. En ce qui concerne plus particulièrement l'autoroute US 64, quel que soit l'endroit sur cette autoroute, seules 19 des 78 (24,36%) mortalités de loups rouges sur les routes du réseau seraient prises en compte. La mise en œuvre de mesures d'atténuation sur l'autoroute américaine 264 et la route 94 permettrait de traiter respectivement 21 cas sur

78 (26,92 %) et 15 cas sur 78 (19,23%) de mortalités historiques de loups rouges sur les routes du réseau. La mise en œuvre de **mesures d'atténuation** sur la route 94 permettrait également de relier des zones présentant une concentration relativement élevée de lieux de naissance historiques situés de part et d'autre de la route. La mise en œuvre de mesures d'atténuation sur la route nationale 94, tant pour réduire la mortalité routière que pour pallier l'effet de barrière potentiel, devrait contribuer à la formation d'une population de loups rouges sauvages plus importante et moins fragmentée. Néanmoins, une mortalité routière historique importante a également été observée sur une route à très faible trafic (par exemple, 60 AADI, Frying Pan Rd).

Plutôt que de mettre en place des mesures d'atténuation sur des routes à très faible trafic ayant un impact très élevé sur la conservation du loup rouge, on peut également remettre en question l'utilité ou l'existence même d'une telle route à très faible trafic.

Mesures de conservation sur le terrain

En décembre 2024, l'Administration fédérale des autoroutes (FHWA) a annoncé l'octroi de 25 millions de dollars US dans le cadre du programme pilote « Wildlife Crossings » pour l'installation de plusieurs passages souterrains et de clôtures à faune le long d'un tronçon de l'autoroute US 64 traversant la réserve naturelle nationale d'Alligator River (FHWA 2024). Cela profitera non seulement au loup roux, mais aussi à d'autres espèces (par exemple, l'ours noir et le cerf de Virginie). Veiller à ce que ces fonds soient affectés de manière stratégique permettra d'optimiser le retour sur investissement.

CONCLUSION

Nous avons mené des analyses temporelles et spatiales de la mortalité routière des loups rouges et de la concentration de leurs lieux de naissance à l'échelle du paysage afin d'identifier des approches stratégiques visant à réduire la mortalité routière, dans le but de stabiliser et, éventuellement, d'augmenter la population de loups rouges réintroduits en Caroline du Nord. L'analyse montre clairement que, si la mise en place immédiate de mesures d'atténuation le long de la route principale est essentielle pour protéger les loups rouges restants, elle est insuffisante à elle seule. Une conservation efficace du loup rouge nécessite une approche paysagère des mesures d'atténuation qui englobe à la fois les routes à fort trafic et celles à faible trafic.

References

- Agan, S. W., Treves, A. and Willey, L. L. 2021a. Estimating poaching risk for the critically endangered wild red wolf (*Canis rufus*). – PLoS One 16: e0244261.
- Agan, S. W., Treves, A. and Willey, L. L. 2021b. Majority positive attitudes cannot protect red wolves (*Canis rufus*) from a minority willing to kill illegally. – Biol. Conserv. 262: 109321.
- Blanco, J. C., Cortés, Y. and Virgós, E. 2005. Wolf response to two kinds of barriers in an agricultural habitat in Spain. – Can. J. Zool. 83: 312–323.
- Clevenger, A. P. and Huijser, M. P. 2011. Wildlife crossing structure handbook. Design and evaluation in North America. – Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Clevenger, A. P., Chruszcz, B. and Gunson, K. E. 2001. Highway mitigation fencing reduces wildlife–vehicle collisions. – Wildl. Soc. Bull. 29: 646–653.
- Coe, P. K., Nielson, R. M., Jackson, D. H., Cupples, J. B., Seidel, N. E., Johnson, B. K., Gregory, S. C., Bjornstrom, G. A., Larkins, A. N. and Speten, D. A. 2015. Identifying migration corridors of mule deer threatened by highway development. – Wildl. Soc. Bull. 39: 256–267.
- De Feudis, C., Torretta, E., Orioli, V., Tirozzi, P., Bani, L., Meriggi, A. and Dondina, O. 2025. Dispersal and settlement dynamics of wolves in a lowland ecological corridor in northern Italy: effects of resource availability and human disturbance. – Biol. Conserv. 302: 110936.
- ESRI. 2018. ArcGIS desktop: release 10.6.1. – Environmental Systems Research Institute, <https://desktop.arcgis.com/en/quick-start-guides/10.6/arcgis-desktop-quick-start-guide.htm>.
- FHWA. 2024. Wildlife Crossings Pilot Program FY 2024–2025 selections. – Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, <https://highways.dot.gov/federal-lands/wildlife-crossings/pilot-program/fy-2024-2025-selections>.
- Ford, A. T., Clevenger, A. P., Huijser, M. P. and Dibb, A. 2011. Planning and prioritization strategies for phased highway mitigation using wildlife–vehicle collision data. – Wildl. Biol. 17: 253–265.
- Foster, M. L. and Humphrey, S. R. 1995. Use of highway underpasses by Florida panthers and other wildlife. – Wildl. Soc. Bull. 23: 95–100.
- Frair, J. L., Merrill, E. H., Beyer, H. L. and Morales, J. M. 2008. Thresholds in landscape connectivity and mortality risks in response to growing road networks. – J. Appl. Ecol. 45: 1504–1513.
- Gagnon, J. W., Loberger, C. D., Sprague, S. C., Ogren, K. S., Boe, S. L. and Schweinsburg, R. E. 2015. Cost-effective approach to reducing collisions with elk by fencing between existing highway structures. – Hum.–Wildl. Interact. 9: Article 14.
- George, K. A., Slagle, K. M., Wilson, R. S., Moeller, S. J. and Bruskotter, J. T. 2016. Changes in attitudes toward animals in the United States from 1978 to 2014. – Biol. Conserv. 201: 237–242.
- Ghasemi, B., Bruskotter, J. T., Vucetich, J. A., Elbroch, L. M., Wilson, R. S., Carter, N. H., Moehrenschrager, A., Perry, S. and Hinton, J. W. 2026. Restoring the wild east: predicting public support for cougar and red wolf reintroduction in the eastern United States. – Biol. Conserv. 313: 111532.
- Hinton, J. W., Proctor, C., Kelly, M. J., van Manen, F. T., Vaughan, M. R. and Chamberlain, M. J. 2016. Space use and habitat selection by resident and transient red wolves (*Canis rufus*). PLoS One 11: e0167603.

- Hinton, J. W., Brzeski, K. E., Rabon Jr, D. R. and Chamberlain, M. J. 2017a. Effects of anthropogenic mortality on critically endangered red wolf *Canis rufus* breeding pairs: implications for red wolf recovery. – *Oryx* 51: 174–181.
- Hinton, J. W., White, G. C., Rabon Jr, D. R. and Chamberlain, M. J. 2017b. Survival and population size estimates of the red wolf. – *J. Wildl. Manage.* 81: 417–428.
- Huijser, M. P. and Begley, J. S. 2023. Impacts of roads and traffic on the red wolf: potential avoidance, mitigation and compensation strategies. – Report 4W9830. Western Transportation Institute, Montana State University.
- Huijser, M. P. and Begley, J. S. 2026. Data from: Road mortality mitigation for red wolves requires a landscape approach. – Dryad Digital Repository, <https://doi.org/10.5061/dryad.63xsj3vhj>.
- Huijser, M. P. and Bell, M. A. 2025. Wildlife crossing hotspot analyses for major highways in Wisconsin, USA. – Report no. 4WB112-A. Western Transportation Institute, Montana State University.
- Huijser, M. P., Duffield, J. W., Clevenger, A. P., Ament R. J. and McGowen, P. T. 2009. Cost–benefit analyses of mitigation measures aimed at reducing collisions with large ungulates in the United States and Canada; a decision support tool. – *Ecol. Soc.* 14(2): 15.
- Huijser, M. P., Fairbank, E. R., Camel-Means, W., Graham, J., Watson, V., Basting, P. and Becker, D. 2016. Effectiveness of short sections of wildlife fencing and crossing structures along highways in reducing wildlife–vehicle collisions and providing safe crossing opportunities for large mammals. – *Biol. Conserv.* 197: 61–68.
- Karlin, M. and Chadwick, J. 2012. Red wolf natal dispersal characteristics: comparing periods of population increase and stability. – *J. Zool.* 286: 266–276.
- Matos, C., Sillero, N. and Argaña, E. 2012. Spatial analysis of amphibian road mortality levels in northern Portugal country roads. – *Amphib. Reptil.* 33: 469–483.
- Musiani, M., Anwar, S. M., McDermid, G. J., Hebblewhite, M. and Marceau, D. J. 2010. How humans shape wolf behavior in Banff and Kootenay National Parks, Canada. – *Ecol. Model.* 221: 2374–2387.
- NCDOT. 2023. NCDOT annual average daily traffic (AADT) mapping application. – <https://ncdot.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=964881960f0549de8c3583bf46ef5ed4>.
- Newsom, A., Lozano, J. and Martín-López, B. 2025. Social perceptions of carnivores across the globe: a literature review. – *Hum. Dimens. Wildl.* 31: 97–120.
- North Carolina Wildlife Resources Commission. 2026. 2025–2026 season dates. – www.ncwildlife.gov/2025-2026-season-dates/download?attachment.
- Roth, J. D., Murray, D. L. and Steury, T. D. 2008. Spatial dynamics of sympatric canids: modeling the impact of coyotes on red wolf recovery. – *Ecol. Model.* 214: 391–403.
- Rytwinski T., Soanes, K., Jaeger, J. A. G., Fahrig, L., Findlay, C. S., Houlahan, J. van der Ree, R. and van der Grift, E. A. 2016. How effective is road mitigation at reducing road-kill? A meta-analysis. – *PLoS One* 11: e0166941.35.
- Santiago-Ávila, F. J., Agan, S., Hinton, J. W. and Treves, A. 2022. Evaluating how management policies affect red wolf mortality and disappearance. – *R. Soc. Open Sci.* 9: 210400.
- Seiler, A. 2003. The toll of the automobile: wildlife and roads in Sweden. – PhD thesis, Swedish Univ. of Agricultural Sciences, Sweden.
- Serenari, C. and Taub, M. 2019. Predicting the legitimacy of wolf recovery. – *Wildl. Biol.* 2019: wlb.00454.
- Serieys, L. E. K., Rogan, M. S., Matsushima, S. S. and Wilmers, C. C. 2021. Road-crossings, vegetative cover, land use and poisons interact to influence corridor effectiveness. – *Biol. Conserv.* 253: 108930.
- Silverman, B. W. 1986. Density estimation for statistics and data analysis. – Chapman and Hall.
- Toth, M. G. and Rubino, E. C. 2024. Assessing local landowner versus non-local public support for a red wolf reintroduction using varying message treatments. – *Wildl. Res.* 51: WR23096.
- Treves, A. and Karanth, K. U. 2003. Human–carnivore conflict and perspectives on carnivore management worldwide. – *Conserv. Biol.* 17: 1491–1499.
- USFWS. 2018. Red wolf species assessment. Report 19 April 2018. – USFWS, <https://ecos.fws.gov/ServCat/DownloadFile/161384>.
- USFWS. 2022. Cape Romain National Wildlife Refuge. South Carolina. – www.fws.gov/refuge/Cape_Romain/wildlife_and_habitat/red_wolves.html.
- USFWS. 2023. Revised recovery plan for the red wolf (*Canis rufus*). – U.S. Fish and Wildlife Service, www.fws.gov/sites/default/files/documents/20230928_frp_RW_508%20compliant_FINAL.pdf.
- USFWS. 2025. Red wolf. *Canis rufus*. – <https://www.fws.gov/south-east/wildlife/mammals/red-wolf/>.
- Waller, J. S. and Servheen, C. 2005. Effects of transportation infrastructure on grizzly bears in northwestern Montana. – *J. Wildl. Manage.* 69: 985–1000.